



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Tina Petrić

Diana Smoković

**UTJECAJ IZGRADNJE PRISTUPNE RAMPE TIJEKOM
SANACIJE STUPOVA MOSTA NA EROZIJU
MOSTOVSKOG PROFILA**

Zagreb, 2022.

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 2021./22.“.

Zahvala:

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

Sadržaj

1	Uvod.....	1
2	Metodologija.....	8
2.1	Obrada hidroloških podataka.....	12
2.2	Obrada batimetrijskih podataka.....	19
2.3	Obrada hidrografskih podataka.....	23
3	Rezultati i rasprava	25
3.1	Most Botovo	26
3.2	Most Jankomir	31
3.3	Most Šamac	35
3.4	Savski most	41
3.5	Zajednička analiza.....	46
4	Zaključak	49
5	Popis literature	50

1 UVOD

Mostovi su građevine koje dominiraju prostorom svojim dimenzijama, vijekom uporabe i brojem korisnika. Namjena mostova je provođenje (najčešće) prometnica preko umjetnih i prirodnih prepreka u svrhu ostvarivanja kontinuirane komunikacije mjesta s obje njegove strane. Stoga, mostovi imaju veliko značenje u prometnoj infrastrukturalnoj mreži i snažno utječu na društvo, te su direktno i/ili indirektno povezani sa nizom gospodarskih djelatnosti. Samom izgradnjom mosta dolazi do velikog poboljšanja mobilnosti što rezultira skraćanjem putovanja vozila, također se povećava dostupnost nemotornog prijevoza i javnog prijevoza. Time dolazi do poboljšanja i sigurnije mobilnosti društva, uz što se poboljšava i učinkovitost samog prometnog toka povezujući različite dijelove tog područja. Razvitak gradnje mostova odvijao se polako, stoljećima, uglavnom na osnovi iskustva stečenih prethodno izvedenim projektima. U početku su konstruirani kao pješački prijelazi, te daljnjim zahtjevima razvitka cestovnog i željezničkog prometa, nastala je potreba za izgradnjom prvih cestovnih i željezničkih mostova.

Zbog relativno dugog vijeka korištenja mostova, most projektiran prema važećim standardima i uz redovito održavanje, može se urušiti. Ako se potencijalni utjecaj vanjskih čimbenika i pojava na most ne prati kontinuirano tijekom uporabnog vijeka, oni mogu ugroziti njegovu sigurnost i stabilnost. Tijekom uporabnog vijeka mosta on će se neminovno naći pod utjecajem ekstremnih promjenjivih opterećenja nastalih djelovanjem vjetra, vode ili potresa koja u kombinaciji sa stalnim opterećenjem mogu kompromitirati stabilnost konstrukcije [1]. Procjenjuje se da oko 60% svih rušenja mostovima ima uzrok povezan s hidrauličkim uzrocima - djelovanjem vodotoka kojeg most premošćuje na konstrukciju. Među njima, podlokavanje koje se redovito javlja oko stupova i upornjaka mosta predstavlja veliki udio djelovanja. Erozivno djelovanje toka na korito u blizini mosta se može podijeliti na 3 karakteristična mehanizma: globalnu eroziju, eroziju uslijed suženja toka i lokalnu eroziju.

Globalna erozija nastaje kao posljedica neravnoteže u režimu korito-formirajućeg nanosa vodotoka, a manifestira se morfološkim promjenama cjelokupnog korita u vidu njegovog snižavanja ili izdizanja, uključujući i lateralnu migraciju obala. Globalna nestabilnost javlja se u trenucima kada postoji neravnoteža između režima voda i režima pronosa nanosa. Ako se vodotokom pronosi previše nanosa doći će do zatrpavanja protočnog profila, a ako postoji deficit nanosa doći će do erozije. No globalna erozija prirodni je fenomen koji nije vezan za samo postojanje mosta. Odnosi

se na promjene koje zahvaćaju korito na duljoj dionici. Zbog pada potencijala na dionici, inercija i gravitacija uzrokuju tečenje u vodotoku koje pokreće i pronosi vučeni nanos. Ako se uslijed tečenja povećaju posmična naprezanja i granična brzina toka, do vrijednosti kojoj se čestice korita ne mogu oduprijeti, bit će narušena globalna stabilnost. Analiza globalne erozije pristupom dopuštenih posmičnih naprezanja svodi se na određivanje vučne sile na dnu i na pokosima postavljanjem jednadžbe očuvanja količine gibanja. Vučna sila, tj. prosječna posmična naprezanja ovise o gustoći mase vode, ubrzanju sile teže, hidrauličkom radijusu te uzdužnom padu. No naprezanja po konturi vodotoka nisu raspodijeljena jednoliko. Maksimalna će naprezanja na dnu biti veća nego na pokosima, a da bi se konačno procijenila globalna erozija potrebno je usporediti stvarna s dopuštenim posmičnim naprezanjima, koja se također razlikuju na dnu i pokosu. Dopuštena posmična naprezanja razlikuju se i za pojedine materijale tvorbe dna i pokosa. Analiza globalne erozije pristupom granične brzine toka svodi se na usporedbu brzine toka i granične brzine koja ovisi o promjeru zrna nanosa i dubini vode. Granična brzina isto kao i posmična naprezanja manja je na pokosu nego na dnu. Problem ovog pristupa je nejasna definicija brzine vode na dnu koju je potrebno poznavati kako bi se njezina vrijednost usporedila s graničnom. Za vezane materijale vrijednosti granične brzine moguće je pronaći u literaturi. Globalna erozija korita u profilu mosta može uzrokovati izlaganje temeljne stope erozivnom djelovanju toka, a u još nepovoljnijem slučaju može doći do spuštanja korita ispod razine temeljne stope kao što se to desilo na mostu Jakuševac [2]

