



Sveučilište u Zagrebu
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Armano Čibarić
Nikola Troškot
Maja Veseljak
Mateja Vukovac

**UTJECAJ KARAKTERISTIKA TOKA KROZ
MOSTOVSKI PROFIL NA NASTANAK
KAVERNE OD PODLOKAVANJA**

Zagreb, 2021.

Ovaj rad izrađen je u zavodu za hidrotehniku pod vodstvom doc. dr. sc. Gordona Gilje i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2020./21.“.

Zahvala

Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom R3PEAT (UIP-2019-04-4046).

Popis kratica korištenih u radu:

- x_i - pojedina vrijednost varijable
- f_i - broj pojavljivanja vrijednosti x_i
- N - ukupni broj podataka
- \bar{x} - srednja ili očekivana vrijednost slučajne varijable (aritmetička sredina)
- σ - standardna devijacija
- C_s - koeficijent asimetrije
- μ_3 - centralni statistički moment trećeg reda
- C_v - koeficijent varijacije
- E - koeficijent spljoštenosti
- M_4 - centralni statistički moment četvrtog reda
- PR - povratni period (povratno razdoblje)

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Važnost mostova kao dijelova prometne infrastrukture.....	1
1.2	Općenito o podlokavanju u okolici mostova.....	2
1.3	Statistika rušenja mostova i najčešći uzroci rušenja	3
1.4	Primjeri rušenja mostova zbog lokalnog podlokavanja	4
1.5	Rezultati istraživanja povezani s tematikom numeričkog modeliranja podlokavanja	6
1.6	Cilj rada	11
2	Metodologija.....	12
2.1	Most Botovo na rijeci Dravi.....	12
2.2	Most Osijek na rijeci Dravi	13
2.3	Most Varaždin na rijeci Dravi.....	14
2.4	Most Jasenovac na rijeci Savi	14
2.5	Prikupljanje i obrada podloga.....	15
2.6	Obrada hidroloških podataka.....	18
2.7	Izrada numeričkog modela	25
2.8	Provedba simulacija	26
3	Rezultati i rasprava	31
3.1	Most Botovo, Drava	31
3.2	Most Osijek, Drava.....	34
3.3	Most Varaždin, Drava	37
3.4	Most Jasenovac, Sava.....	41
4	Zaključak	44
5	Popis literature.....	45

1 UVOD

Naglim razvitkom gradova rasla je i čovjekova potreba za iskorištavanjem okolnih rijeka i zaštitom od mogućih poplava. Za vrijeme niskih vodostaja, plovidba (i posljedično transport ljudi i dobara) nije bila moguća te je počelo usmjeravanje ka prvim regulacijskim radovima na hrvatskim rijekama u 19. stoljeću. Gradili su se nasipi, močvarni les se pretvarao u obradivo poljoprivredno zemljište te su se presijecali meandri i rukavci [1]. Takvi regulacijski radovi imaju i pozitivne i negativne učinke - nakon reguliranja rastu pozitivni učinci (kao što su povećanje sigurnosti od pojave poplava, novi vizualni identitet krajolika, veća vrijednost zemljišta i nekretnina), kao i negativni učinci izazvani skraćanjem tokova rijeka, produbljenjem dna korita te posljedičnim snižavanjem razina srednjih, malih i podzemnih voda (što utječe na funkcionalnost hidrotehničkih građevina i drugih građevina u vodotocima - crpnih stanica, akumulacije, ustave, mostovi i dr.) [2]. Riječni ekosustavi klasificiraju se kao dinamički sustavi zbog karakteristika režima voda i režima nanosa promjenjivih u prostoru i vremenu koji su u konstantnoj interakciji. Pronos nanosa dobiva na svojoj važnosti posebice radi podređivanja vodotoka potrebama društva mnogobrojnim antropogenim zahvatima u koritu i na slivu.

1.1 Važnost mostova kao dijelova prometne infrastrukture

Most je građevina koja prometnicu prevodi preko zapreke na mjestima gdje se na trasi pružanja prometnice nalazi takva zapreka iznad koje nije moguće (ili nije racionalno) ostvariti prelazak njenim izravnim oslanjanjem o tlo ili na nasipu. Zapreke pružanju prometnice nad kojima gradimo mostove mogu biti vodotok, suha dolina, kanjon, uvala, morski tjesnac, rukavac, kanal, druga prometnica ili bilo kakav prostor kada prometnicu treba voditi u višoj razini. No, most svakako mora ostvariti mnogo više od toga - on je simbol sposobnosti, moći i znanja, izričaj je stvaralačkog duha te dominira prostorom pobuđujući nezaboravan dojam prolaznika. Gradnja mostova tekla je stoljećima svojim polaganim razvojem, pretežito na osnovi iskustva s već izvedenih objekata. Pojava željeznice i razvoj cestovnog prometa uvjetovali su izgradnju mostova velikih otvora i duljina, koji su trebali biti brzo sagrađeni [3]. Mnogi značajni događaji vezani su s mostovima - njihovom izgradnjom, postojanjem i rušenjem. Za primjer se može uzeti rušenje mosta Queen Isabella Causeway, Port Isabel, South Padre Island u Teksasu (*slika 1*) kada su 4 natovarene maone udarile u stup mosta uzrokujući djelomično rušenje rasponske konstrukcije mosta. Rušenje mosta imalo je ozbiljne ekonomske posljedice jer je preko mosta prelazila vodoopskrba i napajanje grada South Padre Island električnom

energijom. Uz sve to, plaža je bila pusta, hoteli su se zatvorili, a putovanje na posao je postalo nemoguće. Obnova je koštala 5.000.000 \$ uz nepovratno izgubljenih 8 ljudskih života [4].



Slika 1. Rušenja mosta Queen Isabella Causeway, Port Isabel, South Padre Island, Teksas [5]

1.2 Općenito o podlokavanju u okolini mostova

Napravljena su brojna istraživanja i praćenja promjena u vodotocima upravo zbog važnosti razumijevanja režima nanosa u okolini infrastrukturnih objekata. Remećenje strujne slike izaziva tri različita mehanizma povezana s režimom nanosa: globalnu eroziju, eroziju uslijed suženja toka i lokalnu eroziju. Globalna erozija uključuje promjene u vidu snižavanja ili izdizanja korita te bočno pomjeranje obala. Može biti kratkoročna i dugoročna, ovisno o dužini vremenskog intervala. Postojanje samog mosta direktno utječe na eroziju smanjenja protjecajnog profila i lokalnu eroziju. Kako bi se odredio razlog erozije uslijed suženja toka, postavlja se kriterij granične brzine. Ukoliko je granična brzina manja od srednje brzine toka, govori se o eroziji u uvjetima čiste vode. Ukoliko je granična brzina veća od srednje brzine toka, nastupa erozija u uvjetima pokretnog korita. Lokalna erozija događa se oko stupova i upornjaka mosta zbog produljenja strujnica koje se koncentriraju uz bridove građevine te nastajanja vrtloga te dolazi do povećanja brzina i jediničnog protoka što sve utječe na lokalno povećanje posmičnih napreznja [6]. Negativan učinak lokalne erozije očituje se u nastanku kaverne. Dimenzije kaverne se povećavaju sve dok se ne uspostavi ravnoteža između ulazne i izlazne količine nanosa [7]. Kako bi se odredila dubina podlokavanja, koriste se razne teorijske jednadžbe koje su često nepouzdanae zbog specifičnih uvjeta u kojima su izvedene [8]. Stoga se pouzdani rezultati mogu dobiti samo direktnim mjerenjem na terenu ili numeričkim i/ili laboratorijskim simulacijama na modelu umanjenog mjerila.

1.3 Statistika rušenja mostova i najčešći uzroci rušenja

Dodatna opterećenja na konstrukciju uzrokovana lokalnim podlokavanjem korita u blizini mosta, i ostali novi uvjeti koji nisu uzeti u obzir prilikom projektiranja mogu biti nepovoljni za stabilnost konstrukcije. Kroz povijest postoje brojni primjeri oštećenja i rušenja mostova s ozbiljnim ekonomskim posljedicama, ali nažalost nerijetko i s velikim brojem ljudskih žrtava. Američki inženjer građevinarstva David Bernard Steinman je 1945. izjavio da „*ako izvučemo pouke, havarije mostova nisu bile uzaludne*“ te upravo iz tog razloga, pouke tih havarija treba ozbiljno analizirati i razmotriti kako bi se u budućnosti spriječile ili svele na najmanju moguću razinu. Havarije mostova su dakako imale značajni učinak na razvitak znanja o morfodinamičkom razvoju korita u blizini građevina jer su potakle detaljna istraživanja pojedinih područja. Najučinkovitija prevencija je reducirati ili potpuno ukloniti sve faktore koji mogu uzrokovati nepredviđene incidente s pomoću učinkovitog planiranja i projektiranja. Općenito, havarija mosta se može definirati kao potpuno ili djelomično rušenje mosta te ozbiljnija oštećenja koja most doživi. Do havarija zapravo najčešće dolazi zbog kritične kombinacije različitih djelovanja, a u *tablici 1* prikazani su statistički podaci najčešćih uzroka potpunog rušenja mostova prema Imhofu [9] za razdoblje od 1813. do 2004. na uzorku od 347 mostova.

Tablica 1. Statistički podaci najčešćih uzroka potpunog rušenja mostova (1813.-2004.) [9]

Uzrok potpunog rušenja	Postotak
Ograničeno znanje	10%
Ljudske pogreške	10%
Prirodne opasnosti	29%
Nesreće	18%
Preopterećenje	10%
Pogreške pri projektiranju	21%
Korozija	2%

Iz statističkih se podataka prikazanih u *tablici 1* može vidjeti da su prirodne opasnosti s udjelom od 29% vodeći uzrok potpunog rušenja mostova, a odmah nakon toga su pogreške pri projektiranju s udjelom od 21%. Detaljniji prikaz uzroka rušenja metalnih mostova nalazi se u *tablici 2* čiju su analizu proveli Imam i drugi 2010. godine na uzorku od 164 mosta [10]. Prema podacima iz *tablice 2* moguće je vidjeti da se najveći broj rušenja mostova događa zbog hidrauličkih uzroka, a od toga su dva najzastupljenija uzroka rušenja poplave i podlokavanje mostova, a o potonjem će više biti govora u narednim poglavljima. U studiji pod nazivom „A Study U.S. Bridge Failures (1980-2012)“ [11] utvrđeno je da je podlokavanje uz poplave jedan od glavnih uzroka otkazivanja stabilnosti: do

otkazivanja stabilnosti u 19% slučajeva došlo je zbog podlokavanja, a u 28% slučajeva zbog poplavnih djelovanja na konstrukciju, a zajedno to iznosi 47% hidrauličkih uzroka. Sličnu bazu podataka analizirao je Imhof te zaključio da je udio elementarnih nepogoda u rušenju mostova 29%, od čega 61% pripada hidrauličkim uzrocima [9].

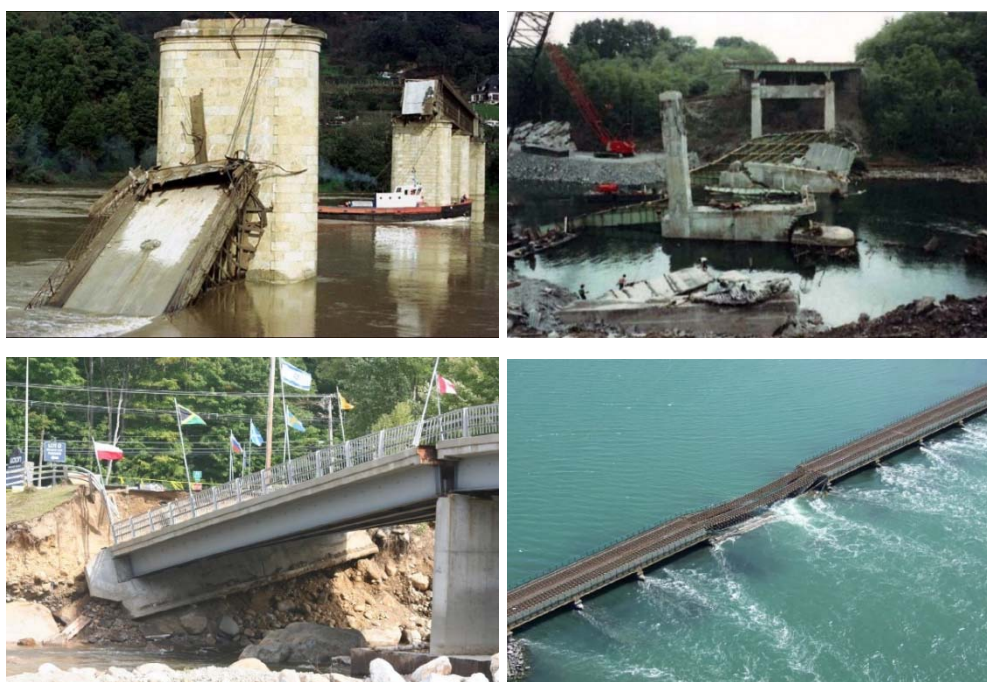
Tablica 2. Uzroci rušenja metalnih mostova na uzorku od 164 mosta [10]

Uzroci rušenja	Djelomični slom	Potpuni slom	Broj mostova	Postotak
Hidraulički uzroci – ukupno	21	27	48	52,17%
Hidraulični	-	2	2	2,17%
Poplava	8	18	26	28,26%
Podlokavanje	12	7	19	20,65%
Led	1	-	1	1,09%
Sudari: ukupno	17	1	18	19,57%
Sudari	14	1	15	16,30%
Cestovna vozila	3	-	3	3,26%
Preopterećenje	3	8	11	11,96%
Dotrajavanje – ukupno	4	2	6	6,52%
Dotrajavanje	-	1	1	1,09%
Dotrajavanje čelika	2	1	3	3,26%
Dotrajavanje betona	2	-	2	2,17%
Požar	3	-	3	3,26%
Izvedba	1	1	2	2,17%
Zamor čelika	1	-	1	1,09%
Ležajevi	-	1	1	1,09%
Tlo	1	-	1	1,09%
Ostalo	1	-	1	1,09%
UKUPNO	52	40	92	100,00%

1.4 Primjeri rušenja mostova zbog lokalnog podlokavanja

Brojni su primjeri rušenja mostova kroz povijest, a ovdje je izdvojeno nekoliko njih koji su doživjeli havariju upravo zbog lokalnog podlokavanja. Podlokavanje se definira kao iskopavanje i pomicanje materijala zbog erozivnog djelovanja vode [12]. Prije dva desetljeća, točnije 04. ožujka 2001. godine je rušenje mosta *Hintze Ribeiro* (slika 2, gore lijevo) iznad rijeke Douro u Portugalu prouzročilo smrt 59 osoba, a uzrok je bilo podlokavanje uslijed nekontrolirane ekstrakcije pijeska u području stupova mostova. Zbog velikih brzina vode, nije bilo moguće izvesti akciju spašavanja te je riječna struja tijela žrtava odnijela više od 30 km nizvodno. Tragedija je izazvala veliki šok u čitavoj državi,

sljedećih su dana deseci mostova zatvoreni i poslani na trenutni pregled i popravak, a također se saznalo i da su upozorenja ronilaca i inženjera bila zanemarena [13]. Most *Schoharie Creek* u SAD-u izgrađen 1954. srušio se 05. travnja 1987. zbog podlokavanja oko srednjeg stupa (*slika 2, gore desno*), a u projektu izvedenog stanja je bilo navedeno da je žmurje za izvedbu temelja ostavljeno kao zaštita, ali nije. Posljedice rušenja ovog mosta su osim ekonomskih bile i 10 ljudskih žrtava [14]. Tijekom pojave velikih voda 2011. godine uslijed tropske oluje Irena, most *The Loon Mountain* urušio se zbog podlokavanja u području upornjaka mosta. (*slika 2, dolje lijevo*) [15]. Jedan od primjera je i rušenje dijela željezničkog mosta Malahide koji premošćuje Broadmeadows estuarij sjeverno od grada Malahide. Konstrukcija mosta urušila se 21. kolovoza 2009. godine (*slika 2, dolje desno*). Stupovi mosta djelomično su temeljeni na građevini praga trapeznog profila izvedenoj od lomljenog kamena, koji je početno izgrađen 1845. godine. Do rušenja je došlo zbog narušavanja stabilnosti preljeva uslijed djelovanja vode [16].



Slika 2. Havarije mosta u svijetu [13, 14, 15, 16]

Za kraj ovog poglavlja, nije na odmet spomenuti i primjere oštećenja mostova uslijed lokalnog podlokavanja koji su se dogodili kod nas, a radi se o mostu Sava – Jakuševac i o mostu Đurmanec u Krapinsko – zagorskoj županiji. Spomenuti most Sava – Jakuševac nalazi se u Zagrebu kod naselja Mičevac te je u noći 30. ožujka 2009., za trajanja vodnog vala, došlo do naginjanja južnog od dva stupa koja se nalaze u koritu rijeke Save. (*slika 3*). Na sreću, iako je teretni vlak koji je prošao preko mosta izazvao znatna oštećenja rasponske konstrukcije, nije došlo do težih posljedica (ljudskih

stradanja ili rušenja cijelog mosta u rijeku zajedno s kompozicijom). Most Đurmanec je doživio oštećenje za vrijeme velikovodnog događaja u lipnju 2015. godine kao posljedicu dnevne oborine $> 23 \text{ l/m}^2$ u slivu rijeke Krapinice čiji je protok imao dovoljan erozivni kapacitet da erodira desnu obalu uz južni upornjak mosta (slika 4). Uz veliki protok rijeke Krapinice, dodatni utjecaj na eroziju obale je imao plutajući nanos koji se nagomilao u središnjem, najvećem, rasponu mosta. Količina plutajućih naplavina je bila dovoljna da onemogući protok kroz središnji otvor, već je on u potpunosti bio usmjeren u desni otvor te erodirao desnu obalu iza upornjaka u dubini 2 – 3 metra te temelja upornjaka što je posljedično rezultiralo njegovim naginjanjem [17].



Slika 3. Most „Sava – Jakuševac“ nakon gubitka stabilnosti [16]



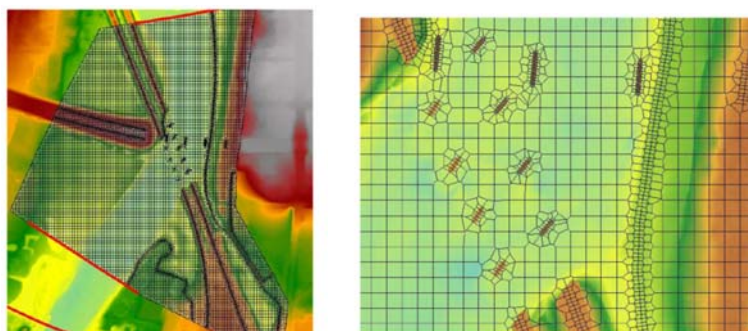
Slika 4. Most „Đurmanec“ nakon gubitka stabilnosti [18]

1.5 Rezultati istraživanja povezani s tematikom numeričkog modeliranja podlokavanja

Za analizu dubine podlokavanja stupova uslijed djelovanja lokalne erozije najčešće se primjenjuju jednodimenzionalni matematički modeli (npr. HEC-RAS). Kao ulaz u model koristi se prethodno snimljena geometrija korita kontrolnih poprečnih profila. Na toj se geometriji izračunaju hidraulički parametri toka za karakteristične uvjete tečenja. U model se unesenu geometrijske karakteristike kontrolnog profila na kojem se nalazi most, kao i samog mosta. Na temelju oblika mosta i njegove izloženosti toku odaberu se koeficijenti za korištenje u vladajućim empirijskim jednadžbama.