Erozija uslijed suženja toka najčešće nastaje kao posljedica izgradnje nasipa prometnice na riječnom inundacijskom pojasu čime se znatno sužava protočni profil pri nailasku velikih voda i koncentrira povećana snaga toka kroz mostovski profil. Stupovi u vodotoku najčešće ne predstavljaju problem po tom pitanju jer su relativno uski u odnosu na ukupnu širinu korita. Međutim, značajno suženje uzrokuju nasipi prometnice koji vrlo često zatvaraju inundacije i smanjuju protočni profil za prolazak velike vode. Upornjaci koji zadiru u vodotok također predstavljaju problem zbog čega eroziju suženja toka često prati podlokavanje upornjaka. Ta se dva problema najčešće tretiraju odvojeno ako se radi o širokim i plitkim vodotocima, ali ako je profil vodotoka uzak, adekvatnije je zajedničko tretiranje ovih problema. U profilu mosta se tada strujnice produljuju i koncentriraju uz čvrstu konturu, povećavaju se brzina toka i posmična naprezanja te se ubrzava transport nanosa i intenzivira turbulencija. Materijal s dna se ispiru i korito se produbljuje i armira do postizanja stanja ravnoteže. Erozija uslijed suženja toka također se određuje prema kriteriju da brzina toka i posmična naprezanja budu manja od granične brzine toka i posmičnih naprezanja za neku česticu. Granična brzina se za hrvatske uvjete najčešće određuje prema

Loursenu na temelju sr. dubine toka i veličine sr. čestice nanosa. Dubina podlokavanja uslijed suženja toka ovisi o promjeru najmanje pokretne čestice u mostovskom profilu, srednjoj dubini vode uzvodno od mosta i širini korita [3].

Lokalno podlokavanje je najizraženije kod smještaja stupova i upornjaka u glavnom koritu pri čemu dolazi do produljenja strujnica oko građevina i posljedično povećane brzine toka, turbulencije i lokalnog kapaciteta toka za erodiranje korita [4]. Stup mosta remeti strujnu sliku te se oko njega formira zona pojačane turbulencije. Ova razlika pomaže u stvaranju uvjeta za razvoj podlokavanja. Mehanizam podlokavanja je takav da tok vode kada naiđe na stup ponire prema dnu korita. Javlja se razlika u potencijalu i zbog povećanog tlaka i turbulencije koji se javljaju pri dnu stupa, strujnice koje su se spustile uz stup pokušavaju ga obići s obje strane i na taj način formiraju kavernu. Zbog ovog procesa se često nizvodno od mostova mogu uočiti mali sprudovi što je zapravo materijal erodiran na uzvodnom licu stupa i istaložen nizvodno nakon što je izašao iz zone pojačane turbulencije, a tok nema snagu da ga prenosi dalje.

Rušenje mosta neposredno rezultira zatvaranjem prometnica, smrtnim slučajevima, dugim zastojećima u prometu te posredno znatnim financijskim gubicima povezanim s prekidom prometne komunikacije. Željeznički most Jakuševac najznačajniji je most u Hrvatskoj kod kojeg je došlo do djelomičnog otkazivanja zbog hidrauličkih uzroka. Tijekom vodnog vala u noći 31. ožujka 2009. lokalno podlokavanje je uzrokovalo utonuće stupa u koritu rijeke Save uz desnu obalu i posljedično progib čeličnog gornjeg ustroja (slika 1). Stup se nagnjao kao rezultat kombinacije dvaju događaja: narušavanja globalne stabilnosti korita, zbog čega je cijelo korito vodotoka značajno erodiralo i spustilo u odnosu na projektirani i izvedeni položaj, te lokalnog podlokavanja u zoni stupa mosta. Između 1966. i 2009. godine dno korita je spušteno za 5-6 m, uz lokalno produbljenje od 4-5 m u zoni stupova, te je ukupno produbljivanje iznosilo oko 10 m u zoni stupa u odnosu na predviđeno dno. S obzirom da je Sava prilično brza i u području pri kraju gornjeg toka, ona erodira vlastito dno koje više ne nasipava zbog nedostatka vučenog nanosa.

Međutim, ljudski faktor također utječe na te promjene, o čemu svjedoči situacija nakon izgradnje hidroelektrana uzvodno i izgradnja nekoliko građevina u koritu (hidroelektrane u Sloveniji, prag kod Toplane Zagreb i sl.). Mjerenjima brzine, visinskim snimanjem korita rijeke na lokaciji mosta kao i uvidom u stanje metalnih dijelova mosta došlo se do zaključka da se usvoji rješenje sanacijom nagnutog stupa (izgradnja novog na istom mjestu), te popravak savinutog mosta izravnavanjem te zamjenom dijelova koji su pretrpjeli deformacije i zamor materijala [5, 6]. Usporedba stanja nakon havarije i stanja nakon izvedbe rješenja može se vidjeti na slici 2.