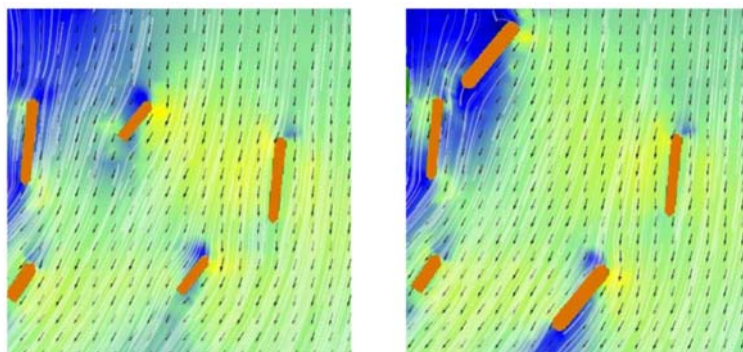
Rezultati se sastoje od predviđanja lokalne erozije pomoću odabrane empirijske jednadžbe. Model izračunava konačnu dubinu podlokavanja stupova mosta uslijed djelovanja lokalne erozije, tj. onu dubinu pri kojoj je količina materijala iz dna koja se erodira iz kaverne jednaka onoj koja u nju ulazi. To znači da nije moguće vremenski promatrati propagaciju erozije na odabranoj građevini.

Vremenski promjenjivo polje tečenja moguće je simulirati pomoću 2D numeričkih modela, od kojih je najzastupljeniji HEC-RAS 2D zbog svoje jednostavnosti i otvorenog pristupa. Analizom rezultata 2D numeričkog modela, tj. detaljnog polja tečenja, moguće je donositi zaključke o potencijalnoj opasnosti od podlokavanja na temelju promjena u strukturi toka. Izrada 2D hidrauličkih modela tečenja kojima se opisuje režim voda u rijekama može biti dugotrajan i skup zadatak - dva su ključna čimbenika koji određuju cijenu izrade modela, a to su: vrijeme izrade modela i troškovi licenciranja softvera. Usporedbom HEC-RAS modela s komercijalnim softverom pokazano je on pokazuje zadovoljavajuću točnost [19]. Korištenjem besplatnog HEC-RAS 2D softvera, možemo smanjiti troškove izrade modela. Prednost korištenja HEC-RAS modela za 2D numeričke simulacije je njegova javna dostupnost, jednostavnost korištenja, velika baza korisnika koji osiguravaju podršku i kontinuirano unaprjeđenje dostupnih modula. Prelazak iz 1D domene simulacija u 2D domenu je jednostavan jer je moguće kombinirati 1D građevine u 2D okruženju, nadograđujući na taj način već usvojena znanja [20]. Niz je primjera upotrebe HEC-RAS 2D modela vodnom gospodarstvu: modeliranje opasnosti od poplava, modeliranje drenažnih sustava otjecanja sa sliva i modeliranje utjecaja hidrotehničkih građevina na režim voda u rijekama. U kontekstu mostova, 2D modeli se koriste za izračun karakteristika polja brzine u zoni mostova prilikom njihove gradnje, rekonstrukcije ili radova na koritu koji utječu na hidrauličke karakteristike u okolini mosta [21]. Rezultatima modela se dokazuju opterećenja na konstrukciju u skladu sa zakonskom regulativom, projektni vodostaj, sigurnosno nadvišenje te služe za dokumentiranje hidrauličkih analiza [22].



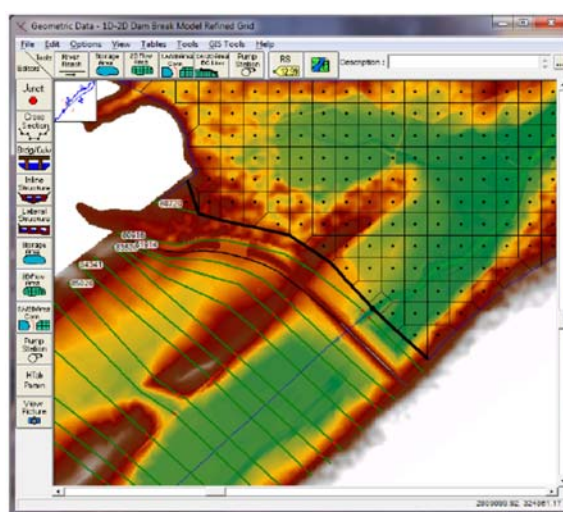
Slika 5. Primjer domene 2D HEC-RAS modela za proračun tečenja na dionici s 2 međusobno bliska mosta [22]

U nastavku su prikazani rezultati 2D polja tečenja u okolici mosta za postojeće i projektno stanje pomoću vektorskog i skalarnog polja koje otkriva razliku u lokalnom polju tečenja u zoni zahvata.



Slika 6. Primjer izračunanog polja brzine za uvjete rekonstrukcije mosta pomoću 2D HEC-RAS modela: postojeće stanje (lijevo) i projektno stanje (desno) [22]

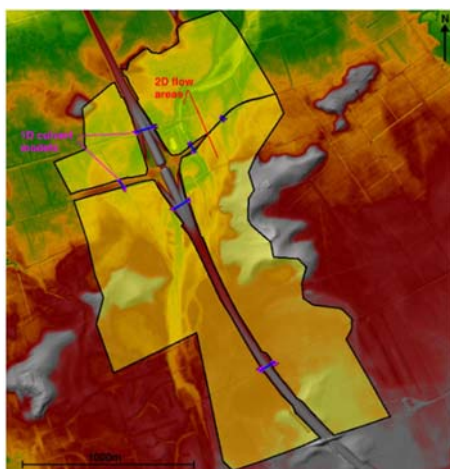
U nastavku je prikazana domena kombiniranog 1D/2D modela [23].



Slika 7. Primjer domene kombiniranog 1D/2D HEC-RAS modela [23]

2D model pruža mogućnost nadilaska ograničenja 1D modela, kao što su reprezentiranje više mostova u međusobnoj interakciji, izračun brzine u više smjerova po prostoru te detaljna analiza polja brzine oko stupa. Korisnici mogu direktno povezati domene 2D i 1D modela kako bi optimizirali vrijeme simulacije, uz zadržavanje točnosti rezultata oko građevina. Ovaj način rada je izrazito bitan u prirodnim vodotocima gdje su vodomjerne postaje međusobno previše udaljene za korištenje isključivo 2D modela, odnosno njihovo korištenje ne bi bilo racionalno.

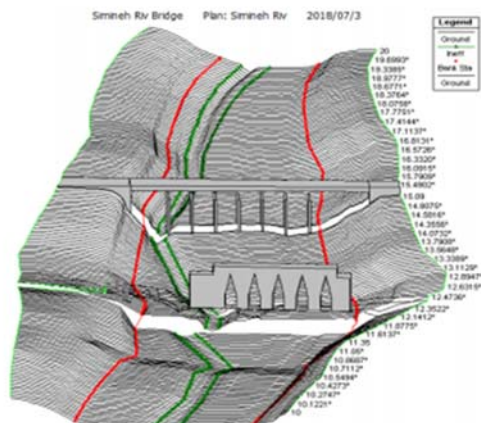
Osim spajanja 1D i 2D modela, HEC-RAS omogućuje izradu više 2D domena međusobno spojenih 1D elementima kao što je prikazano na primjeru projektiranja drenažnog sustava Hamilton uz autocestu Waikato. U ovom su projektu izgrađeni HEC-RAS 2D modeli spojeni za ispitivanje i provjeru različitih mogućnosti projektiranja za nekoliko 1D propusta za oborinske vode te za usporedbu razina poplave prije i nakon izgradnje kako bi se odgovorilo na potrebne zahtjeve. Za ovaj projekt hidraulički model je podijeljen u niz povezanih proračunskih domena, a propusti su grupirani unutar jedne domene koja je u interakciji s poplavnim područjima. Za svaku skupinu propusta postavljen je model prije gradnje i model nakon izgradnje kako bi se omogućila usporedba maksimalnih vodostaja između ovih varijantnih rješenja, a razlika je bila je ključna za procjenu učinkovitosti svake varijante. Rezolucija 2D područja je pravilna mreža kvadrata 10 m x 10 m, omeđena granicom domene. Otjecanje s prometnice nije modelirano u 2D, već je simulirano istjecanjem iz upojnih laguna izgrađenih za prikupljanje oborine s prometnice [24]. Projekt otjecanja uz autocestu Waikato, sa svojim složenim drenažnim sustavom, predstavljao je izazovnu i složenu primjenu HEC-RAS 2D modela. Uspješna uporaba HEC-RAS 2D modela u ovoj studiji pokazuje da se ovaj softver može koristiti za postizanje robusnih i isplativih rezultata modeliranja.



Slika 8. 1D / 2D povezani HEC-RAS model područja Greenhill Interchange za projekt autoceste Waikato

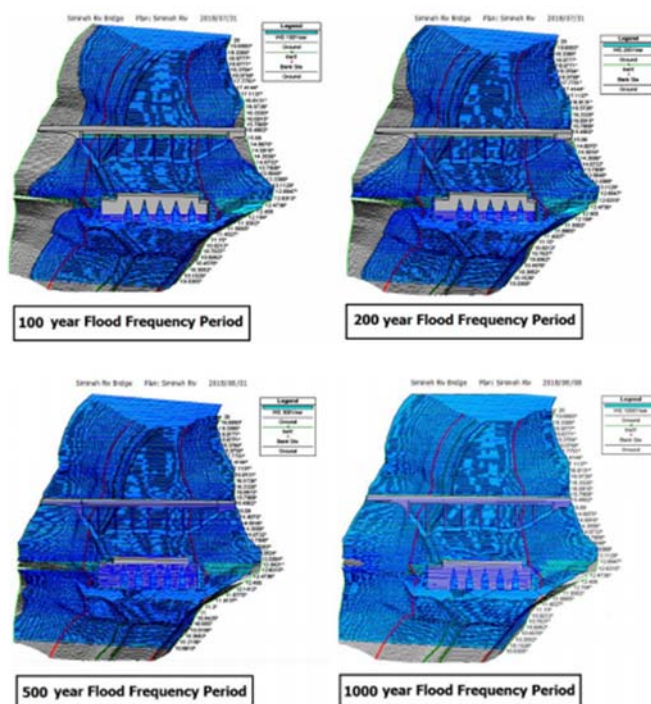
[24]

Drugi primjer je proračun podlokavanja oko stupova mosta Simineh Rood u Iranu. Prvi korak u softverskoj simulaciji HEC-RAS za izračunavanje maksimalne dubine podlokavanja stupova mostova je odabir nekoliko presjeka na dnu i nekoliko presjeka uzvodno od mosta. Geometrija mosta Simineh Rood uključuje upornjake i 7 redova pravokutnih stupova. Također za proračun su bili potrebni podaci o protocima za povratno razdoblje od 5 do 100 godina [25].



Slika 9. Postavljena geometrija mosta Simineh Rood za određivanje dubine podlokavanja [25]

Slika 7 prikazuje profile za povratna razdoblja od 100, 200, 500 i 1000 godina. U tim razdobljima, zbog porasta protoka odabran je pogodan tip dna korita. U tim razdobljima podlokavanje započinje od desnog upornjaka, a kako se protok povećava, povećava se i podlokavanje. Za povratno razdoblje od 1000 godina, protok se dramatično povećao. U dva povratna razdoblja (500 i 1000 godina), upornjaci mosta s desne i lijeve strane su pod jakim utjecajem podlokavanja.



Slika 10. Poprečni profili za povratna razdoblja od 100, 200, 500 i 1000 godina [25]

1.6 Cilj rada

Cilj ovog rada je ispitati strukturu 2D polja tečenja u okolini stupova za 4 pilot mosta u svrhu procjene lokacije nastanka kaverne za različite režime voda.

Hipoteza rada glasi: Karakteristike polja tečenja simulirane 2D numeričkim modelom HEC-RAS mogu se koristiti za procjenu lokacije formiranja kaverne uslijed lokalnog podlokavanja.

2 METODOLOGIJA

Metodologija korištena u ovom radu za utvrđivanje strukture 2D polja tečenja u okolici stupova za 4 pilot mosta sastoji se od šest cjelina:

1. Prikupljanje i obrada podloga
2. Obrada podataka
3. Uspostava numeričkog modela
4. Provedba simulacija
5. Analiza rezultata
6. Prikaz rezultata s osvrtom

Pilot mostovi odabrani za provedbu istraživanja su dio istraživanja za potrebe projekta R3PEAT (Daljinsko praćenje erozije riprap zaštite od podlokavanja na velikim rijekama u stvarnom vremenu, www.grad.hr/r3peat), a nalaze se na sljedećim lokacijama:

- Most Botovo na rijeci Dravi
- Most Osijek na rijeci Dravi
- Most Varaždin na rijeci Dravi
- Most Jasenovac na rijeci Savi

U nastavku će se za svaki most prikazati kratki tehnički opis s osnovnim karakteristikama i dimenzijama.

2.1 Most Botovo na rijeci Dravi

Most Botovo (*slika 11*) izgrađen je 1895. godine kao drveni most, a nalazi se u Botovu na km 523 + 579 pruge Og – Botovo – Dugo Selo te premošćuje rijeku Dravu. Most je potpuno obnovljen 1962./1963. godine i izgrađen kao čelični za cestovni i željeznički promet, a 1982. godine dobio je sadašnji oblik tj. ukinut je cestovni promet na njemu i sada služi isključivo za željeznički promet. Most ima rešetkastu rasponsku konstrukciju te 3 otvora. Veličina otvora iznosi 97,00 + 97,00 + 97,00 m, a raspon konstrukcije je 291 m. Nosiva konstrukcija je od čelika, upornjaci i ležajna greda od armiranog betona, a zide, krila i temelji od betona. Oba stupa nalaze se u koritu vodotoka [26].



Slika 11. Most Drava – Botovo, pogled uzvodno [26]

2.2 Most Osijek na rijeci Dravi

Most Osijek (*slika 12*) izgrađen je 1977. godine, a nalazi se u Osijeku na km 2+088,443 pruge M301 dg - B. Manastir - Osijek te premošćuje rijeku Dravu. Most ima 3 otvora, a u statičkom sistemu nosive konstrukcije radi se o kontinuiranom rešetkastom nosaču. Veličina otvora iznosi 57,98 + 71,08 + 57,98 m, razmak između upornjaka iznosi 193,03 m. Upornjaci mosta su od armiranog betona na betonskim temeljima s AB ležajnim gredama i betonskim krilnim zidovima. Dva stupa, visine cca. 30.0 m su betonska na betonskim temeljima i AB ležajnom gredom i oba su smještena u vodotoku [27].



Slika 12. Most Drava – Osijek, pogled nizvodno [27]

2.3 Most Varaždin na rijeci Dravi

Most Varaždin (*slika 13*) izgrađen je 1953. godine, a nalazi se u Varaždinu na km 90+790 pruge R201 Zaprešić – Čakovec te premošćuje rijeku Dravu. Most je obnovljen 1986. godine zamjenom ležajnih kvadera. Most ima 6 otvora, a u statičkom sistemu nosive konstrukcije radi se o betonskoj nosivoj konstrukciji. Veličina otvora iznosi $32,20 + 32,20 + 32,20 + 32,20 + 32,20 + 32,20$ m, a razmak između upornjaka iznosi 208,30 m. Upornjaci mosta su od armiranog betona kao i svi stupovi. Svih 5 stupova smješteno je u vodotoku. Dužina objekta iznosi 220,20 m. Na mjestu sadašnjeg mosta postojao je prije čelični most dvostrukih raspona od sadašnjeg. Između starih stupova postavljeni su novi stupovi, a na stare srušene stupove dograđeni su novi. Temeljenje je izvedeno na dubini od cca 10 m u dobro zbijenom šljunku, a stari stupovi su temeljeni na istoj dubini i od prijašnjeg mosta temeljno tlo je konsolidirano [28].



Slika 13. Most Drava – Varaždin, pogled nizvodno [28]

2.4 Most Jasenovac na rijeci Savi

Mosta Jasenovac (*slika 14*) nalazi se u naselju Jasenovac, a u statičkom sistemu je čelična, zakovana i djelomično zavarena, rešetkasta konstrukcija otvorenog kolosijeka. Nalazi se na km 317+403 pruge M502 Zagreb GK –Sisak -Novska. Most je ukupne duljine 220,00 m i s tri otvora ($50,50 + 50,50 + 57,50$ m) te premošćuje rijeku Savu istočno od Jasenovca. Prvi puta je sagrađen 1888. godine. Rušen je dva puta, prvi puta za vrijeme Drugog svjetskog rata, a drugi puta u Domovinskom ratu 1992. godine. Oba puta je rušena samo gornja konstrukcija mosta dok su betonski stupovi ostali neoštećeni [29].



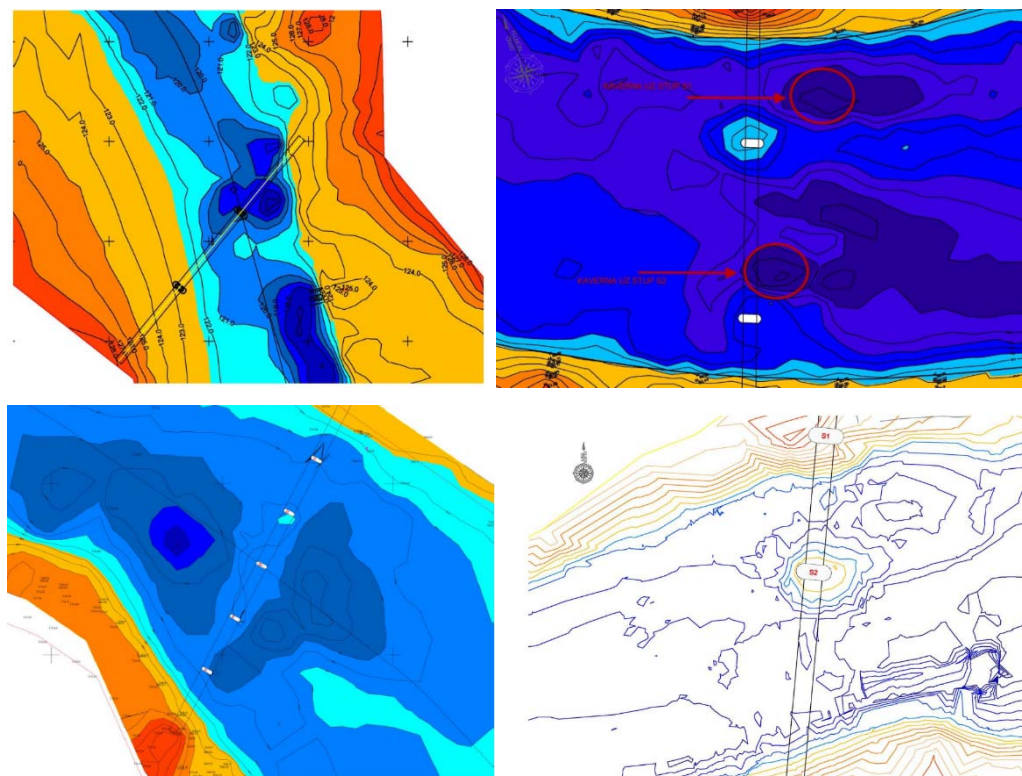
Slika 14. Most Sava – Jasenovac, pogled uzvodno [29]

2.5 Prikupljanje i obrada podloga

U cilju analize morfologije dna korita za četiri odabrana mosta korištene su geodetske, geomehaničke, hidrološke i vizualne podloge. Geodetske, geomehaničke i vizualne podloge su preuzete iz odgovarajućih elaborata koje su izradili djelatnici Građevinskog fakulteta u Zagrebu za potrebe Hrvatskih željeznica (HŽ). Hidrološke podloge su preuzete iz javno dostupne baze Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ).

2.5.1 Geodetske podloge

Pri svakom je zahvatu neophodno poznavati konfiguraciju terena te su zbog toga geodetske podloge od iznimne važnosti za daljnje analize. Geodetske podloge koje su se koristile u ovom radu su snimljena batimetrija korita i dimenzije stupova mostova. Batimetrija korita snimljena je pomoću podvodnog geodetskog snimanja pojasa ispod mosta te 15 m uzvodno i 15 m nizvodno od samog mosta. Rezultati geodetskih snimanja su obrađeni u apsolutnim kotama te je izrađena situacija s iscrtanim izobatama. Na *slici 15* može se vidjeti geodetski snimak korita s prikazom dubina pomoću izobata i u različitim bojama koje predstavljaju različiti raspon dubina. Snimljena batimetrija korita korištena je kao podloga za numerički model. [26, 27, 28, 29].



Slika 15. Detaljni geodetski snimak korita u području mosta Botovo (gore lijevo), mosta Osijek (gore desno), mosta Varaždin (dolje lijevo) i mosta Jasenovac (dolje desno) [26, 27, 28, 29]

2.5.2 Hidrološke podloge

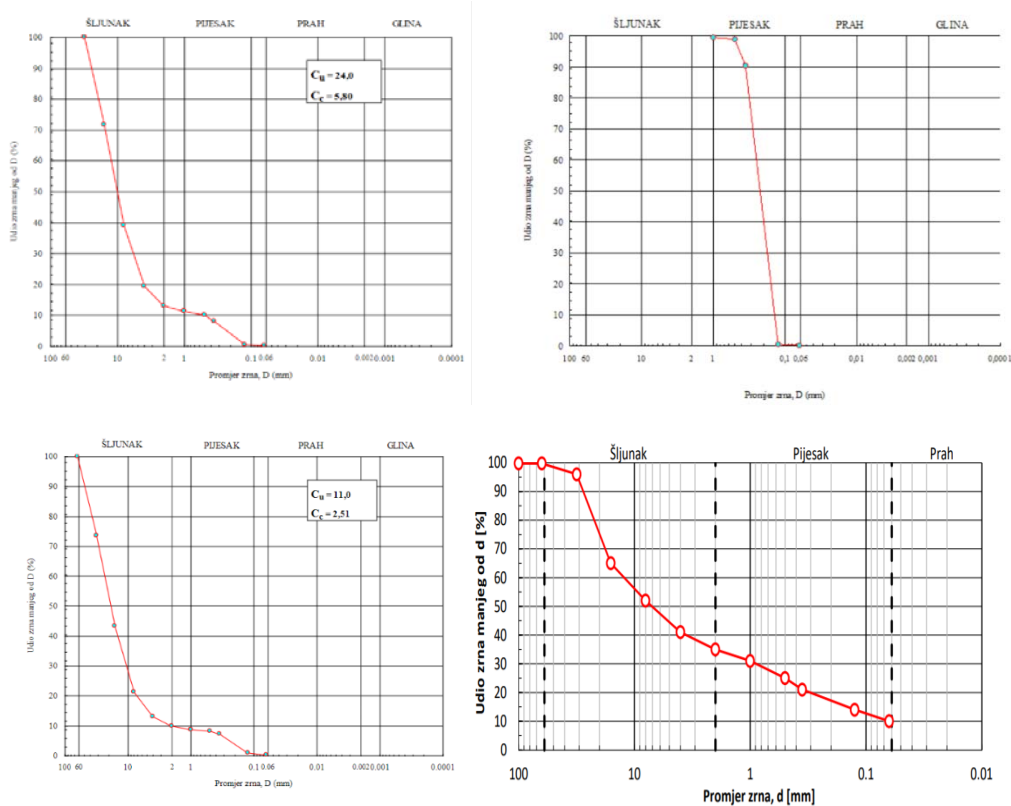
Za potrebe ovog rada su također prikupljene i hidrološke podloge koje su preuzete iz javno dostupne baze Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) [30]. Protoci i vodostaji za svaki most prikupljeni su kao dnevne vrijednosti s odgovarajućih vodomjernih postaja. Konkretno, na rijeci Dravi za most Varaždin su to protoci na VP Donja Dubrava (stacionaža 242,150 km) i vodostaji na VP Varaždin (stacionaža 284,900 km), za most Botovo je istoimena VP Botovo (stacionaža 226,800 km) na kojoj se bilježe protoci i vodostaji te za most Osijek su to VP Belišće (stacionaža 53,800 km) i VP Terezino Polje (stacionaža 152,300 km) za protoke te VP Osijek (18,960 km) za vodostaje. Podaci za most Jasenovac na rijeci Savi su uzeti s VP Jasenovac (stacionaža 500,500 km) na kojoj se mjere protoci i vodostaji. Primarnom obradom hidroloških podataka određene su srednje i ekstremne vrijednosti vodostaja i protoka i trenuci njihove pojave. Duljina niza koja se koristila za obradu podataka na odgovarajućoj vodomjernoj postaji prikazana je u *tablici 3* u nastavku. Protoci s VP Varaždin zbog nedovoljne duljine niza neće se uzimati za analizu već će poslužiti kao nadopuna podataka za protoke na VP Donja Dubrava budući da se može pretpostaviti da vrijedi jednadžba kontinuiteta. Podaci s VP Osijek će poslužiti samo za obradu vodostaja budući da ne postoji mjerenje protoka na istoj.

Tablica 3. Duljina niza za obradu podataka na pojedinim vodomjernim postajama

Most	Duljina niza za vodostaj [god]	Duljina niza za protok [god]
VP Donja Dubrava	42	42
VP Varaždin	120	24
VP Botovo	93	93
VP Belišće	57	57
VP Osijek	119	0
VP Terezino Polje	94	58
VP Jasenovac	119	93

2.5.3 Geomehničke podloge

Za cjelovito proučavanje morfoloških promjena važno je promatranje nanosa koje uključuje pronos Q_n i njegove geomehničke karakteristike. Najvažnije geomehnička podloga je materijal tvorbe dna korita koji je uzorkovan na lokaciji oko mosta pri podvodnom pregledu. Laboratorijski rezultati prikazani su grafički te se iz granulometrijske krivulje (slika 16) očitava veličina sastava zrna dna. [26, 27, 28, 29] Navedeni podatak će se koristiti u kasnijim analizama kad će se unositi kao ulazni podatak za unos hrapavosti u numerički model.



Slika 16. Granulometrijska krivulja materijala dna korita rijeke za most Botovo (gore lijevo), most Osijek (gore desno), most Varaždin (dolje lijevo) i most Jasenovac (dolje desno) [26, 27, 28, 29]

2.5.4 Vizualne podloge

Od vizualnih podloga treba spomenuti fotodokumentaciju dijelova konstrukcije iznad vode (*slika 17*) te podvodne videosnimke koje daju uvid u stanje i oblik konstrukcije pod vodom odnosno karakteristike građevine koje su izostale iz geodetskih snimaka. Detaljni podvodni vizualni pregled stupova izveden je ronilačkim snimanjem korištenjem podvodne kamere. Prilikom snimanja načinjene su podvodne fotografije i videozapisi uočenih oštećenja na temeljima mosta. Izrađena je 3D shema mosta na kojoj su prikazane lokacije podvodnih fotografija i uočenih oštećenja [26, 27, 28, 29].



Slika 17. Lijeva strana stupa S1 mosta Botovo (gore lijevo), oštećenje u lijevom uglu stupa S1 na mostu Osijek (gore desno), oštećenje na stupu S4 mosta Varaždin (dolje lijevo), urušena obaloutvrda na mostu Jasenovac (dolje desno) [26, 27, 28, 29]

2.6 Obrada hidroloških podataka

Za potrebe provođenja numeričkih simulacija, preuzeti hidrološki podaci su obrađeni te su izračunane karakteristične hidrološke veličine odnosno vodostaji i protoci. Za proračun vjerojatnosti pojave hidroloških ekstrema prilikom definiranja vremenskog niza koristila se metoda godišnjih ekstrema.

Vremenski niz je formiran iz godišnjih ekstrema i to iz niza godišnjih maksimuma za proračun vjerojatnosti pojave velikih voda. Na tako definiran statistički skup podataka kao niz vrijednosti slučajne varijable mogu se primijeniti metode inferencijalne statistike ako su ispunjeni sljedeći početni uvjeti: 1) članovi niza su slučajne veličine, 2) članovi niza su međusobno neovisni, 3) niz mora biti dovoljno dug, 4) niz mora biti homogen, 5) članovi niza moraju biti stacionarni [31]. Zabilježeni povijesni podaci vodostaja i protoka zaista jesu slučajne veličine te su članovi međusobno neovisni. U hidrološkoj praksi uobičajeno je pravilo da se za statističku analizu koriste nizovi izmjerenih podataka od najmanje 30 godina. U *tablici 3.* se može vidjeti da su svi nizovi veći od 30 godina što je u skladu s pravilom o duljini niza. Unatoč tome što su se na VP Botovo i VP Osijek mijenjale kote nule vodomjera, to neće utjecati na obradu podataka budući da su se uzimale apsolutne vrijednosti vodostaja.

Vjerojatnost pojavljivanja neke vrijednosti hidrološke veličine mogla bi se dobiti iz empirijske raspodjele vjerojatnosti kad bi postojale vrlo duge serije mjerenja te veličine. Kako se takvim serijama praktično nikada ne raspolaže, empirijska raspodjela vjerojatnosti (dobivena na ograničenom uzorku podataka) se aproksimira nekom teorijskom funkcijom raspodjele vjerojatnosti. Pomoću teorijske funkcije raspodjele vjerojatnosti može se odrediti vjerojatnost pojavljivanja hidrološke veličine vrlo male vjerojatnosti pojavljivanja tj. vjerojatnost pojavljivanja hidrološke veličine koja nije zabilježena (izmjerena). Od kontinuiranih razdioba vjerojatnosti u hidrološkoj praksi, u ovom su se radu koristile: log – normalna (Galtonova), log– Pearson III i Gumbelova raspodjela. U nastavku će biti prikazani statistički parametri niza koji ukazuju kakvo je ponašanje uzorka [31].

Pod srednjom ili očekivanom vrijednosti slučajne varijable (aritmetička sredina) se podrazumijeva sljedeći izraz:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \cdot x_i}{N} = \frac{x_1 f_1 + x_2 f_2 + \dots + x_N f_N}{f_1 + f_2 + \dots + f_N} \quad (1)$$

što ujedno predstavlja i prvi centralni moment.

Centralni statistički moment drugog reda se naziva varijanca. To je suma kvadrata odstupanja svakog člana x_i od aritmetičke sredine niza \bar{x} pomnožena s odgovarajućom učestalosti te podijeljena s brojem elemenata uzorka. Obično se naziva i „srednje kvadratno odstupanje“ te se označava simbolom σ^2 .

Drugi korijen iz varijance se naziva standardna devijacija te se prikazuje izrazom:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

Iz samog je izraza vidljivo da varijanca odnosno standardna devijacija služi kao mjera disperzije podataka članova ili jedinica x_i od prosječne vrijednosti. Ako se mjera disperzije želi bezdimenzionalno izraziti, tada se to može učiniti pomoću koeficijenta varijacije C_v koji predstavlja odnos standardne devijacije i prosječne vrijednosti:

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (3)$$

Za određivanje stupnja simetričnosti i spljoštenosti krivulje služe momenti višeg reda. Tako primjerice moment trećeg reda predstavlja koeficijent asimetrije i prikazuje se izrazom:

$$C_s = \frac{\mu_3}{\sigma^3} = \frac{\sum_{i=1}^N f_i (x_i - \bar{x})^3}{N\sigma^3} \quad (4)$$

Koeficijent spljoštenosti služi za ocjenu spljoštenosti funkcije raspodjele gustoće vjerojatnosti, a definira se izrazom:

$$E = \frac{M_4}{\sigma^4} \quad (5)$$

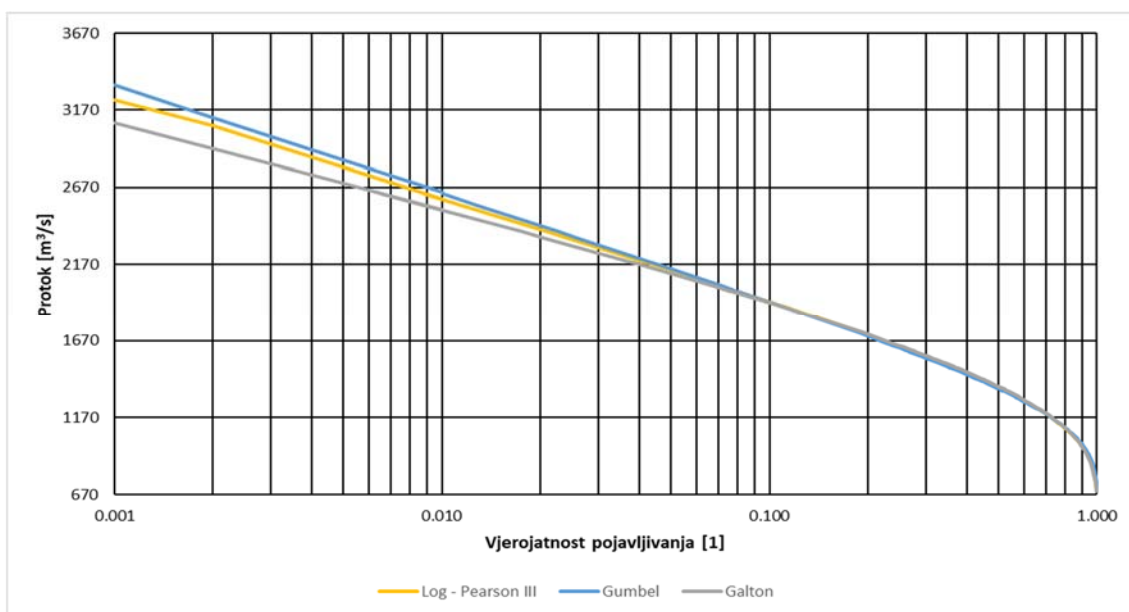
Kvaliteta prilagodbe teorijskih raspodjela vjerojatnosti na empirijske (izmjerene) podatke se može provjeriti testovima prilagodbe. Test koji će se ovdje koristiti je Smirnov – Kolmogorov test homogenosti. Teorem Smirnova kaže da ako elementi (članovi) dvaju uzoraka veličine k i l pripadaju istoj 'populaciji' (tj. ako su homogeni), tada najveća apsolutna razlika d između dvije empirijske razdiobe vjerojatnosti (za uzorak k i uzorak l) pomnožena s veličinom:

$$\sqrt{n} = \sqrt{\frac{k \cdot l}{k + l}} \quad \text{tj. } z = d \cdot \sqrt{n} \quad (6)$$

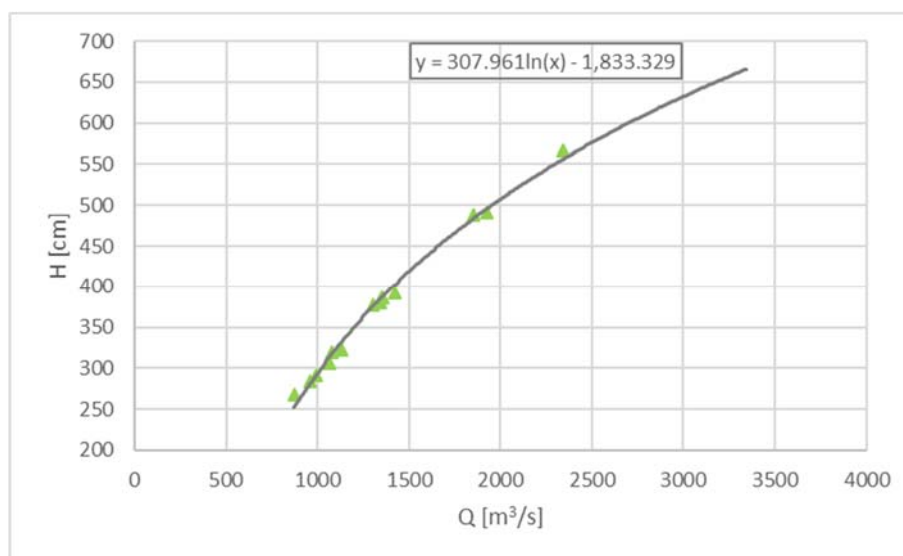
stvara slučajnu varijablu s distribucijom koja odgovara funkciji Kolmogorova $L(z)$, pod uvjetom da su k i l dovoljno veliki. Prema matematičkoj statistici za homogenost niza treba biti zadovoljen uvjet: $p = 100[1 - L(z)] \geq 5\%$

Ukoliko je $1\% < p < 5\%$ hipoteza o homogenosti je nesigurna, a za $p < 1\%$ homogenost niza nije zadovoljena. Nakon izbora najbolje teorijske funkcije raspodjele, određuju se vrijednosti za karakteristične vjerojatnosti pojave i to povratnih perioda 100, 500 i 1000 godina [31]. U nastavku će biti prikazani rezultati hidrološke analize odnosno karakteristične vjerojatnosti pojave protoka te vodostaja dobivenih iz konsumpcijske krivulje.