Slika 1. Prikaz mosta Jakuševac nakon havarije, te prikaz mosta nakon sanacije [6, 7, 8]

Most Schoharie Creek u New Yorku (Sjedinjene Američke Države), izgrađen 1950.-ih, srušio se 1987. godine, zbog podlokavanja i uklanjanja materijala iz korita u neposrednoj blizini stupa. Smatra se da je katastrofi presudila pojava otapanja snijega u kombinaciji s oborinama od ukupno 150 mm, što je izazvalo 50-godišnju poplavu. Čelični most s dva nosača bio je poduprt usko raspoređenim podnim gredama i betonskim stupovima. Podlokavanje, za koje se procjenjuje da je bilo u rasponu između 8.5 i 13.5 metara, dislociralo je jedan od temelja stupova, uzrokujući klizanje konstrukcije mosta sa svojih oslonaca (slika 2). Već je ranije uočeno da su temelji stupova preplitki (<2m) te je naknadno oko njih postavljeni žmurje kao zaštita od uznapredovale erozije. Deset osoba je izgubilo život kada su se dva raspona mosta srušila u rijeku [9].



Slika 2. Prikaz mosta Schoharie Creek nakon havarije i nakon rekonstrukcije [10]

7. veljače 1989. u gradu Ivernessu (Škotska), u periodu od 24 sata palo je više kiše nego u prosječnom mjesecu. Rezultat je bila poplava koja je odnijela naizgled čvrst kameni željeznički

most koji je premošćivao rijeku Ness, poznatu kao drugu najbržu rijeku u Škotskoj (nakon rijeke Spey). Most star 127 godina rušio se u fazama ukupnog trajanja 12 sati, no bez gubitka ljudskih života iako je teretni vlak prešao mostom 10 minuta prije rušenja [11]. Zaključeno je da je rušenje posljedica hidrodinamičkog opterećenja poplavnog vala i podlokavanje temelja stupova - uzvodno se razvila rupa duboka pet metara. Suvremeno rješenje u rekonstrukciji novog mosta bila je izgradnja praga kako bi se kontrolirala razina korita uzvodno od novog mosta (slika 3).



Slika 3. Prikaz željezničkog mosta preko rijeke Ness u Ivernessu prije i nakon urušavanja (lijevo) [11, 12] i izvedbu rješenja novog željezničkog mosta(desno) [13]

Povećana osjetljivost mostova na klimatske promjene predmet je brojnih studija. Simulacije s obzirom na scenarije klimatskih promjena koje je provela Europska komisija utvrdile su da će oko 20% mostova u Europi predstavljati visok rizik od podlokavanja u sljedećih 20 godina. Ovaj postotak varira od zemlje do zemlje, a procjenjuje se da će se najveći rizici pojaviti u Austriji (60%), Portugalu (50%), Španjolskoj (42%) i Italiji (39%) [14]. Na mreži hrvatskih državnih cesta postoji više od 1000 mostova s barem jednim rasponom većim ili jednakim pet metara, a sveukupno ih je blizu 2000. Sustav upravljanja i održavanja mostova i cestovnih građevina se prema Pravilniku o održavanju cesta te Tehničkim propisima za građevinske konstrukcije, sastoji od redovnih i izvanrednih pregleda i mjera nadzora. Izvanredni pregled i održavanje podrazumijevaju povremene radove poboljšanja pojedinih dijelova konstrukcije zbog značajnijih oštećenja ili gubitka trajnosti te se provode po potrebi. Cilj je pravodobno uočiti oštećenja i poduzeti mjere obnove i popravka elemenata konstrukcije kako bi se osigurala sigurnost, trajnost i uporabivost građevine. Zadnji veći pregled mostova proveden je 2018. Katastrofa u Genovi i probuđen interes javnosti za stanje hrvatskih mostova, koincidirali su tada s najavom Hrvatskih cesta o provedbi glavnog pregleda 82 mosta na državnim cestama kroz razdoblje od 8 mjeseci. Prije tog pregleda Hrvatske ceste

ocjenjivale su 70 % svojih mostova dobrim ili prihvatljivim, a ostalih 30 % mostova bilo je u lošem stanju. Noviji podaci iz 2020. pokazuju da je 80 % mostova u prihvatljivom i dobrom stanju, a 20 % u lošem, što sugerira da je u periodu od dvije godine ipak postignut napredak u provedbi planova sanacije i rekonstrukcije [15, 17].

Kada most koji se planira graditi nalazi u glavnom koritu ili prelazi preko inundacija, potrebno je poznavanje hidraulike u mostovskom profilu korita. Prirodni profil toka se sužava kada elementi mosta zadiru unutar korita, odnosno mostovski profil korita je uži od prirodnog korita, što uzrokuje uspor i porast vodostaja uzvodno u odnosu na prirodno stanje. Zbog toga je povećana brzina strujanja u profilu mosta. Ovo povećanje brzine toka često uzrokuje pokretanje čestica materijala iz korita, što omogućava eroziju u blizini temelja mosta. Tijekom poplavnih događaja dolazi do najveće štete i narušavanja stabilnosti riječnih mostova, kao rezultat toga, kritično je projektiranje hidraulički učinkovitih konstrukcija i precizno izračunavanje utjecaja uspora na razine vode. Općenito su stoga više pogođeni manji i stariji mostovi te pločasti propusti [16]. Važno je napomenuti da erozija ne prijeti samo velikim mostovima, opasni mogu biti i mostovi preko manjih vodotoka i potoka koji nisu pravilno dimenzionirani.