2.6.1 Most Botovo, Drava

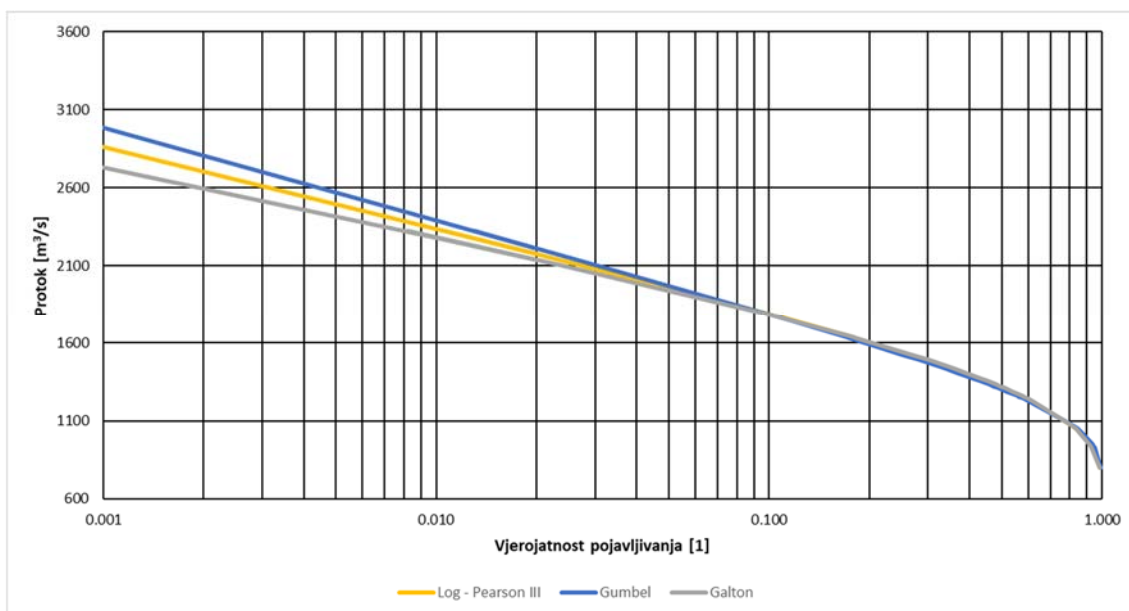


Slika 18. Grafički prikaz teorijske razdiobe vjerojatnosti za most Botovo

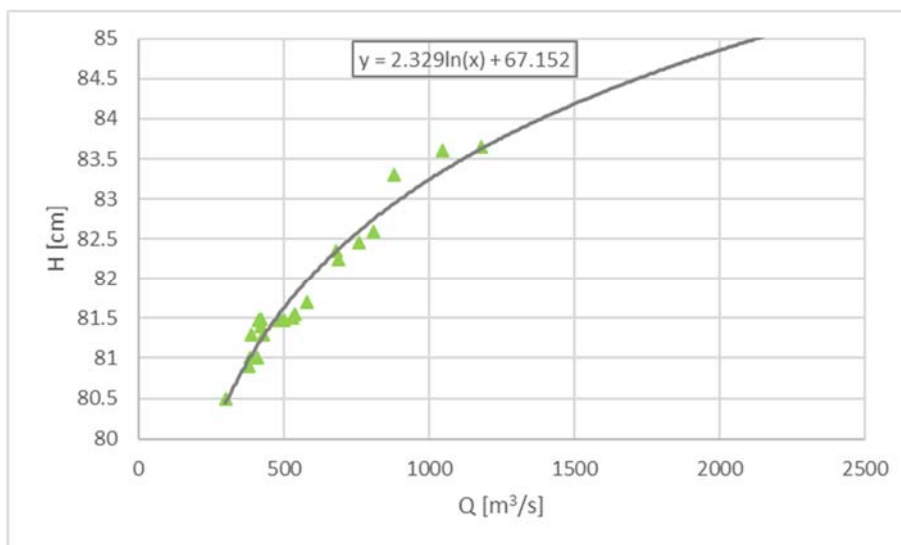


Slika 19. Konsumpcijska krivulja za most Botovo, Drava

2.6.2 Most Osijek, Drava

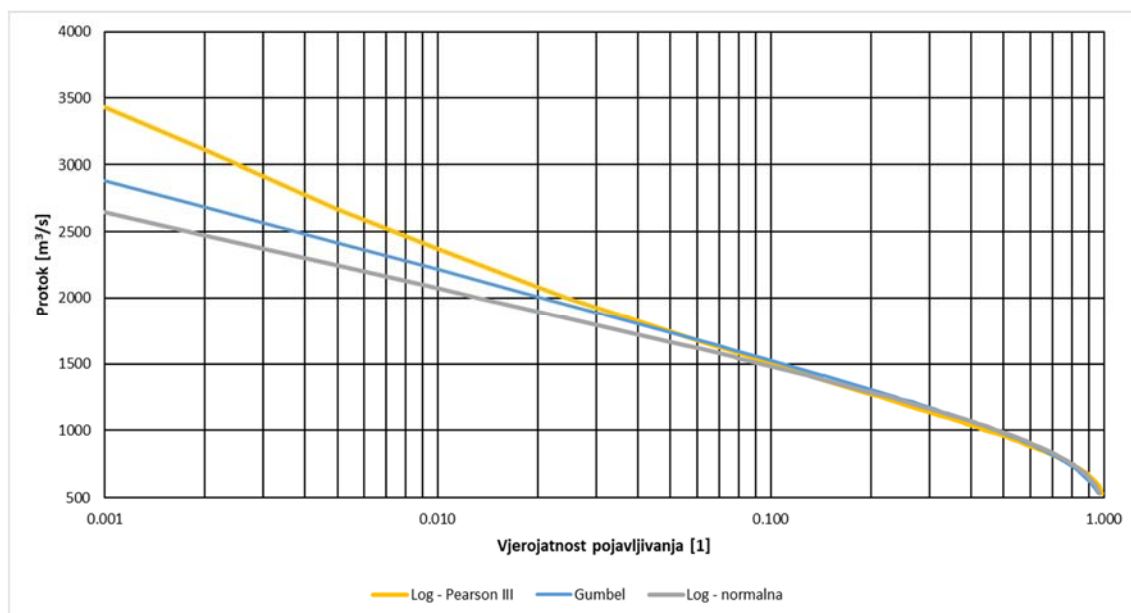


Slika 20. Grafički prikaz teorijske razdiobe vjerojatnosti za most Osijek

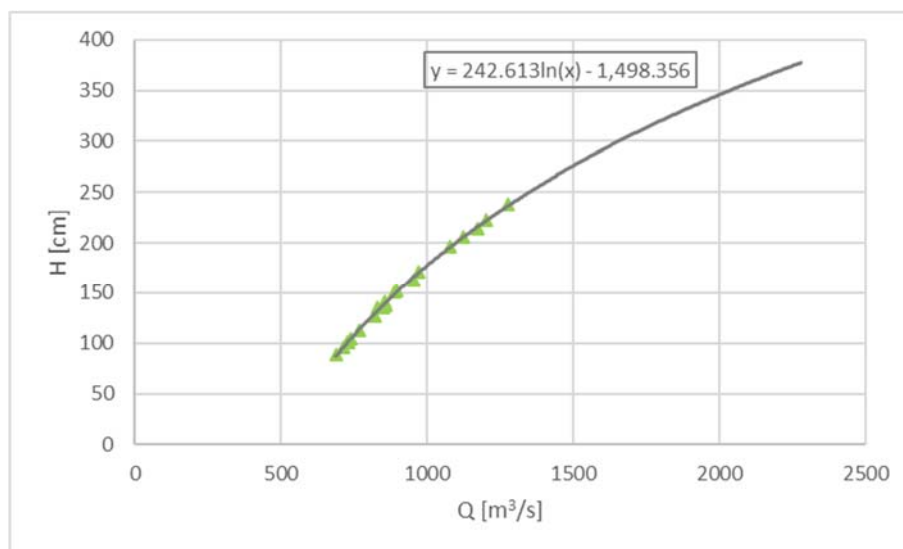


Slika 21. Konsumpcijska krivulja za most Osijek, Drava

2.6.3 Most Varaždin, Drava

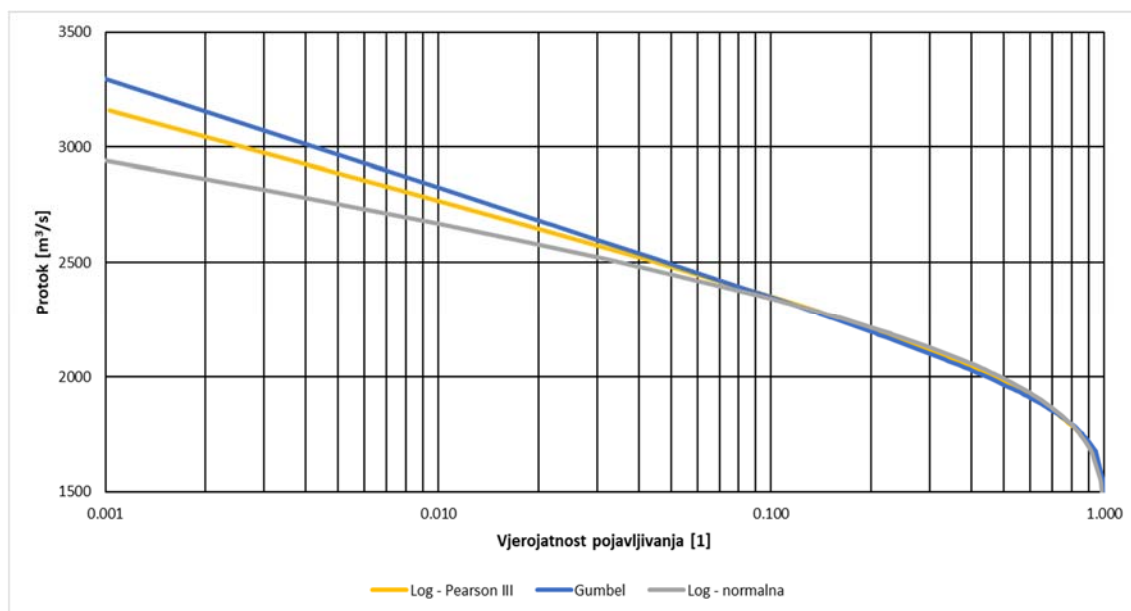


Slika 22. Grafički prikaz teorijske razdiobe vjerojatnosti za most Varaždin

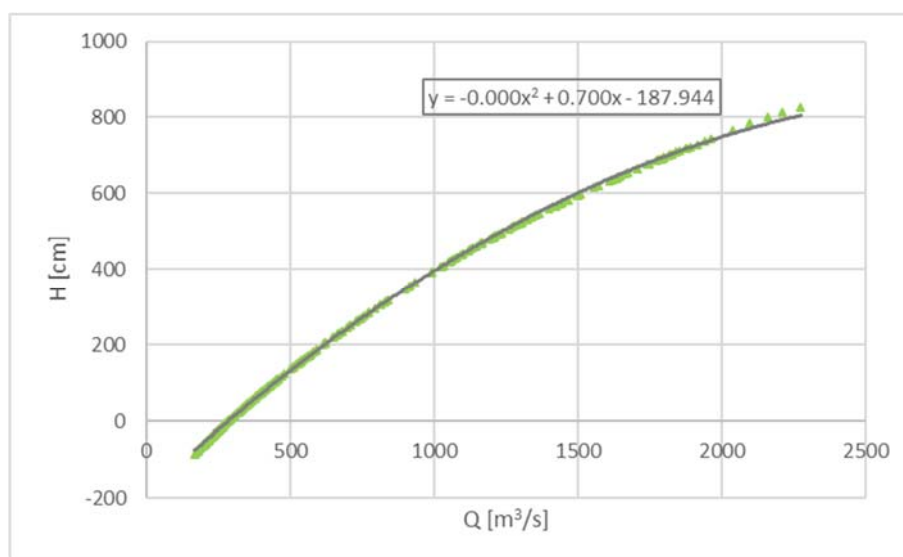


Slika 23. Konsumpcijska krivulja za most Varaždin, Drava

2.6.4 Most Jasenovac, Sava



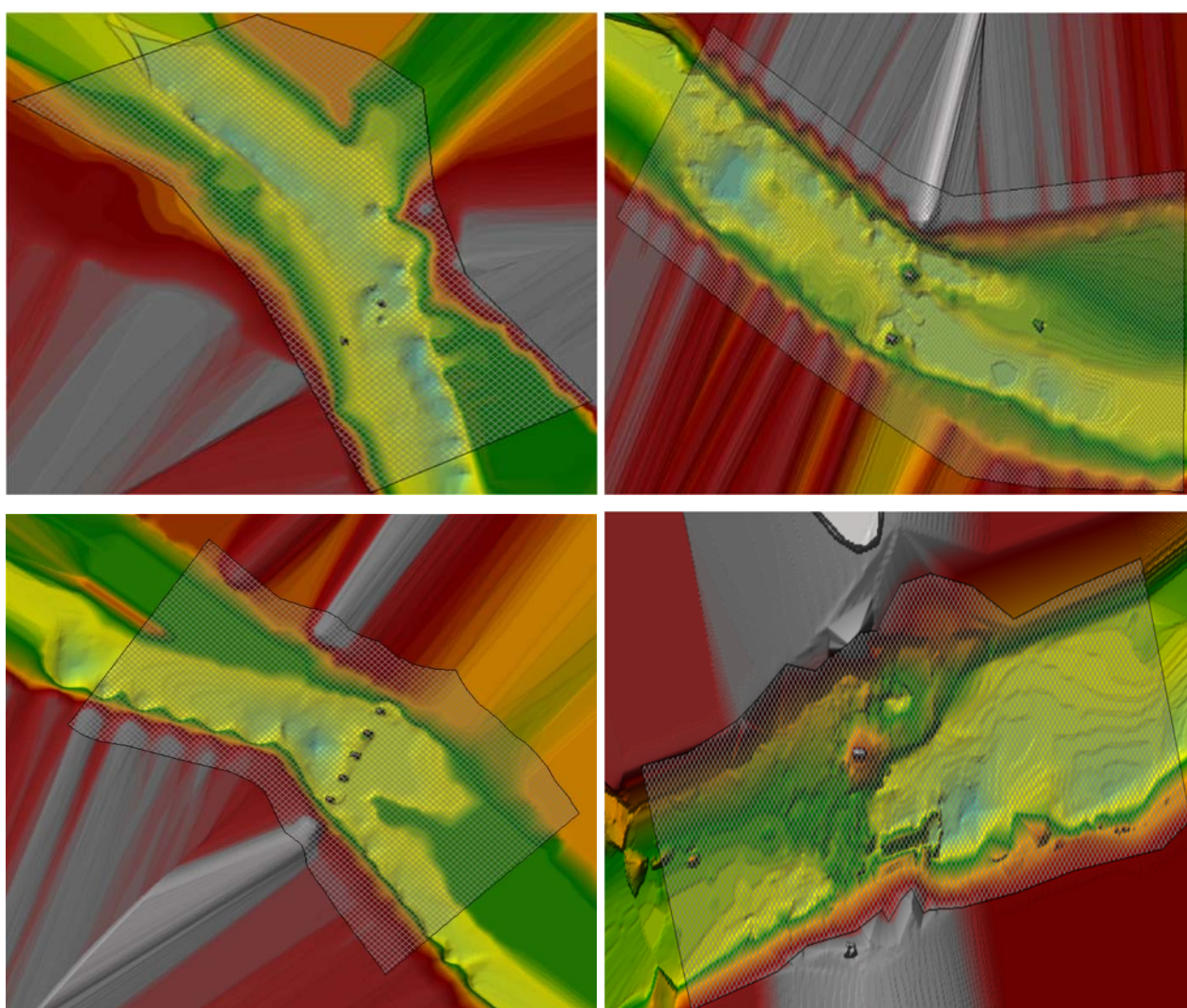
Slika 24. Grafički prikaz teorijske razdiobe vjerojatnosti



Slika 25. Konsumpcijska krivulja za most Jasenovac, Sava

2.7 Izrada numeričkog modela

Za procjenu lokacije formiranja kaverne nastale djelovanjem lokalnog podlokavanja koristit će se karakteristike polja tečenja simulirane 2D numeričkim softverom HEC – RAS. Kao ulaz u model korištena je prethodno snimljena batimetrija korita koja se unese u softver pomoću *RAS Mappera*. Nakon unosa batimetrije u softver, unutar nje je potrebno definirati domenu numeričkog modela u obliku 2D poligona. Za tako definiranu domenu potrebno je kreirati proračunsku 2D mrežu tako da se unese diskretizacijska shema s dimenzijama $dx/dy=1/1$ (slika 26) Umetnuta diskretizacijska shema izgleda kao mreža pojedinačnih kvadratića od kojih je svaki dimenzija 1/1.



Slika 26. Diskretizacijska shema za most Botovo (gore lijevo), most Osijek (gore desno), most Varaždin (dolje lijevo) i most Jasenovac (dolje desno)

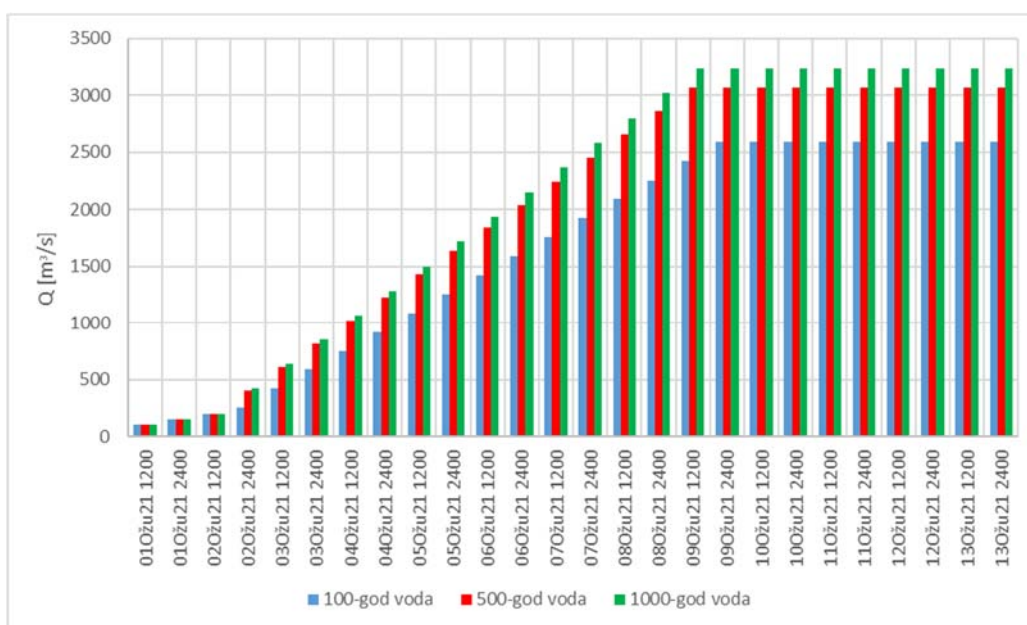
Sljedeći korak u modeliranju je određivanje granice uzvodnog i nizvodnog tečenja koje se postavljaju na rubove proračunske domene s uzvodne i nizvodne strane. Nakon uspješno dodane batimetrije, potrebno je definirati parametre nestacionarnog tečenja. Kao uzvodni rubni uvjet koristi se protok, a kao nizvodni rubni uvjet vodostaj, odnosno hidrogram i nivogram. Za uzvodni hidrogram potrebno je podatke koji se koriste prilagoditi zabilježenim vrijednostima u stvarnosti (sati ili dani). Hrapavost se unosi na temelju geomehaničkih podloga iz kojih se pomoću granulometrijske krivulje odrede karakteristične veličine sastava dna korita. Nakon što je sve potrebno uneseno, proveden je hidraulički proračun tečenja te se za simulacije odabire isto ili kraće vrijeme i inkrement vremena kao i ono ulaznog hidrograma. Nakon provedene simulacije u softveru, rezultati se mogu promatrati direktno u softveru ili se mogu izvesti kao tablice, slike ili animacije. Za rezultate tečenja moguće je odabrati napredovanje tečenja, brzinu tečenja, dubinu vode, razinu vode, itd.

2.8 Provedba simulacija

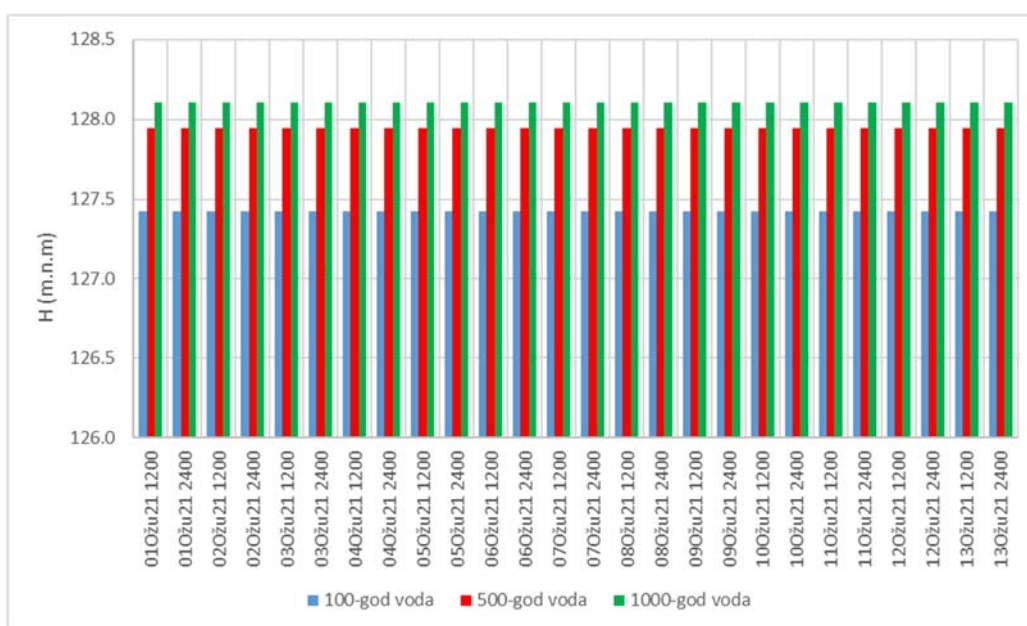
Način provedbe simulacije u softverskom paketu HEC – RAS opisan je u poglavlju 4.3. Hidrološki događaji za koje se provodila simulacija su velike vode povratnog perioda (PR) od 100, 500 i 1000 godina te srednja voda. Protoci za navedene događaje su dobiveni iz hidrološke analize metodom godišnjih ekstrema te teorijskim razdiobama vjerojatnosti. Vodostaj za određeni povratni period je dobiven iz konsumpcijske krivulje koja je konstruirana na temelju podataka iz javno dostupne baze *Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ)*. Uvjeti pod kojima se provodila simulacija za svaki most su detaljnije prikazani u nastavci.

2.8.1 Most Botovo, Drava

Simulacija se provodila u uvjetima nestacionarnog tečenja u trajanju od 13 dana. Uzvodni rubni uvjet modela je hidrogram, a nizvodni nivogram, čiji podatci su dobiveni iz Q-H krivulje pomoću logaritamske jednadžbe za povratne periode od: 100, 500 i 1000 godina. Proračunski interval iznosi 3 sekunde, a interval rezultata hidrograma iznosi 12 sati. Postepenim porastom protoka u uzvodnom rubnom uvjetu, dobivena je stabilnost modela.



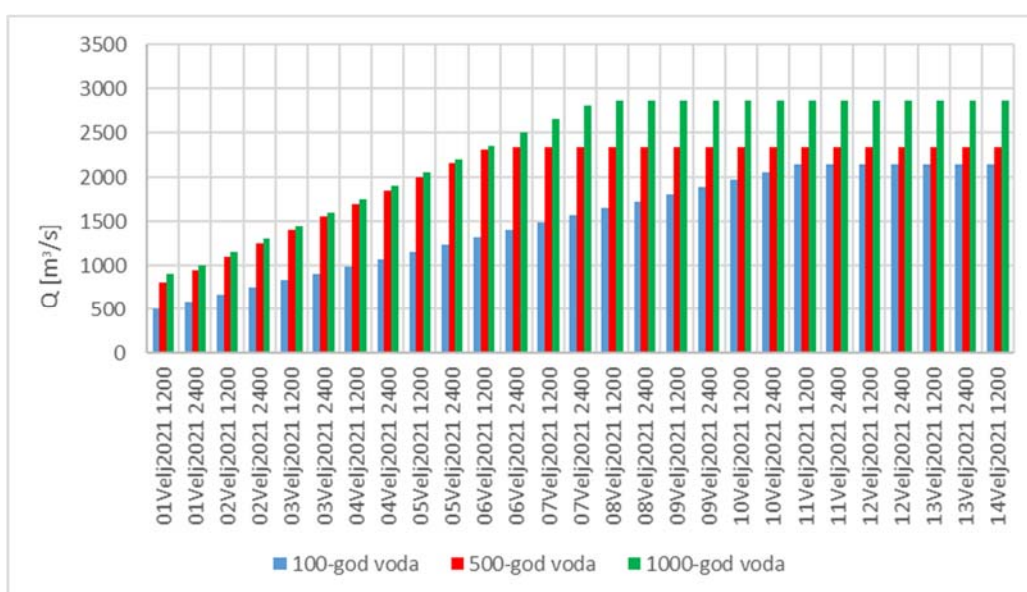
Slika 27. Uzvodni rubni uvjet za most Botovo, Drava



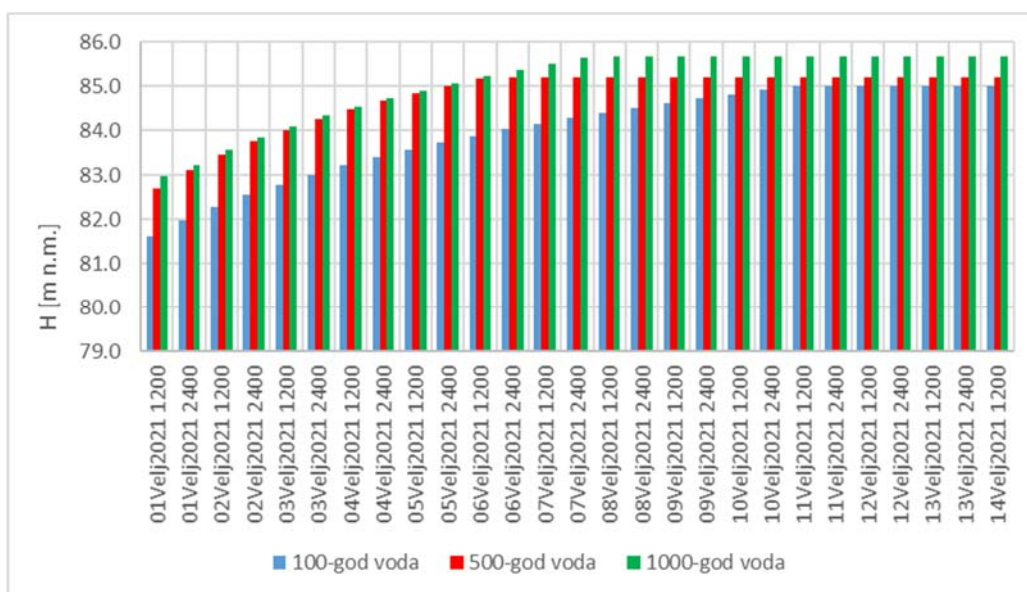
Slika 28. Nizvodni rubni uvjet za most Botovo, Drava

2.8.2 Most Osijek, Drava

Kako bi se opisale značajke granice modela, zadan je uzvodni rubni uvjet u obliku protoka, te nizvodni u obliku vodostaja dobiven iz konsumpcijske krivulje na temelju logaritamske jednadžbe. Vrijeme ulaznog hidrograma je jednako kao i za nizvodni nivogram, te je njima određeno trajanje simulacije od 14 dana, kako bi se osiguralo dovoljno trajanje simulacije do dostizanja stacionarnih uvjeta za ulazni hidrološki događaj. Proračunski interval iznosi 1 minutu, a interval rezultata hidrograma iznosi 1 sat. Pomoću dovoljno dugog vremena simulacije i progresivnim rastom protoka i vodostaja dobiven je stabilan model.



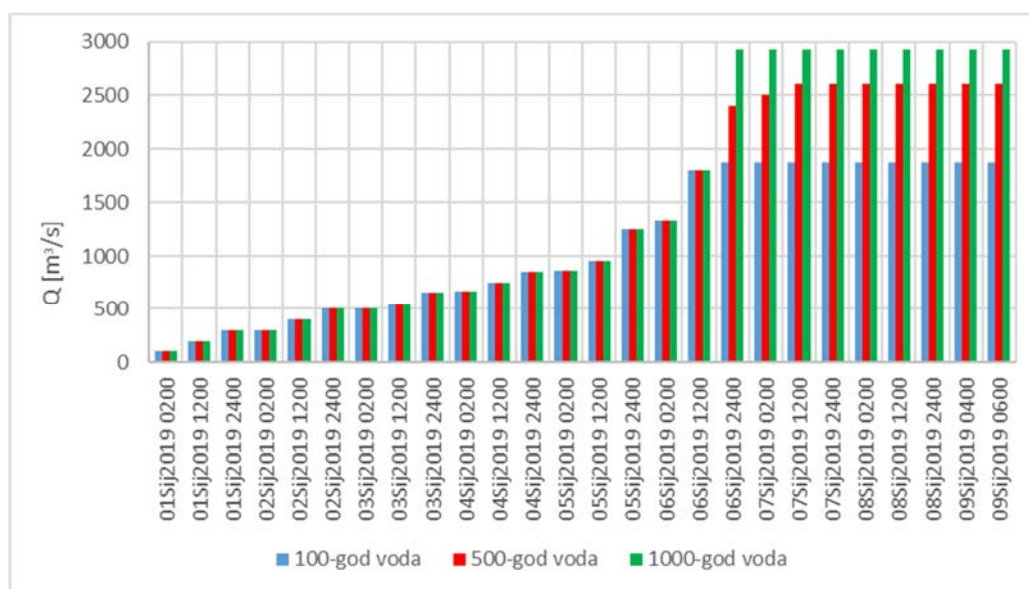
Slika 29. Uzvodni rubni uvjet za most Osijek, Drava



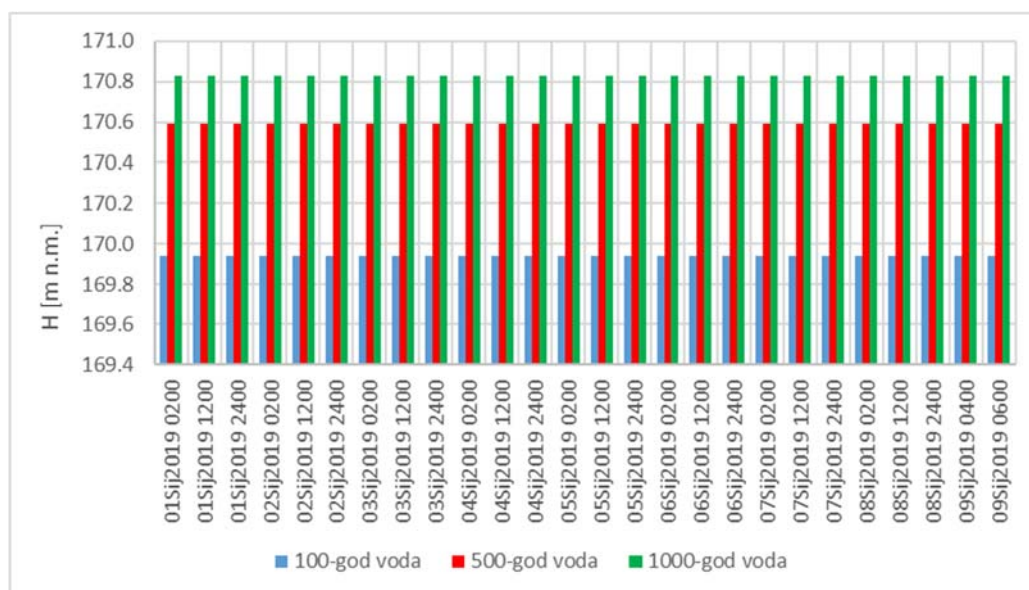
Slika 30. Nizvodni rubni uvjet za most Osijek, Drava

2.8.3 Most Varaždin, Drava

Simulacija se za sva tri hidrološka događaja povratnih perioda 100, 500 i 1000 godina provodila u uvjetima nestacionarnog tečenja. Vrijeme simulacije je period od 9 dana kako bi se postigla stacionarnost uvjeta za ulazni hidrološki događaj. Proračunski interval iznosi 10 sekundi, a interval rezultata hidrograma iznosi 1 dan. Uzvodni rubni uvjet podijeljen je na dva dijela: jedan rubni uvjet je odvodni kanal hidroelektrane za koji je zadan konstantni protok od 500 m³/s, a drugi rubni uvjet je Stara Drava za koji je zadan protok dobiven hidrološkom analizom umanjen za protok kroz dovodni kanal. U oba rubna uvjeta primijenjeno je postepeno povećanje protoka radi stabilnosti modela.



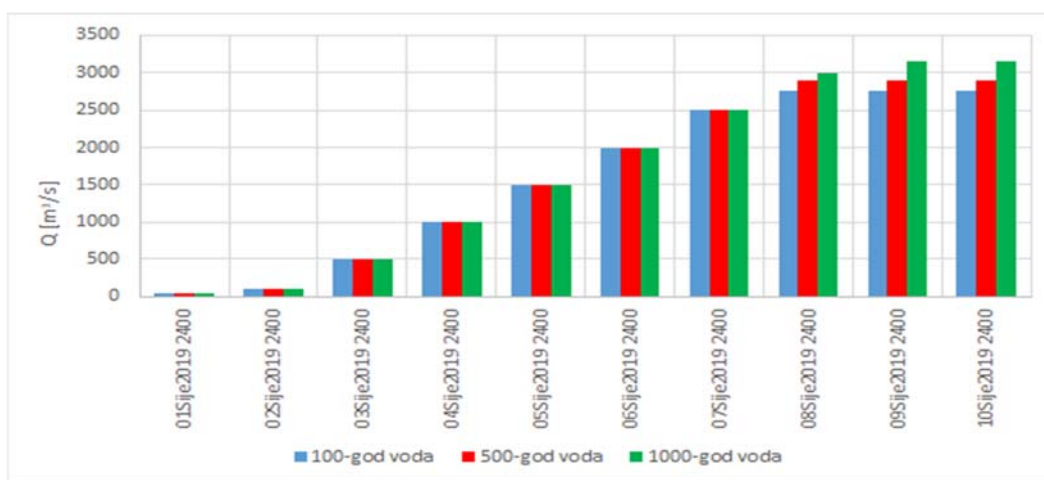
Slika 31. Uzvodni rubni uvjet za most Varaždin, Drava



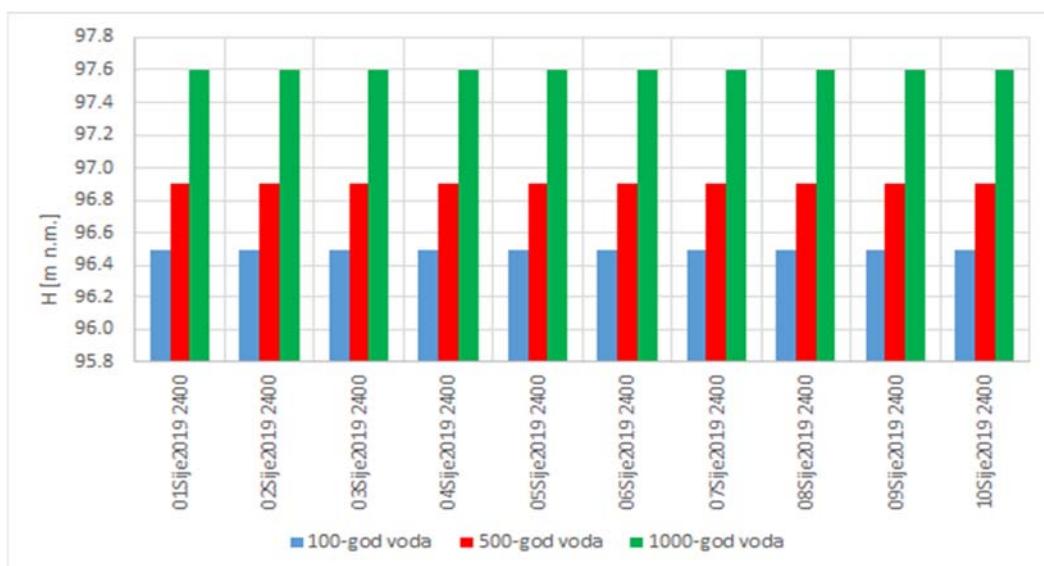
Slika 32. Nizvodni rubni uvjet za most Varaždin, Drava

2.8.4 Most Jasenovac, Sava

Simulacija se za navedeni most provodi također u uvjetima nestacionarnog tečenja. Vrijeme simulacije je period od 10 dana. Simulacija se provodi za hidrološke događaje povratnih razdoblja 100, 500 i 1000 godina. Rubni uvjeti podijeljeni su na dva dijela: uzvodni i nizvodni. Kao uzvodni rubni uvjet korišteni su pripadni protoci za određeno povratno razdoblje. Radi postizanja boljih rezultata simulacije protoci postepeno rastu od malih vrijednosti do zadanih vrijednosti u vremenu od 10 dana. Za nizvodni rubni uvjet korišten je nivogram koji je kroz svih 10 dana konstantan. Proračunski interval simulacije iznosi 10 sekundi, a interval rezultata iznosi 1 dan.



Slika 33. Uzvodni rubni uvjet za most Jasenovac, Sava

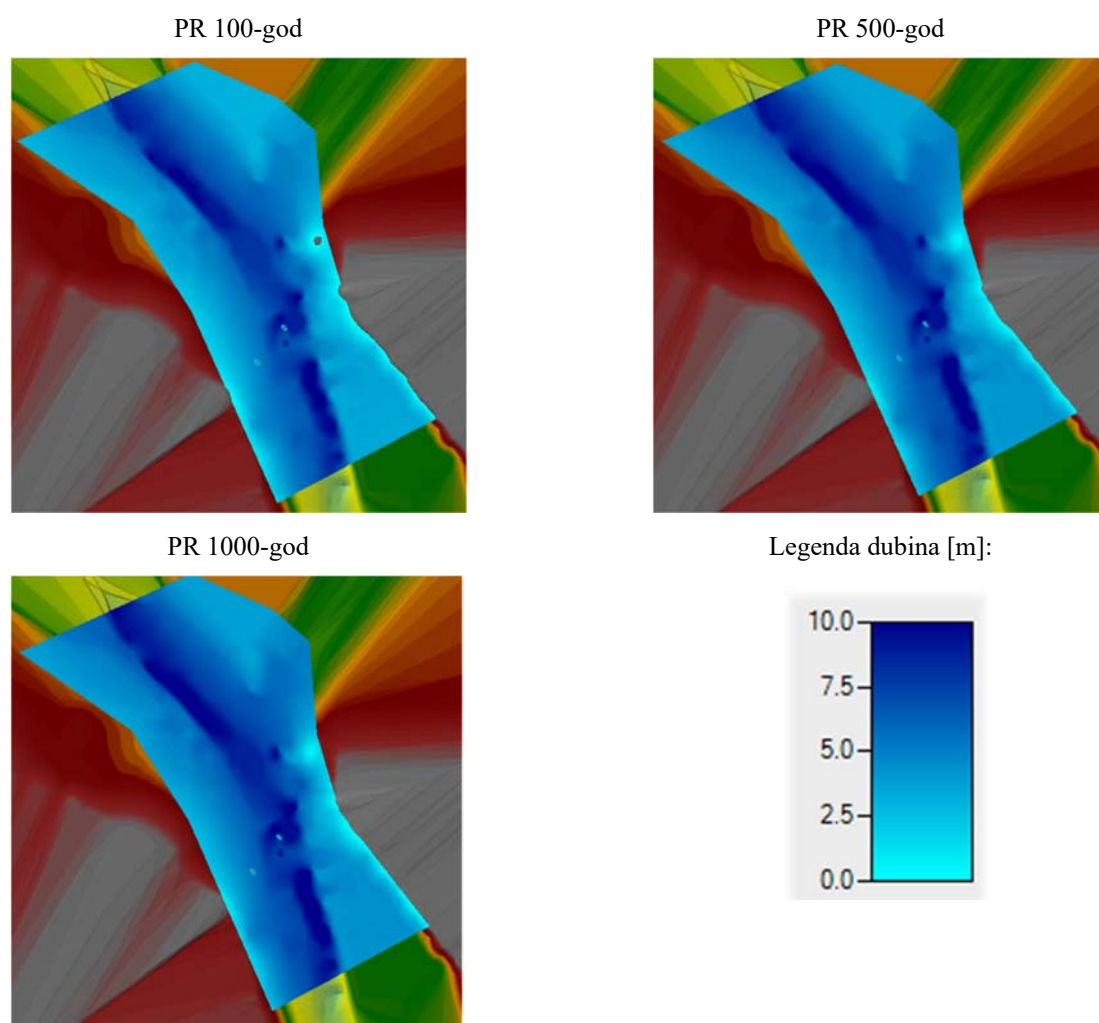


Slika 34. Nizvodni rubni uvjet za most Jasenovac, Sava

3 REZULTATI I RASPRAVA

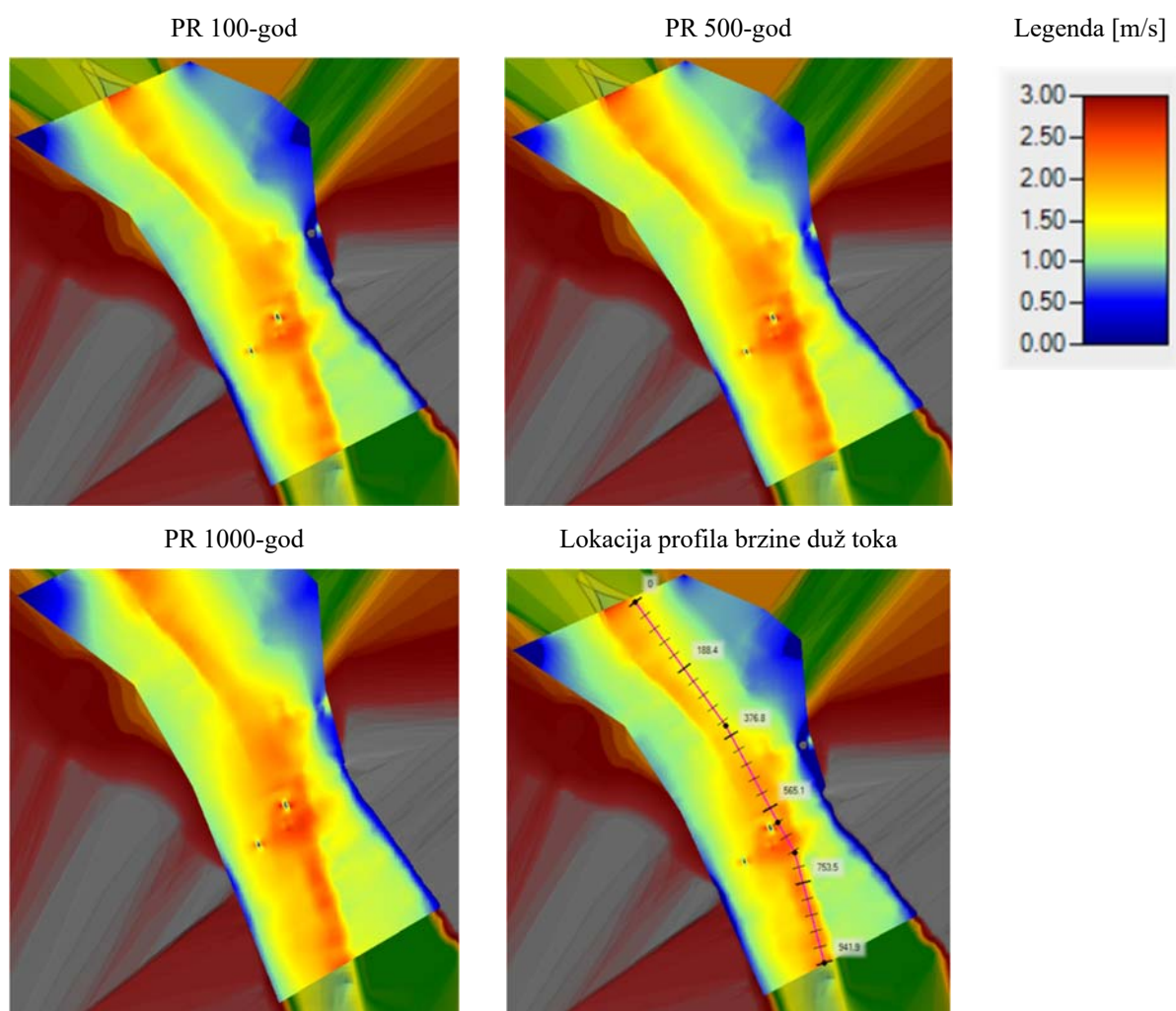
3.1 Most Botovo, Drava

Most Drava Botovo nalazi se u relativno dugačkoj riječnoj krivini koju ne prelazi okomito na obale - otklon stupova od smjera tečenja je relativno velik, $\theta = 28^\circ$. Lijevi stup mosta (S1) smješten je u dubljem dijelu korita uz lijevu obalu, dok je desni stup mosta (S2) smješten na sprud formiran uz desnu obalu. U nastavku je prikazano polje dubina dobiveno numeričkim simulacijama za karakteristične hidrološke događaje. Vidljivo je da se most nalazi u tjemenu krivine gdje talveg korita luta s desne na lijevu obalu, pri čemu je dubina oko stupa S2 znatno manja nego li oko stupa S1. Dubina toka je na mjestu talvega u rasponu od 9,96 m pri 100-god vodi do 10,29 m pri 1000-god vodi (slika 35).