Rekonstrukcija mosta, osim gornjeg ustroja, redovito obuhvaća i rekonstrukciju donjeg ustroja, što podrazumijeva sanaciju upornjaka i stupova. I dok se upornjaci obično nalaze na obalama i relativno im je lako pristupiti s kopna, stupovi nerijetko zadiru u vodotok pa je potrebna specifična organizacija radova sanacije. Tehnologija rekonstrukcije stupa u vodotoku podrazumijeva najprije izradu pristupne rampe od obale rijeke do stupa te izradu radnog platoa uz sam stup. Rampa i plato izvode se najčešće kao nasip od osnovne kamene frakcije granulacije 30-100 cm, šljunčane ispune granulacije 5-6 mm te kamenog nabačaja za zaštitnu oblogu pokosa nasipa, granulacije 50-150 cm. Sljedeći koraci tehnologije uobičajeno su ojačanje temeljnog tla oko stupa pilotiranjem, montaža razupornog sklopa i ugradnja čeličnog žmurja iskop materijala iz prostora ograđenog žmurjem do dubine predviđene za izvedbu rekonstrukcije. Iskop materijala vrši se s nasutog radnog platoa i rasprostire po samom platou i pristupnoj rampi što znači da plato i rampa moraju biti dovoljno široki za prolazak mehanizacije i odlaganje iskopanog materijala. Po završetku same sanacije stupa, uklanja se nasip pristupne rampe i radnog platoa strojnim iskopom bagerom i grejferom. Kameni blokovi koji su služili za zaštitu pokosa pristupnog nasipa, izdvajaju se za ugradnju u kameni nabačaj za zaštitu stupa.

Ovim se radom analizira problem koji je redovito prisutan pri ovakvoj tehnologiji sanacije, ali i pri gradnji stupova u koritu vodotoka. Izradom pristupne rampe i radnog platoa oko stupa, značajno se zaprečava protočni profil rijeke što uzrokuje lokalne promjene hidrauličkog režima tečenja u zoni utjecaja pristupne rampe i platoa, ekvivalentne uvjetima erozije uslijed suženja toka. Iako se radovi nastoje izvesti u što kraćem roku, opstrukcija protočnog profila može imati značajne posljedice na povećanje erozije. Također se mogu desiti i neočekivani uvjeti velikih voda zbog kojih će nasip i rampa biti potopljeni pa će radovi stagnirati, a nasip će za to vrijeme zbog povećanog protoka pojačano remetiti strujnu sliku i pojačavati ispiranje materijala u okolici. Cilj ovog rada je napraviti pregled utjecaja dimenzija pristupne rampe izgrađene u koritu rijeke za potrebe sanacije stupova mosta na strukturu polja tečenja u okolici stupova mosta za 4 mosta u Hrvatskoj – za mostove preko rijeke Save (most Jankomir, Savski most, most Slavonski Šamac) te most preko rijeke Drave (most Botovo).

2 METODOLOGIJA

U radu su analizirane 4 studije slučaja: mostovi Jankomir, Savski most, most Slavonski Šamac na Savi te most Botovo preko rijeke Drave. Most Jankomir nalazi se na rijeci Savi u Jankomiru, gradskom naselju na zapadu Zagreba te služi kao cestovni most. Stari Jankomirski most izgrađen je 1958. godine po projektu Krunoslava Tonkovića, duljine 330 m i širine 12 m. Most ima sedam otvora veličine $40 + 5 \times 50 + 40$ m. Glavni nosivi sklop mosta su dva čelična kontinuirana nosača konstantne visine od 2 m na međusobnom razmaku 7 m, poprečno povezana poprečnim čeličnim nosačima na razmaku 5 m.



Slika 4. Prikaz mosta Jankomir i njegova lokacija na karti [19]

S obzirom na izgrađene pristupne ceste i intenzitet prometa, stari dvotračni Jankomirski most postao je usko grlo, te je zbog toga 2006. prema projektu Mate Pezere izgrađen novi Jankomirski most, paralelno uz stari. Most je projektiran zrcalno starom Jankomirskom mostu. Duljina mosta zadana je s savskim nasipom kao i kod starog mosta, te novi most u potpunosti pratiti stari most i po duljini i po rasporedu stupa odnosno rasponima. Novi Jankomirski most spregnuta je konstrukcija koja se u poprečnom presjeku sastoji od dva limena punostijena I – nosača visine 2,25 m i spregnute armiranobetske ploče koja je konstantne širine 11,3 m, a njezina debljina varira od 35 cm na spoju s I-nosač ima pa do 25 cm između njih. Rasponska konstrukcija sastoji se od dva glavna čelična I-nosača visine 225 cm. Most je temeljen na pilonima[18]. Preko mosta prelazi Ljubljanska

avenija, jedna od najprometnijih prometnica u Zagrebu. Riječ je o četvertračnoj aveniji koja se proteže od okretišta Savska Opatovina na istoku do petlje Jankomir sa zagrebačkom obilaznicom na zapadu.