Slika 35. Prikaz dubina na domeni numeričkog modela za most Botovo, Drava

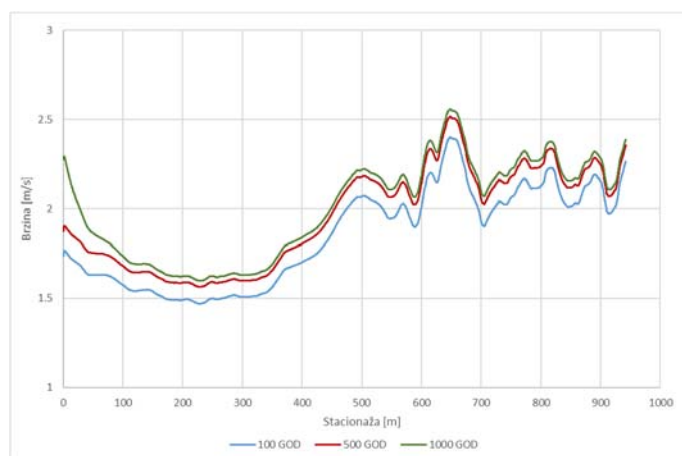
Zbog položaja stupa S1 uz konkavnu obalu, oko njega se stvara maksimalna brzina toka pri cijelom rasponu hidroloških događaja. Najveća brzina toka evidentirana je neposredno nizvodno od stupa S1, na mjestu kontrakcije toka uslijed izvedbe zaštite od podlokavanja. Brzina toka je na mjestu maksimalne brzine izračunana u rasponu od 2,40 m/s pri 100-god vodi do 2,56 m/s pri 1000-god vodi. Polje povećane brzine vidljivo je i u sjeni stupa, pri čemu pogoduje produbljivanju korita i nastanku kaverne (slika 36). Nizvodno od mosta brzina toka se smanjuje s manjim oscilacijama, pri čemu je položaj matice toka koncentriran uz lijevu obalu. Uz stup S2 nema vidljive pojave kaverne, a tome pogoduje njegov položaj uz konveksnu obalu rijeke Drave.



Slika 36. Prikaz polja brzine na domeni numeričkog modela za most Botovo, Drava

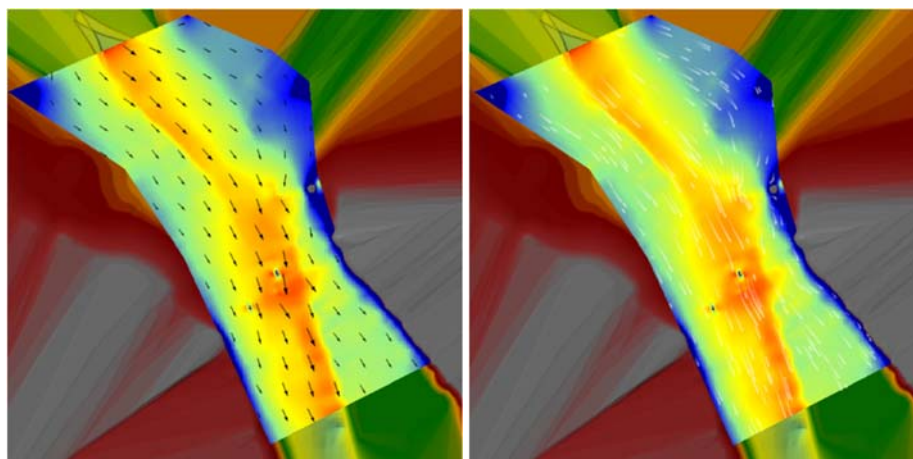
Za analizu utjecaja promjena u polju brzine zbog izgradnje stupova mosta u koritu na nastanak kaverne odabran je uzdužni profil brzine toka kroz maticu toka, koji istovremeno prolazi i kroz kavernu nastalu podlokavanjem (slika 37). Iz uzdužnog profila brzina vidljivo je da je brzina toka u matici na prilazu mostu relativno velika ($>1,5$ m/s) i ujednačena. Na udaljenosti od 100 m uzvodno

od mosta dolazi do postupnog ubrzanja toka koje ima dva vrhunca, jedan u mostovskom profilu ($>2,2$ m/s) i drugi koji kulminira neposredno nizvodno od mostovskog profila ($>2,4$ m/s). Nizvodno dolazi do opadanja brzine toka, no brzine su značajno veće nego li na dionici uzvodno od toka (>2 m/s). Vidljivo je da u matici toka nema značajne razlike u trendu između pojedinih analiziranih hidroloških događaja, već samo u intenzitetu brzine toka koja se povećava s povratnim razdobljem analiziranog hidrološkog događaja.



Slika 37. Uzdužni profil brzine duž toka za most Botovo, Drava

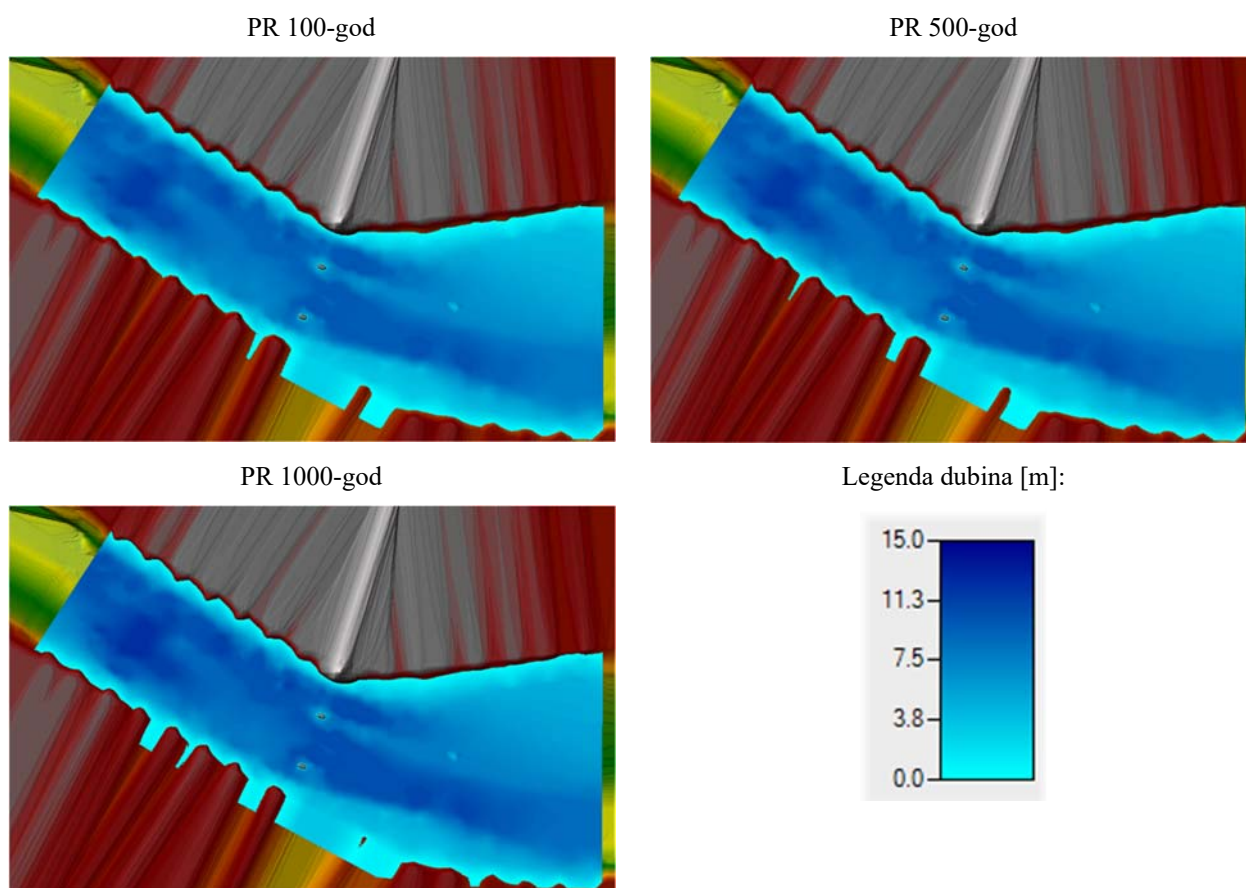
Na slici u nastavku (*slika 38*) prikazano je polje brzine za PR 1000-g s naznačenim vektorima srednje brzine toka po dubini i strujnicama. Vidljivo je da na lijevoj obali uzvodno od mosta postoji lokalno proširenje korita koje se aktivira kod velikih voda i djeluje kao deflektor toka. Strujnice ulaze u ovu mirnu zonu, u njoj mijenjaju smjer i odbijaju se nizvodno prema mostu, pri čemu ulaze direktno u sjenu stupa i utječu na povećanje brzine u sjeni. Ova morfološka karakteristika nije karakteristična za mostovsku hidrauliku i remeti projektno polje tečenja.



Slika 38. Prikaz vektora brzina (lijevo) i strujnica (desno) za most Botovo, Drava

3.2 Most Osijek, Drava

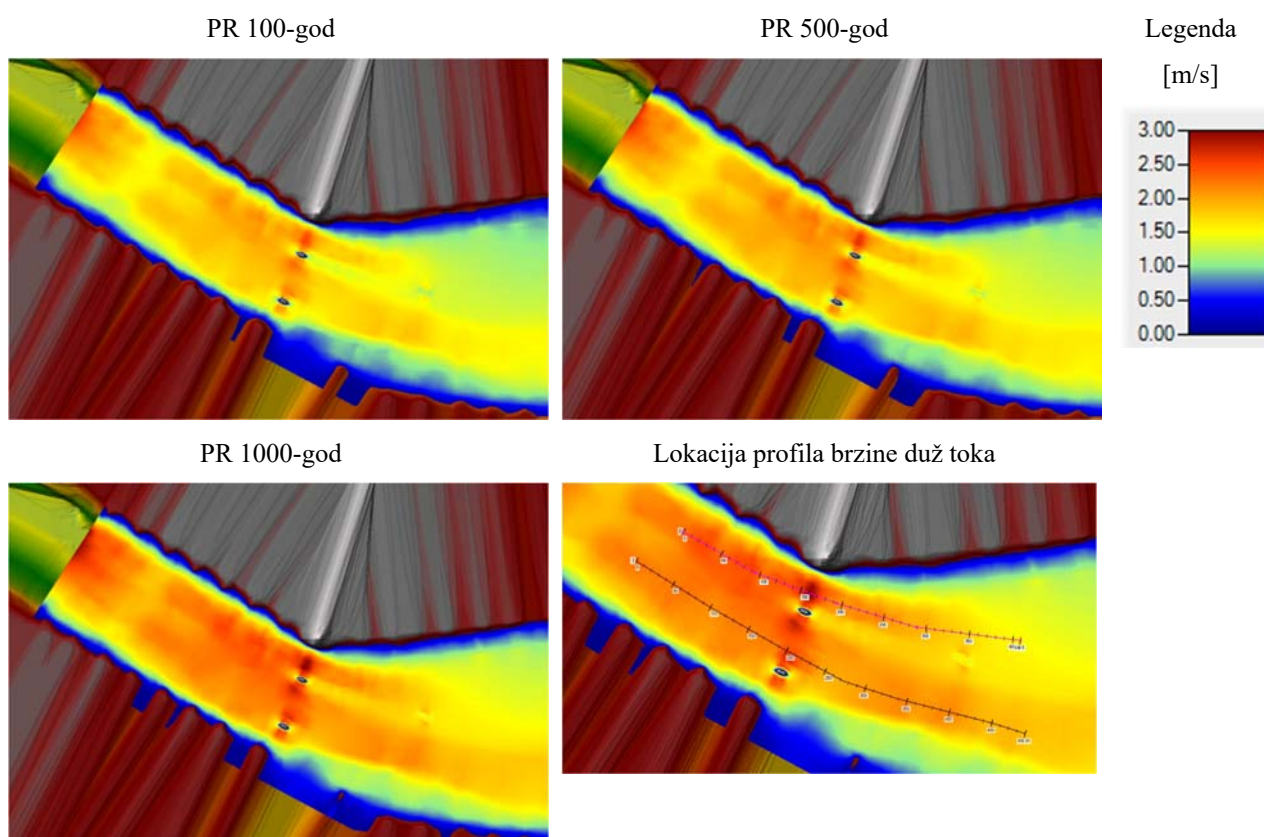
Most Drava Osijek nalazi se na kraju ravne riječne dionice koja prelazi u lijevu krivinu neposredno nizvodno od mosta. Most rijeku prelazi gotovo okomito na obale, odnosno otklon stupova mosta od glavnog smjera tečenja je relativno mali, $\theta = 5^\circ$. Morfologija korita u okolici mosta je pod utjecajem relativno kratke ravne dionice – talveg toka je smješten uz lijevu obalu na dionici uzvodno od mosta, a uz desnu obalu na dionici nizvodno od mosta (slika 39). Lijevi stup mosta (S1) i desni stup mosta (S2) smješteni su na jednakim dubinama korita U nastavku je prikazano polje dubina dobiveno numeričkim simulacijama za karakteristične hidrološke događaje. Vidljivo je da su najveće dubine korita nizvodno od mosta, uz desnu obalu gdje počinje konkavni dio krivine. Uz lijevu obalu formiran je sprud koji počinje u samom mostovskom profilu. Dubina toka je na mjestu talvega u rasponu od 11,54 m pri 100-god vodi do 12,32 m pri 1000-god vodi.



Slika 39. Prikaz dubina na domeni numeričkog modela za most Osijek, Drava

Iz polja brzine toka (slika 40) vidljivo je da brzina toka raste s približavanjem mostu i da je brzina toka najveća upravo u mostovskom profilu. Nizvodno od mosta dolazi do koncentracije toka uz

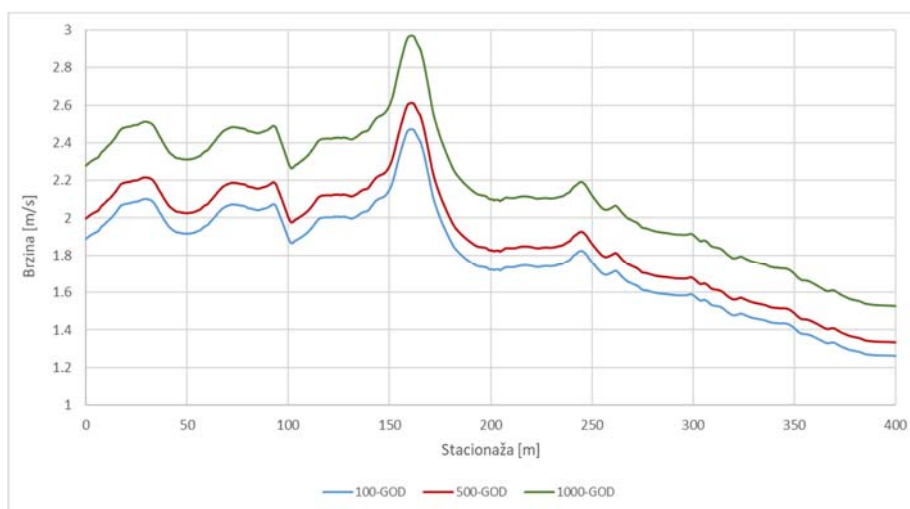
desnu, konkavnu, obalu. Iako je stup S1 smješten uz konveksnu obalu, oko njega se stvaraju neznatno veće brzine toka nego li uz stup S2 jer se nalazi u području najvećih dubina pod utjecajem ravne dionice uzvodno. Najveća brzina toka u mostovskom profilu javlja se pod utjecajem kontrakcije toka uslijed izvedbe zaštite od podlokavanja. Brzina toka je na mjestu maksimalne brzine izračunana je u rasponu od 2,50 m/s pri 100-god vodi do 2,98 m/s pri 1000-god vodi, uz stup S1. U sjeni oba stupa vidljivo je naglo lokalno smanjenje brzine toka. Kaverne nastale podlokavanjem nalaze se u ovom području smanjenih brzina toka u sjeni stupova. Nizvodno od mosta brzina toka se smanjuje s povećanjem udaljenosti od mosta.



Slika 40. Prikaz polja brzine na domeni numeričkog modela za most Osijek, Drava

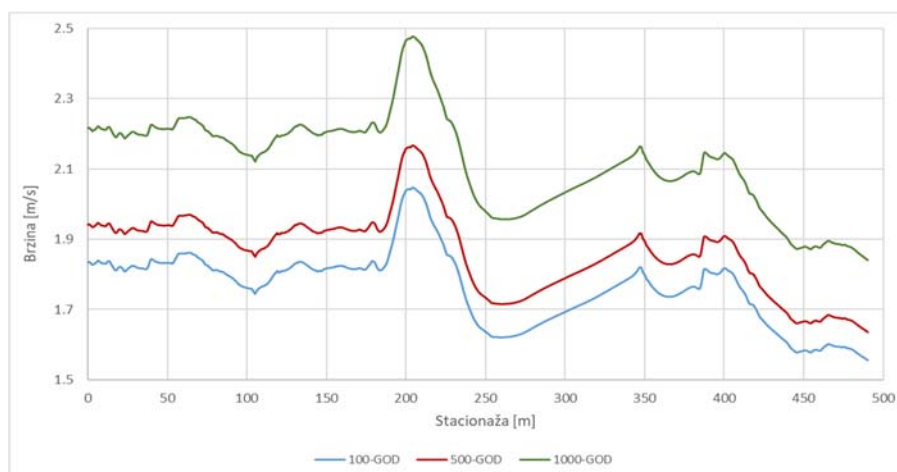
Za analizu utjecaja promjena u polju brzine zbog izgradnje stupova mosta u koritu na nastanak kaverne odabrana su dva uzdužna profila brzine toka: Profil uz lijevu obalu korita koji prolazi kroz kavernu nastalu podlokavanjem oko stupa S1 (*slika 41*) i profil toka kroz maticu toka, koji istovremeno prolazi i kroz kavernu nastalu podlokavanjem oko stupa S2 (*slika 42*). Iz uzdužnog profila brzine vidljivo je da je brzina toka uz lijevu obalu na prilazu mostu relativno velika ($>1,9$ m/s) i ujednačena. U mostovskom profilu dolazi do naglog ubrzanja toka ($>2,4$ m/s). Nizvodno dolazi do

postupnog opadanja brzine toka, uz brzine značajno niže nego li na dionici uzvodno od toka ($>2,1$ m/s).



Slika 41. Uzdužni profil brzine duž toka uz lijevu obalu za most Osijek, Drava

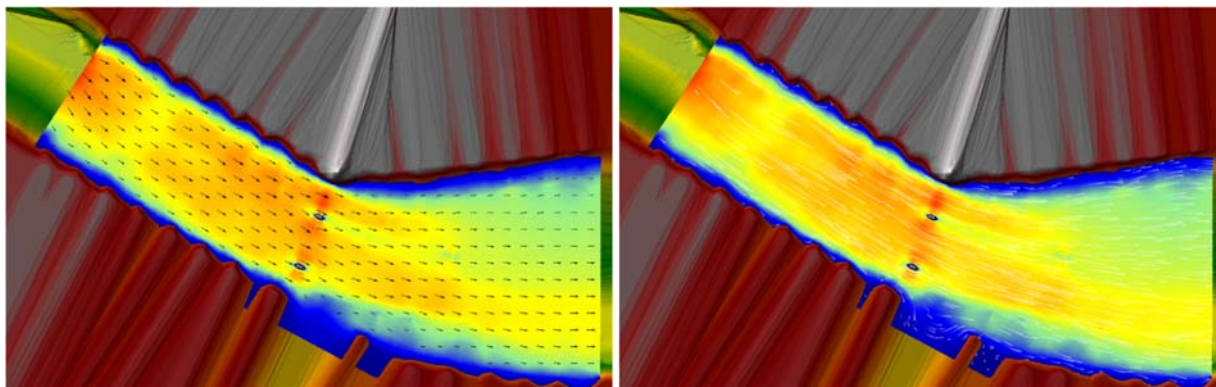
Iz uzdužnog profila brzine u matici toka vidljivo je da je brzina toka uz lijevu obalu na prilazu mostu slična onoj uz lijevu obalu ($>1,8$ m/s) i ujednačena. U mostovskom profilu dolazi do naglog ubrzanja toka ($>2,0$ m/s). Nizvodno dolazi do naglog opadanja brzine toka u sjeni stupa te postupnog ubrzanja na potezu 100 m duljine, nakon čega se brzina toka približava po iznosu onoj na uzvodnoj dionici ($>1,8$ m/s).



Slika 42. Uzdužni profil brzine duž toka kroz maticu za most Osijek, Drava

Na slici u nastavku prikazano je polje brzine za PR 1000-g s naznačenim vektorima srednje brzine toka po dubini i strujnicama (slika 43). Vidljivo je da ravna dionica uzvodno od mosta usmjerava tečenje prema mostovskom profilu. Nakon prolaska kroz mostovski profil ne dolazi do skretanja

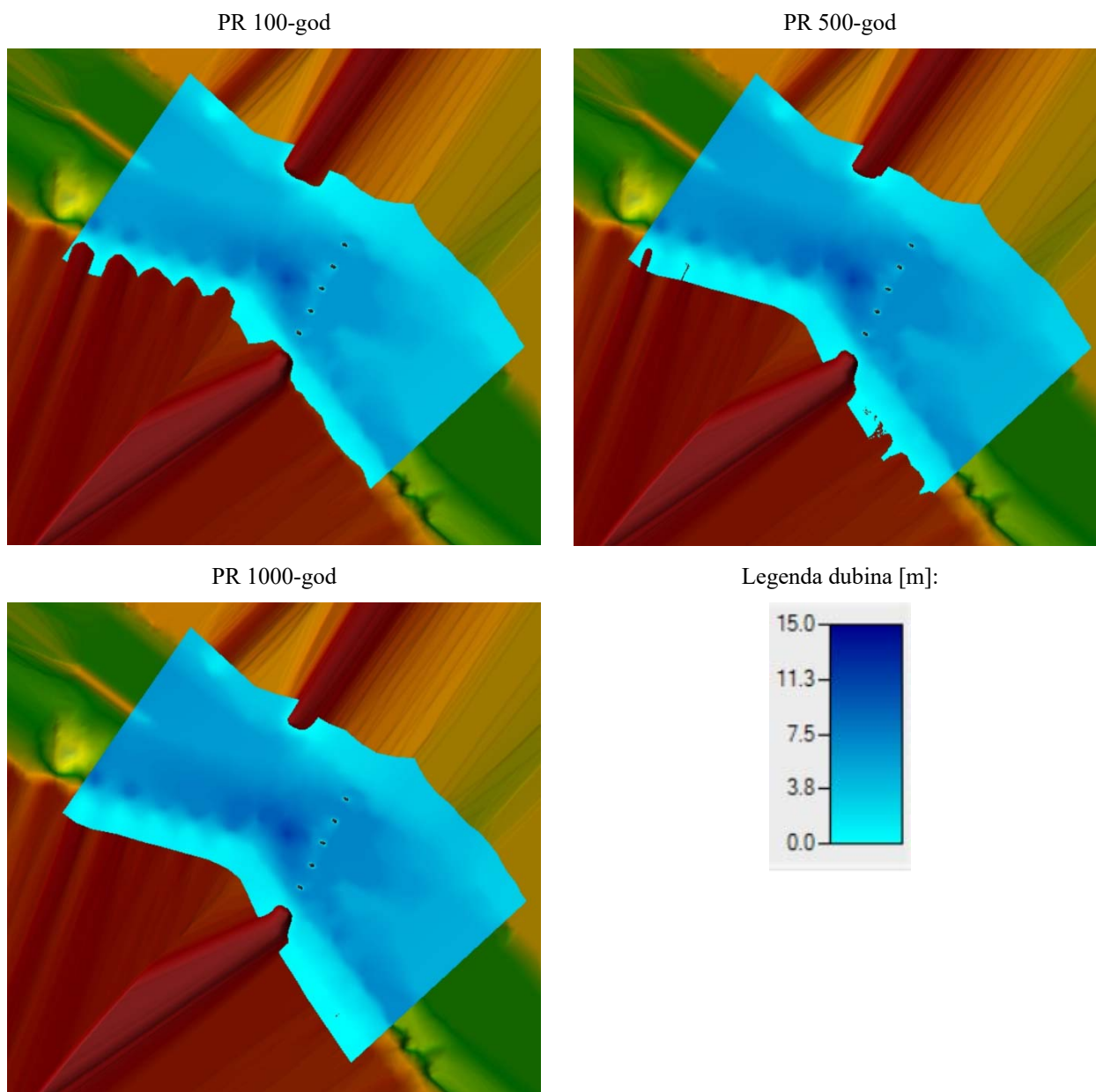
strujnica te je utjecaj mosta na glavninu toka lokalna. Vidljivo je da za oba uzdužna profila toka nema značajne razlike u trendu između pojedinih analiziranih hidroloških događaja, već samo u intenzitetu brzine toka koja se povećava s povratnim razdobljem analiziranog hidrološkog događaja.



Slika 43. Prikaz vektora brzina (lijevo) i strujnica (desno) za most Osijek, Drava

3.3 Most Varaždin, Drava

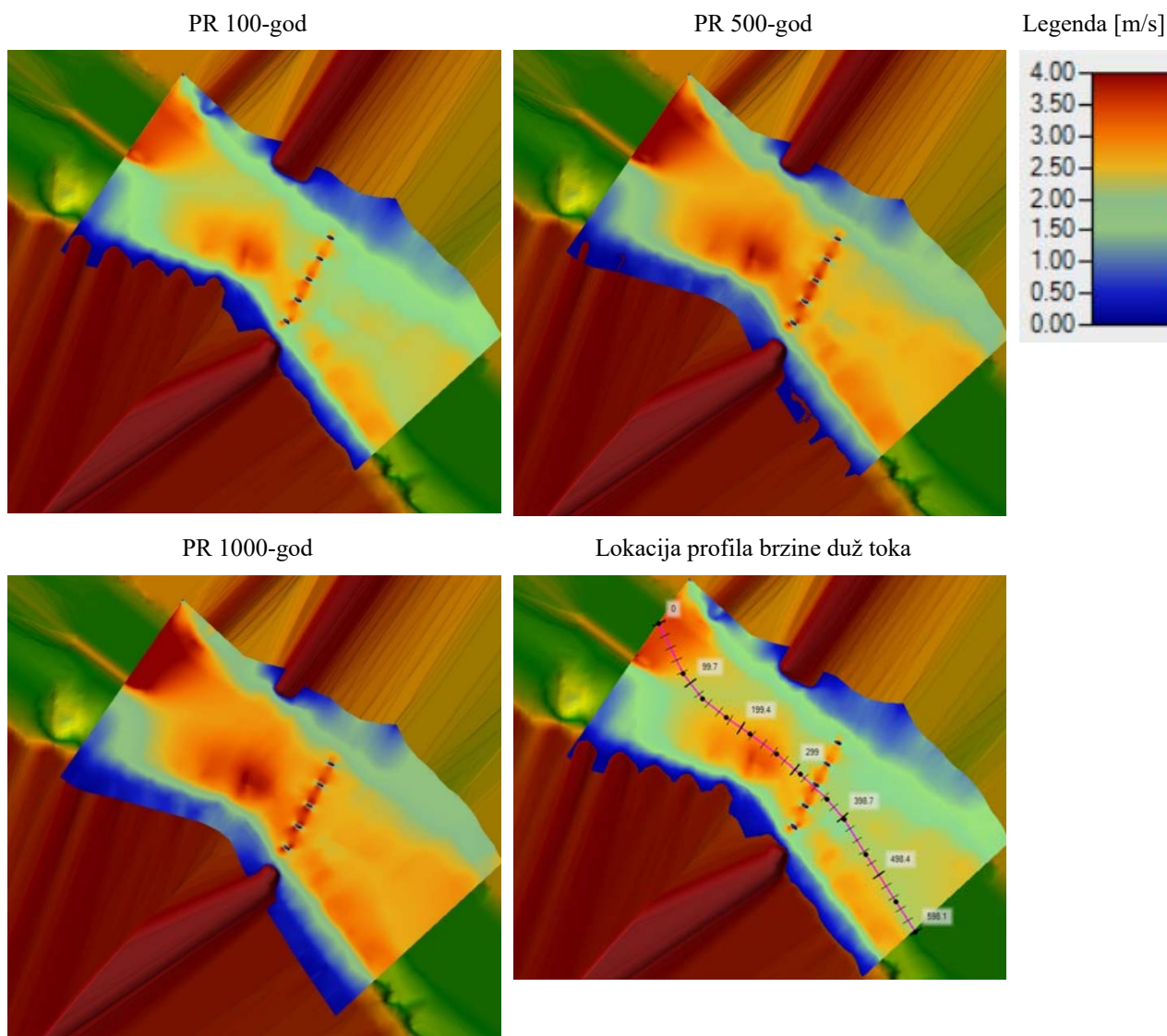
Most Drava Varaždin nalazi se u akumulaciji hidroelektrane Čakovec, Varaždinskom jezeru, u koje se istovremeno ulijeva dovodni kanal HE Varaždin i staro korito rijeke Drave. Most prugu prevodi preko jezera okomito na odvodni kanal koji se priključuje u akumulaciju neposredno uzvodno od mosta uz desnu obalu. Uzvodno uz lijevu obalu se priključuje staro korito rijeke Drave kojim se propuštaju velike vode mimo strojarnice hidroelektrane. Veći dio godine glavnina protoka u predmetnu dionicu dolazi iz odvodnog kanala hidroelektrane, što je vidljivo i na morfologiji korita u blizini mosta, odnosno dubini toka (*slika 44*). U nastavku je prikazano polje dubina dobiveno numeričkim simulacijama za karakteristične hidrološke događaje. Vidljivo je da se most nalazi na suženju formirano spojem odvodnog kanala i starog korita, što rezultira erozijom korita neposredno uzvodno od mosta i najvećim dubinama uz stupove S3, S4 i S5 (bliže desnoj obali). Dubina toka je na mjestu talvega u rasponu od 8,38 m pri 100-god vodi do 9,35 m pri 1000-god vodi. Nizvodno od mosta korito se širi u akumulacijsko jezero, što dovodi do taloženja nanosa, formiranja spruda i stvaranja plitkog korita. Talveg je smješten uz desnu obalu, formiran tečenjem iz odvodnog kanala, te on ostaje smješten uz nju i nizvodno od mosta.



Slika 44. Prikaz dubina na domeni numeričkog modela za most Varaždin, Drava

Specifičnost polja tečenja oko mosta Varaždin je to da je režim voda pod utjecajem hidroelektrane što znači da je glavčina toka odvodnim kanalom usmjerena na južni dio mosta uz desnu obalu dok je na sjevernome dijelu protočnost znatno manja u većem dijelu godine [32]. U uvjetima velikih voda, odnos protoka se mijenja, te znatno veći protok dolazi starim koritom Drave, ovisno o intenzitetu vodnog vala. Najmanje brzine uočavaju se s lijeve strane obale budući da velika voda koja dolazi iz staroga korita Drave mijenja smjer te glavčinu toka usmjerava prema desnoj strani obale (slika 45). Iz navedenoga razloga, najveće brzine se nalaze uz desnu obalu i to uz stupove S3, S4 i S5. Stupovi su mosta zaštićeni kamenim nabačajem čime je smanjen protočni profil te lokalno povećana brzina toka i turbulencija u samom mostovskom profilu [32]. U području sjene stupova uočene su najmanje

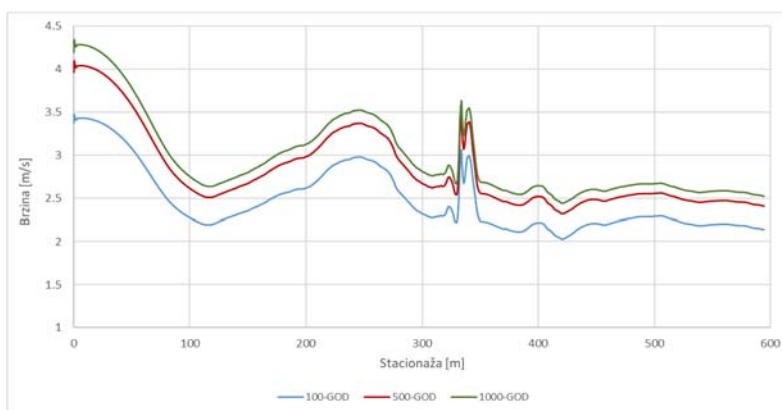
brzine toka pri svim hidrološkim događajima, nakon čega nizvodno dolazi do povećanja brzine po cijeloj domeni. Brzina toka je na mjestu maksimalne brzine izračunana u rasponu od 3,47 m/s pri 100-god vodi do 4,34 m/s pri 1000-god vodi. Matica toka nalazi se na mjestu talvega uz desnu obalu koji je uvjetovan dominantnim tečenjem u većem dijelu godine. Nizvodno od mosta položaj matice toka ostaje koncentriran uz desnu obalu, dok je uz lijevu obalu područje vrlo malih brzina toka.



Slika 45. Prikaz polja brzine na domeni numeričkog modela za most Botovo, Drava

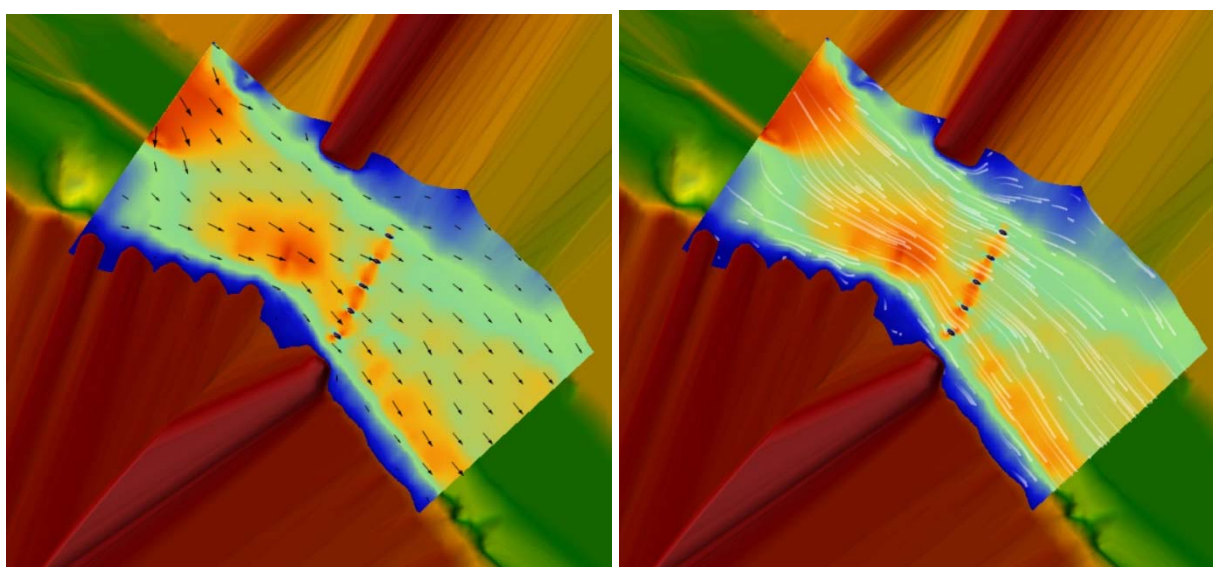
Za analizu utjecaja promjena u polju brzine zbog izgradnje stupova mosta u koritu na nastanak kaverne odabran je uzdužni profil brzine toka kroz staro korito na koje se nastavlja kroz os vodotoka (slika 46). Iz uzdužnog profila brzina se može uočiti da nagli skok brzina (oko 3 m/s) postoji na stacionaži 250 m na mjestu kaverne koja nastaje uslijed podlokavanja od cestovnog mosta koji se nalazi uzvodno od razmatranog željezničkog mosta Varaždin. Drugi nagli skok brzina se zamjećuje

u mostovskom profilu zbog kontrakcije poprečnog profila, a nizvodno od mosta brzine padaju i kreću se oko 2,3 m/s. Brzina toka opada s približavanjem mostu, što je uvjetovano proširenjem korita, zatim dolazi do naglog lokalnog skoka u mostovskom profilu te nastavlja konstantnom brzinom do kraja dionice (<2,0 m/s).



Slika 46. Uzdužni profil brzine duž toka za most Varaždin, Drava

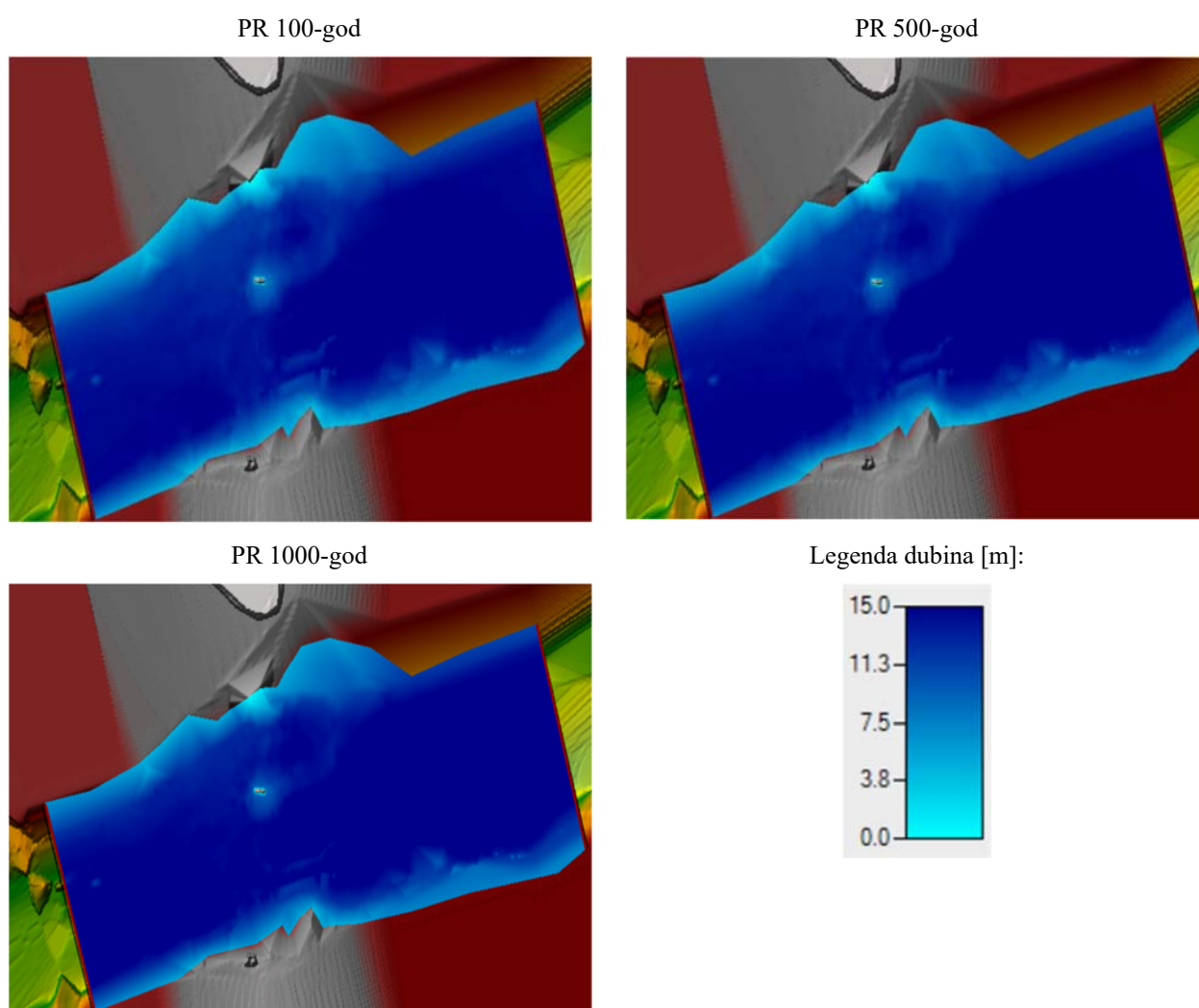
Na slici u nastavku (*slika 47*) prikazano je polje brzine za PR 1000-g s naznačenim vektorima srednje brzine toka po dubini i strujnicama. Vidljivo je da na lijevoj obali uzvodno od mosta tok koncentriran u starom koritu Drave dolazi na širi dio u blizini mosta pri čemu dolazi do skretanja toka u područje manjih brzina iz odvodnog kanala, nakon čega matica toka zauzima položaj unutar talvega. Uz lijevu obalu, između nje i stupa S1, formira se područje malih dubina koje je gotovo neaktivno. U ostatku domene su strujnice paralelne s osi korita.