Stari Savski most najstariji je zagrebački most. Izgrađen je 1939. godine, no donji ustroj od kamenih upornjaka i stupova na kesonima postoji još od 1892. Most povezuje Savsku cestu na sjeveru s Remetinečkom cestom na jugu, a od izgradnje Jadranskog mosta koristi se isključivo kao pješački. Sastoji se od armiranobetonske kolničke ploče i čelične rasponske konstrukcije preko 4 raspona, ukupne duljine 219.4 m. Rasponska konstrukcija sastoji se od glavnih kontinuiranih I-nosača povezanih poprečnim nosačima. Cestovni kolnik širine je 6 m s dvije pješačke staze širine 1.5 m. Stupovi i upornjaci sazidani su od kamena pješčenjaka povezanog mortom. Najrecentnija sanacija mosta krenula je početkom 2021. U sklopu radova uklonjena je stara kolnička konstrukcija i pješačke staze i izgrađena nova, postavljena je nova oprema (hidroizolacija, asfalt, rubnjaci, odvodnja, prijelazne naprave, ograde, rasvjeta), zamijenjeni su čelični elementi rasponskog sklopa (dva poprečna nosača iznad upornjaka i svi sekundarni uzdužni nosači ispod betonske ploče), zamijenjeni su ležajevi, sanirana su dva stupa u koritu koji su zaštićeni krupnim kamenjem. Upravo zbog aktualne sanacije stupova u vodotoku, most je posebno zanimljiv za analizu u ovom radu.



Slika 5. Prikaz Savskog mosta i njegova lokacija na karti [20]

Cestovno-željeznički most Slavonski Šamac, koji povezuje Slavonski Šamac i Bosanski Šamac nedavno je rekonstruiran nakon što je teško oštećen 1993. godine tijekom rata u Bosni i

Hercegovini. Most je djelomično izrađen od čelika, a dijelom od armiranog betona. Institut Ipsa iz Sarajeva (glavni projektant mr.sc. Emir Mani, inženjer građevine) izradio je plan obnove, a izvođač radova bio je hrvatsko-bosanski konzorcij. U odnosu na prethodni most, sadašnji je proširen za dva prometna traka. Radi se o složenom mostu jer preko njega paralelno prolazi trasa magistralne pomoćne željezničke pruge i trasa državne ceste D7. Smješten je na važnom željezničkom međunarodnom koridoru koji povezuje Budimpeštu preko Osijeka i Vrpolja sa Zenicom, Sarajevom, Mostarom i Pločama. Preko mosta je prolazi i cestovni promet od Budimpešte, preko Mohača i Đakova do Sarajeva, Mostara i Ploča. Radi se o čelično-betonskom mostu s 15 raspona i betonskim stupovima, dužine 578,6 m. Čelična konstrukcija mosta smještena je na prva tri raspona (55 + 88 + 55) s hrvatske strane nad glavnim tokom rijeke Save kojim se odvija međunarodni riječni promet [21].



Slika 1. Prikaz mosta Slavonki Šamac i njegova lokacija na karti **Error! Reference source not found.** [22]

Most Drava-Koprivnica izgrađen je 1895. godine kao drveni most, a nalazi se u Botovu na pruzi Og - Botovo - Dugo Selo, te premošćuje rijeku Dravu. Most ima 3 otvora, rešetkaste rasponske konstrukcije duljine 291 metar. Nosiva konstrukcija je od čelika, upornjaci, ležajna greda od armiranog betona, a ziđe, krila i temelji od betona. Sadašnja čelična konstrukcija izgrađena je 1958, a most je prvi put obnovljen 1982. kada je elektrificirana pruga, a paralelno je pored željezničkog izgrađen i most isključivo za cestovni promet. Početkom 2000-ih izvedena je kompletan

antikorozivna zaštita, a 2012. je postavljena nova mosna građa, kolosječni pribor i tračnice s novim dilatacijskim napravama uz preporuku potrebne sanacije nosive konstrukcije i donjeg ustroja. Prva faza sanacije tijekom koje je izvedena AB obloga za ojačanje temeljne stope stupa, dovršena je 2015. godine. Druga faza sanacije uključivala je izgradnju AB plašta oko stupova, ojačanje nepokretnih ležajeva i vjetrovnih spregova te antikorozivnu zaštitu dijela čelične konstrukcije, a dovršena je 2017. godine. 2021. godine neposredno pored starog, počela je izgradnja novog željezničkog mosta Botovo. Novi most za dvokolosječnu prugu bit će dugačak 338 m, a donji ustroj sastojat će se od dva upornjaka i dva stupa. Gradnja mosta trebala bi završiti 2023. godine, a stari željeznički most prenamijeniti će se u most-muzej kao primjer suvremenog pristupa očuvanju industrijske baštine.



Slika 2. Prikaz mosta Botovo i njegova lokacija na karti [23]

Za svaki most prikupljeni su hidrološki, batimetrijski, i hidrografski podaci. Hidrološki podaci preuzeti su od DHMZ-a s najbliže vodomjerne postaje, dok su batimetrijski i hidrografski podaci preuzeti iz elaborata Građevinskog fakulteta.