Slika 47. Prikaz vektora brzina (lijevo) i strujnica (desno) za most Varaždin, Drava

3.4 Most Jasenovac, Sava

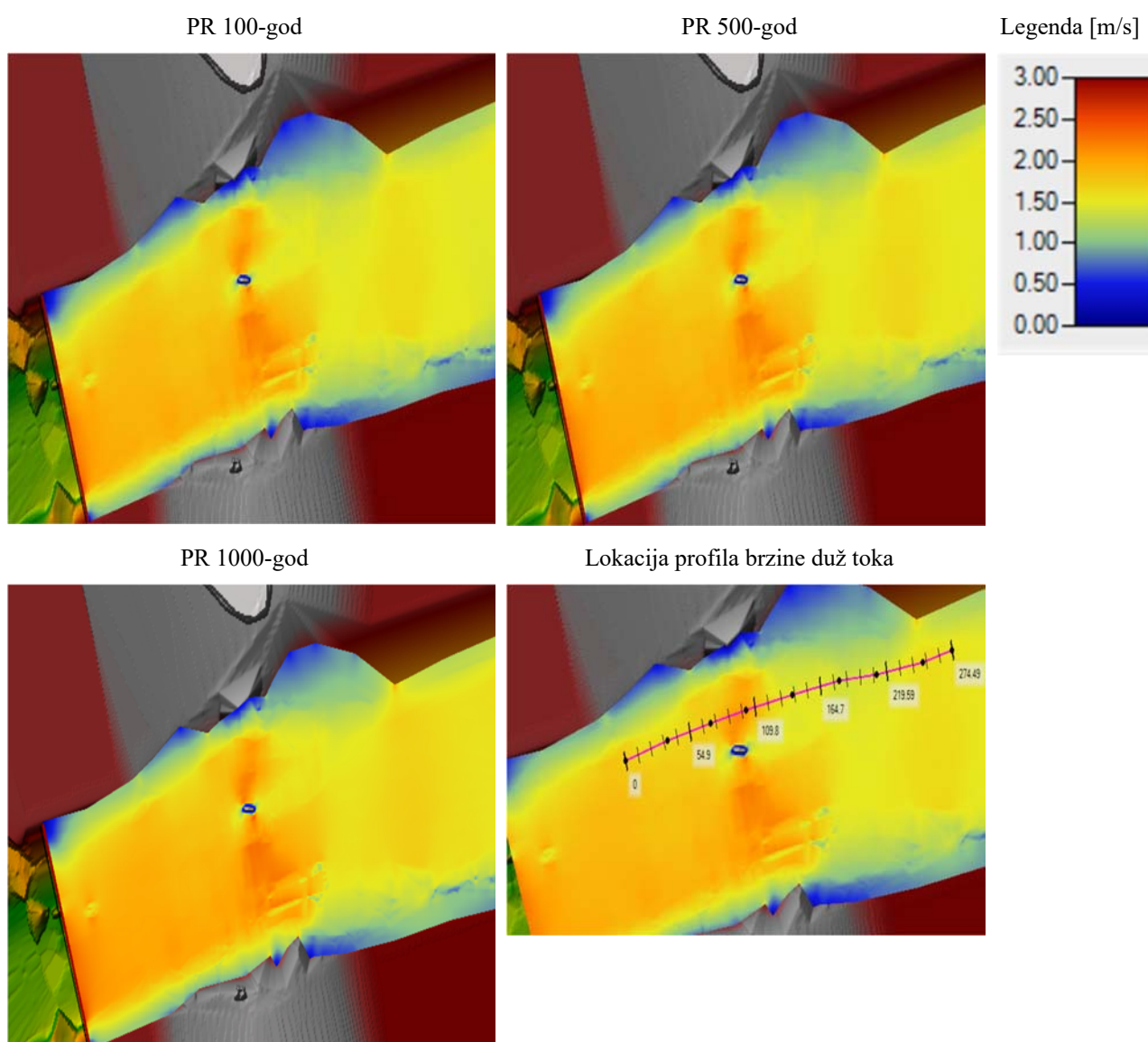
Most Sava Jasenovac nalazi se na ravnoj riječnoj dionici, no pruža se pod kutom od 10° u odnosu na pravac obala. Lijevi stup mosta smješten je na visokoj lijevoj obali, dok je desni stup mosta smješten u os vodotoka te dominira dionicom. U nastavku je prikazano polje dubina dobiveno numeričkim simulacijama za karakteristične hidrološke događaje (slika 48). Vidljivo je da se most nalazi na morfološki stabilnoj dionici korita gdje nema velikih razlika u dubini toka, pri čemu je dionica uzvodno od mosta plića od nizvodne. Dubina toka je na mjestu talvega u rasponu od 16 m pri 100-god vodi do 18,4 m pri 1000-god vodi.



Slika 48. Prikaz dubina na domeni numeričkog modela za most Jasenovac, Sava

Polje brzine toka na ulazu u dionicu karakterizirano je relativno velikim brzinama i ujednačeno je do mostovskog profila. Zbog položaja stupa u sredini korita, maksimalna brzina toka se javlja u

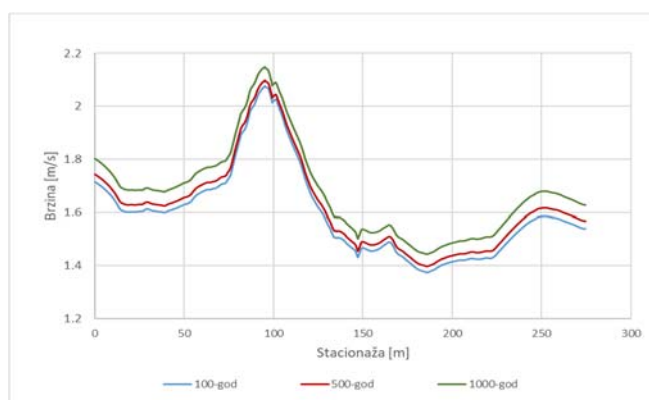
mostovskom otvoru s obje strane supa (slika 49). Najveća brzina toka evidentirana je neposredno uz stup na mjestu kontrakcije toka uslijed izvedbe zaštite od podlokavanja. Brzina toka je na mjestu maksimalne brzine izračunana u rasponu od 2,1 m/s pri 100-god vodi do 2,3 m/s pri 1000-god vodi. Odmah po izlasku iz mostovskog profila brzina toka opada i na cijeloj nizvodnoj dionici je ujednačena, bez izražene matice toka. Na polju brzine je jasno vidljiva sjena nizvodno od stupa gdje dolazi do smanjenih brzina tečenja. Uz stup na lijevoj obali nema vidljivog utjecaja na polje tečenja budući da se nalazi visoko na obali i tok ga ne opstrujava u potpunosti.



Slika 49. Prikaz polja brzine na domeni numeričkog modela za most Jasenovac, Sava

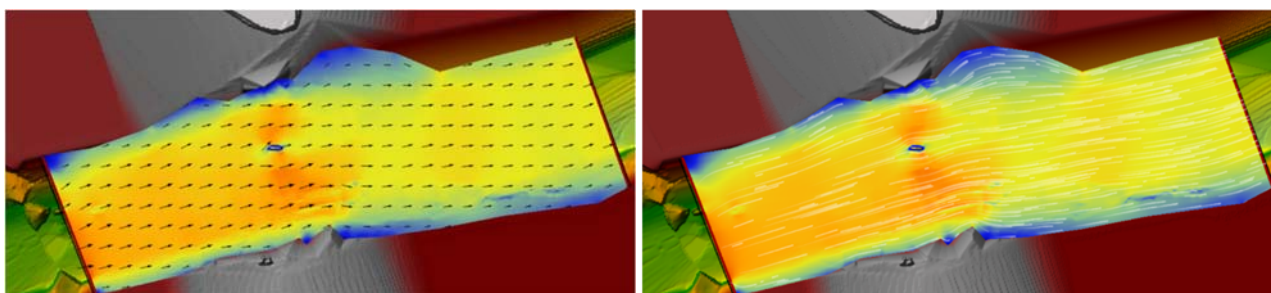
Za analizu utjecaja promjena u polju brzine zbog izgradnje stupova mosta u koritu na nastanak kaverne odabran je uzdužni profil brzine toka uz lijevu obalu, koji istovremeno prolazi i kroz kavernu nastalu podlokavanjem (slika 50). Vidljivo je da se najveće brzine (2,15 m/s) pojavljuju u području

stupa mosta, na grafu se navedeno manifestira kao nagli skok brzine. Razlog tome je suženje presjeka profila korita rijeke uslijed izvedbe zaštite od podlokavanja. Iz uzdužnog profila brzina vidljivo je da je brzina toka u matici na prilazu mostu relativno velika ($>1,6$ m/s) i da raste s približavanjem mostu. Prolaskom kroz mostovski profil brzina toka naglo pada (do $<1,6$ m/s), nakon čega dolazi do ujednačavanja nizvodno i ponovnog porasta na izlasku iz dionice. Vidljivo je da ne promatranom uzdužnom profilu toka nema značajne razlike u trendu između pojedinih analiziranih hidroloških događaja, već samo u intenzitetu brzine toka koja se povećava s povratnim razdobljem analiziranog hidrološkog događaja.



Slika 50. Uzdužni profil brzine duž toka za most Jasenovac, Sava

Na slici u nastavku prikazano je polje brzine za PR 1000-g s naznačenim vektorima srednje brzine toka po dubini i strujnicama (slika 51). Vidljivo je da ravna dionica uzvodno od mosta usmjerava tečenje prema mostovskom profilu. Nakon prolaska kroz mostovski profil dolazi do otklona strujnica prema desnoj obali, nakon čega se ujednačava tok prema izlazu iz dionice.



Slika 51. Prikaz vektora brzina (lijevo) i strujnica (desno) za most Jasenovac, Sava

4 ZAKLJUČAK

U ovom radu simulirana je struktura 2D polja tečenja u okolici stupova za 4 pilot mosta u svrhu procjene lokacije nastanka kaverne za različite režime voda. Pilot mostovi odabrani za provedbu istraživanja su dio istraživanja za potrebe projekta R3PEAT (Daljinsko praćenje erozije riprapp zaštite od podlokavanja na velikim rijekama u stvarnom vremenu), od čega se tri nalaze na rijeci Dravi (Osijek, Botovo i Varaždin) te jednog na rijeci Savi (Jasenovac). Mostovi su odabrani jer je oko njihovih stupova izvedena riprapp zaštita od podlokavanja koja remeti lokalno polje tečenja i izaziva pojavu kaverne u koritu uzrokovane lokalnim podlokavanjem. U radu je polje tečenja simulirano 2D numeričkim modelom HEC-RAS kojim su izračunana polja tečenja uzrokovana trima hidrološkim događajima – vodnom valovima 100-god, 500-god i 1000-god povratnog razdoblja.

Na simuliranom polju tečenja oko svih mostova uočeno je da model precizno simulira složeno polje tečenja u okolici stupova mosta. Za tri mosta je uočeno da se u sjeni stupa mosta vidi značajno lokalno smanjenje brzine toka karakteristično za odvajanje strujnica prilikom opstrujavanja uronjenog tijela. Kod četvrtog mosta (Drava Botovo) nije vidljiva sjena stupa jer se tok u njoj aktivira zbog nekarakterističnog oblika korita uzvodno od mosta.

Iz rezultata simulacija je vidljivo da na promatranoj domeni nema značajne razlike u trendu između pojedinih analiziranih hidroloških događaja, već samo u intenzitetu brzine toka koja se povećava s povratnim razdobljem analiziranog hidrološkog događaja.

Polje tečenja u okolici kaverni formiranih uz nizvodne rubove kamenog nabačaja u simulacijama je rezultiralo malim brzinama, što odgovara stvarnoj situaciji gdje je nastanak kaverni uzrokovan turbulencijom u vrtlogu uz građevinu, a ne velikim brzinama nizvodno od mostovskog profila. Ovime je potvrđena hipoteza rada koja glasi „Karakteristike polja tečenja simulirane 2D numeričkim modelom HEC-RAS mogu se koristiti za procjenu lokacije formiranja kaverne uslijed lokalnog podlokavanja“.

5 POPIS LITERATURE

- [1] Dadić, T., Tadić, L., Bonacci, O., Utjecaj Drave i Dunava kroz povijest na poplave u Osijeku. *Hrvatske vode*, 2015; 23(94): 287-294
- [2] Kuspilić, N., Gilja, G., Potencijalan učinak morfoloških promjena rijeke Save na zagrebački vodonosnik: Andročec, V. (ur) Strategija razvoja vodoopskrbe i odvodnje grada Zagreba, Zagreb, 17.-18.05.2016., Društvo građevinskih inženjera, Zagreb, 2016. str. 13-22
- [3] Skripta iz kolegija Mostovi, Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, katedra za betonske konstrukcije i mostove, Split, 2008.
- [4] GHOST TOWN, Dostupno: <https://www.texasmonthly.com/articles/ghost-town-2/> , [Pristupljeno: 23.6.2021.]
- [5] 15 years since South Padre Island's tragic Queen Isabella memorial causeway collapse, Dostupno: <https://www.mysanantonio.com/news/local/article/15-years-since-South-Padre-Island-s-fatal-Queen-9225019.php>, [Pristupljeno: 23.6.2021.]
- [6] Kuspilić, N., Separati iz kolegija „Postupci zaštite od voda“, Zagreb, 2009.
- [7] Gilja, G., Kuspilić, N., Bekić, D., Utjecaj degradacije korita na sigurnost mostova: Lakušić, S. (ur) Sabor hrvatskih graditelja 2012 Graditeljstvo à Poluga razvoja, Cavtat, 15.-17.11.2012., Hrvatski savez građevinskih inženjera, Zagreb, 2012. str. 795-806
- [8] Kuspilić, N., Gilja, G., Utjecaj vodotoka na sigurnost mostova, E-zbornik: elektronički zbornik radova Građevinskog fakulteta, Vol. 8; Issue. 16, str. 24-38, 2018
- [9] Imhof, D., Risk assessment of existing bridge structures. Department of Engineering at the University of Cambridge, 2004.
- [10] Imam, B.M., Chryssanthopoulos, M.K., A review of metallic bridge failure statistics, Bridge Maintenance, Safety and Management: Proceedings of the Fifth International IABMAS Conference, Department of Civil Environmental Engineering, Philadelphia, 11.-15.07.2010.
- [11] Lee, G.C., Mohan, S.B., Huang, C., Fard, B.N., A STUDY OF U.S. BRIDGE FAILURES (1980.-2012.), University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, NY, 2013.
- [12] HRVATSKO STRUKOVNO NAZIVLJE, Dostupno: <http://struna.ihjj.hr/naziv/podlokavanje/17686/#naziv>, [Pristupljeno: 19.6.2021.]
- [13] Sousa, J.J., Bastos, L. Multi temporal sar interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, str. 659-667, 2013.

- [14] On this date: Thruway Bridge collapses into Schoharie Creek in 1987, Dostupno: https://www.syracuse.com/vintage/2017/04/on_this_date_thruway_bridge_collapses_into_schoharie_creek_in_1987.html, [Pristupljeno: 21.6.2021.]
- [15] Work progressing to replace loon mountain bridge washed out by flood, Dostupno: <https://www.firsttracksonline.com/2011/10/02/work-progressing-to-replace-loon-mountain-bridge-washed-out-by-flood/>, [Pristupljeno: 21.6.2021.]
- [16] Kuspilić, N., Bekić, D., Gilja, G., Praćenje morfodinamičkih promjena korita vodotoka u zoni stupova mostova, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za prometnice, 2010, str. 69-112
- [17] Kuspilić, N., Gilja, G., Utjecaj vodotoka na sigurnost mostova, E-zbornik: elektronički zbornik radova Građevinskog fakulteta, Vol. 8, str. 24-38, 2018.
- [18] Skazlić, M., Tenžera, D., Futivić, K., Sanacija mosta Đurmanec nakon izvanredne okolnosti djelovanjem poplave, Sabor hrvatskih graditelja 2016: EU i hrvatsko graditeljstvo, Cavtat, Hrvatska, 2016., str. 301-312
- [19] Pinos, J., Timbe, L., Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins, Department of Water Resources and Environmental Sciences, University of Cuenca, Ecuador, 2019.
- [20] Kevin Denn, P.E., Two-dimensional capabilities of HEC-RAS, Hydrologic Engineering Center (HEC), 2014.
- [21] Overview of 1D/2D unsteady flow modeling with HEC-RAS, Us Army Corps of Engineers
- [22] Geraminegad, M., Ives, T., Morgan, J., HEC-RAS 2D modeling US 20 bridge, 2018.
- [23] Brunner, G.W., Combined 1D and 2D modeling with HEC-RAS, October, 2014.
- [24] Lintott, C.M., Beca Ltd, HEC-RAS 2D – An accessible and capable modelling tool, Water New Zealand's 2017 Stormwater Conference, 2017.
- [25] Ghaderi, A., Daneshfaraz, R., Dasineh, M., Evaluation And Prediction Of The Scour Depth Of Bridge Foundations With Hec-Ras Numerical Model And Empirical Equations (Case Study: Bridge Of Simineh Rood Miandoab, Iran), Engineering Journal, Vol. 23, Issue 6, 2019.
- [26] Kuspilić, N., Bekić, D., Gilja, G., Hidrografsko snimanje korita i podvodni vizualni pregled donjeg ustroja mostova: most Drava-Koprivnica, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za hidrotehniku, rujan 2011.
- [27] Kuspilić, N., Bekić, D., Gilja, G., Hidrografsko snimanje korita i podvodni vizualni pregled donjeg ustroja mostova: most Drava-Osijek, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za hidrotehniku, rujan 2011.

- [28] Kuspilić, N., Bekić, D., Gilja, G., Hidrografsko snimanje korita i podvodni vizualni pregled donjeg ustroja mostova: most Drava-Varaždin, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za hidrotehniku, rujan 2011.
- [29] Kuspilić, N., Gilja, G., Monitoring korita u području oko mostova: most Sava-Jasenovac, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za hidrotehniku, studeni 2015.
- [30] DRŽAVNI HIDROMETEOROLOŠKI ZAVOD, Dostupno: <https://hidro.dhz.hr/>, [Pristupljeno: 07.04.2021.]
- [31] Šošić, I., Serdar, V., Uvod u statistiku, Školska knjiga, Zagreb, 1992.
- [32] Gilja, G., Kuspilić, N., Bekić, D., Zubčić, K., Pristup forenzičnog inženjerstva pri specijalističkim pregledima donjeg ustroja željezničkih mostova na rijekama, *Željeznice 21* : stručni časopis inženjera i tehničara Hrvatskih željeznica, 19 (2020), 1; 9-19, 2020.