2.1 Obrada hidroloških podataka

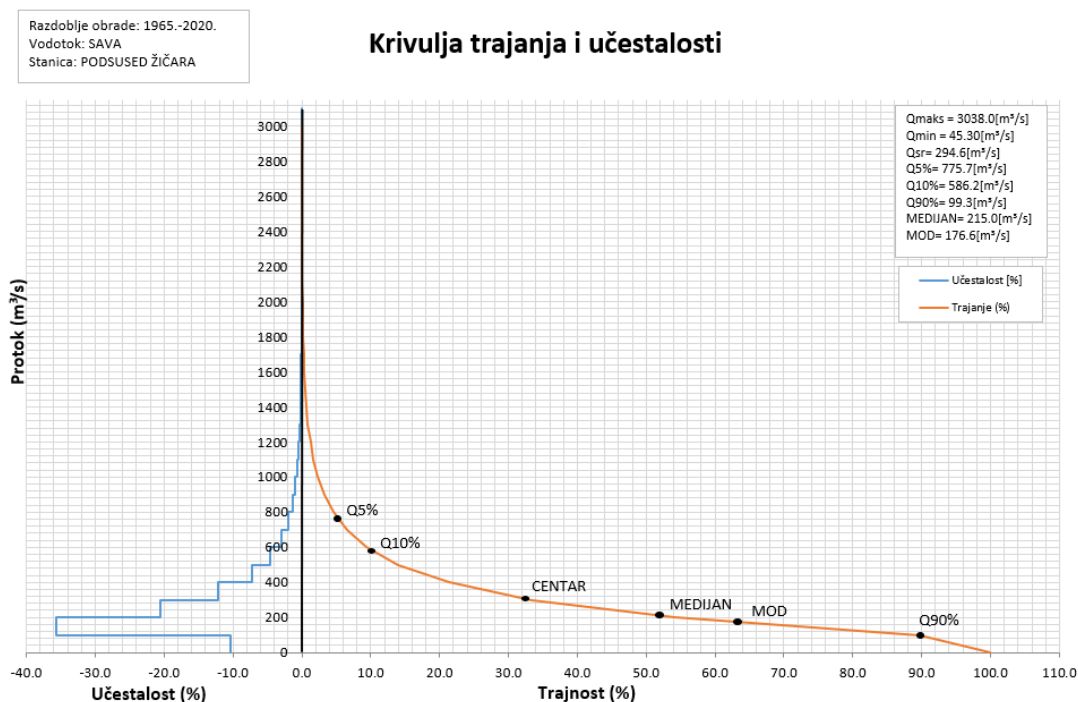
Obrada hidroloških podataka obuhvaćala je analizu niza podataka o vodostaju i protoku dostupnih s vodomjerne postaje mjerodavne za svaki most. Podaci o protoku korišteni su za izračun karakterističnih vrijednosti: protoka srednje vode (SQ), protoka 100-godišnjeg povratnog razdoblja (VQ) i srednjeg malog protoka (SNQ). Podaci o vodostaju korišteni su za izračun karakterističnih vrijednosti: srednjeg vodostaja (SV), 100-godišnjeg vodostaja (VV) i srednje niske vode (SNV). Za proračun srednjih vrijednosti korišteni su dnevni podaci relevantne duljine, a same srednje vrijednosti dobivene su kao aritmetička sredina niza. Podaci o protoku i vodostaju 100-godišnjeg povratnog razdoblja izračunani su prilagodbom teorijske funkcije distribucije gustoće vjerojatnosti na godišnje ekstreme. Podaci o protoku i vodostaju srednje niske vode izračunani su kao aritmetička sredina najnižih godišnjih vrijednosti. Dio hidrološke obrade je i krivulja trajanja i učestalosti kojom je moguće povezati karakteristične hidrološke varijable s njihovim trajanjem u prosječnoj godini.

Zagreb je potpunu zaštitu od poplava dobio tek izgradnjom današnjih nasipa podignutih nakon katastrofalne poplave 1964. godine. Stoga će relevantni korišteni podaci protoka i vodostaja vodomjernih postaja na rijeci Savi biti preuzeti za razdoblje nakon potpune izgradnje nasipa, a uz to je i zadovoljen uvjet minimalne veličine promatranog perioda (minimalno 30 godina). Sa odjela hidrologije Državnog hidrometeorološkog zavoda preuzeti su podaci o maksimalnom dnevnom protoku i vodostaju u obliku tablice, kroz razdoblje od 1965. godine do 2020. godine, pripadnih vodomjernih postaja. Za most Botovo analiziran je niz od 45 godina hidroloških podataka kako bi se izbjegle promjene koje je na vodni režim imala izgradnja hidroelektrana na Dravi. Mjerodavne vodomjerne postaje i njihove osnovne karakteristike dane su u sljedećoj tablici (tablica 1):

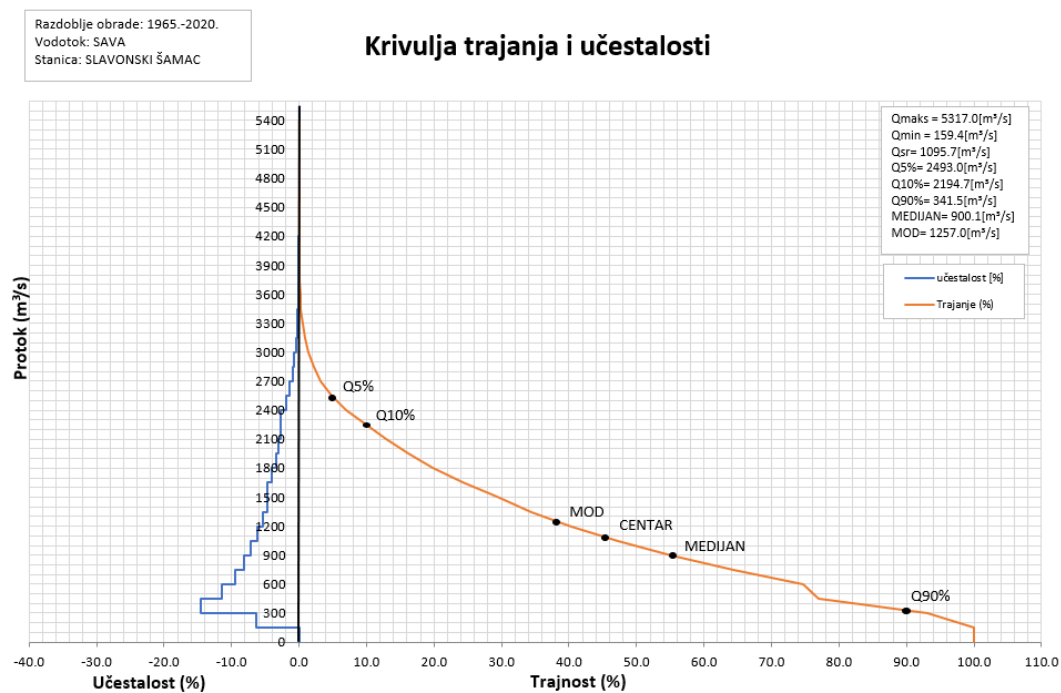
Tablica 1. Mjerodavne vodomjerne stanice promatranih mostova i njihove osnovne karakteristike

Karakteristike vodomjerne postaje	H [m n.m.]	Q [m ³ /s]	Vodomjerna postaja	Most
Duljina niza podataka	1965.-2020.god.		Podsused žičara	Most Jankomir
Datum maximuma	30.01.1979.	20.09.2010.		
Vrijednost maximuma	124.90	3038.00		
Datum minimuma	17.19.2011.	24.08.1993.		
Vrijednost minimuma	116.55	45.27		
Kota nule	120.48 (1926. - 1967.), 119.134 (1968. - 2020.)			
Duljina niza podataka	1965.-2020.god.		Zagreb	Savski most
Datum maximuma	20.9.2010.	20.9.2010.		
Vrijednost maximuma	116.75	2732		
Datum minimuma	23.8.1993.	23.8.1993.		
Vrijednost minimuma	108.9	48.67		
Kota nule	112.26			
Duljina niza podataka	1965.-2020.god.		Slavonski Šamac	Most Slavonski Šamac
Datum maximuma	18.01.1970.	/		
Vrijednost maximuma	89.53			
Datum minimuma	29.08.2012.			
Vrijednost minimuma	78.10			
Kota nule	80.64 (1933. - 1976.), 80.696 (1977. - 2020.)			
Duljina niza podataka	/		1965.-2020.god.	Županja Stepenica
Datum maximuma		17.05.2014.		
Vrijednost maximuma		5317.00		
Datum minimuma		25.08.1993.		
Vrijednost minimuma		159.40		
Kota nule				
Duljina niza podataka	1976.-2021.god.		Botovo	Most Botovo
Datum maximuma	16.9.2014.	16.9.2014.		
Vrijednost maximuma	127.22	2345.33		
Datum minimuma	7.11.1977.	30.12.2001.		
Vrijednost minimuma	120.85	102.671		
Kota nule	122.25 (1976.-1983.), 121.55 (1984.-2021.)			

Pomoću navedenih podataka provedene su hidrološke analize protoka i vodostaja te su izrađene krivulja trajanja i krivulja učestalosti zajedno sa karakterističnim točkama za svaki most (dijagrami 1-4).



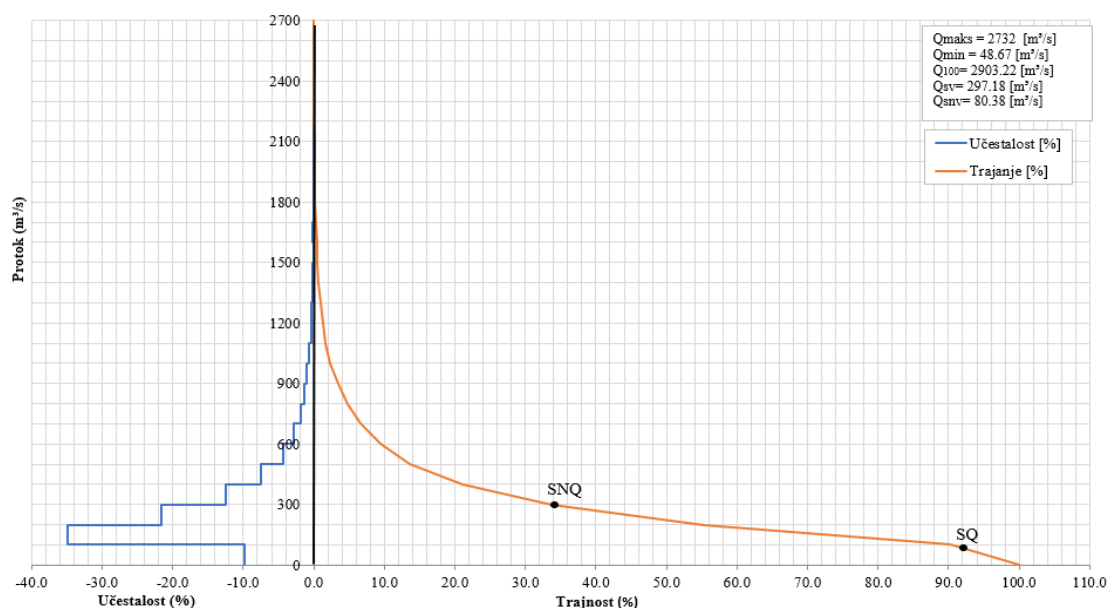
Dijagram 1. Krivulja trajanja i učestalosti protoka vodomjerne stanice Podsuđed žičara



Dijagram 2. Krivulja trajanja i učestalosti protoka vodomjerne stanice Slavonški Šamac

Razdoblje obrade: 1965.-2020.
Vodotok: SAVA
Stanica: ZAGREB

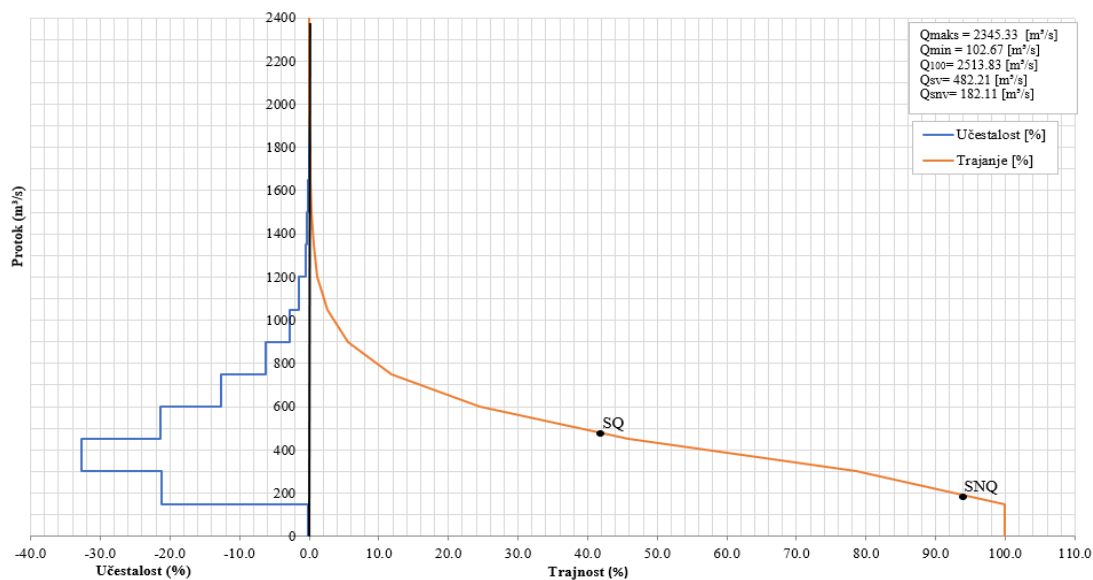
Krivulja trajanja i učestalosti protoka



Dijagram 3. Krivulja trajanja i učestalosti protoka vodomjerne stanice Zagreb

Razdoblje obrade: 1976.-2021.
Vodotok: DRAVA
Stanica: BOTOVO

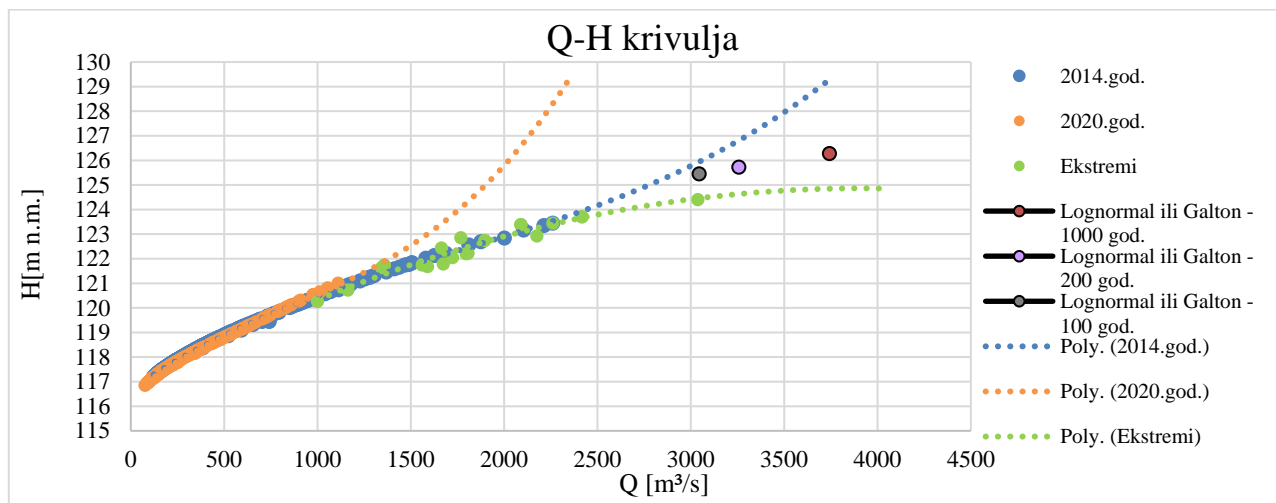
Krivulja trajanja i učestalosti protoka



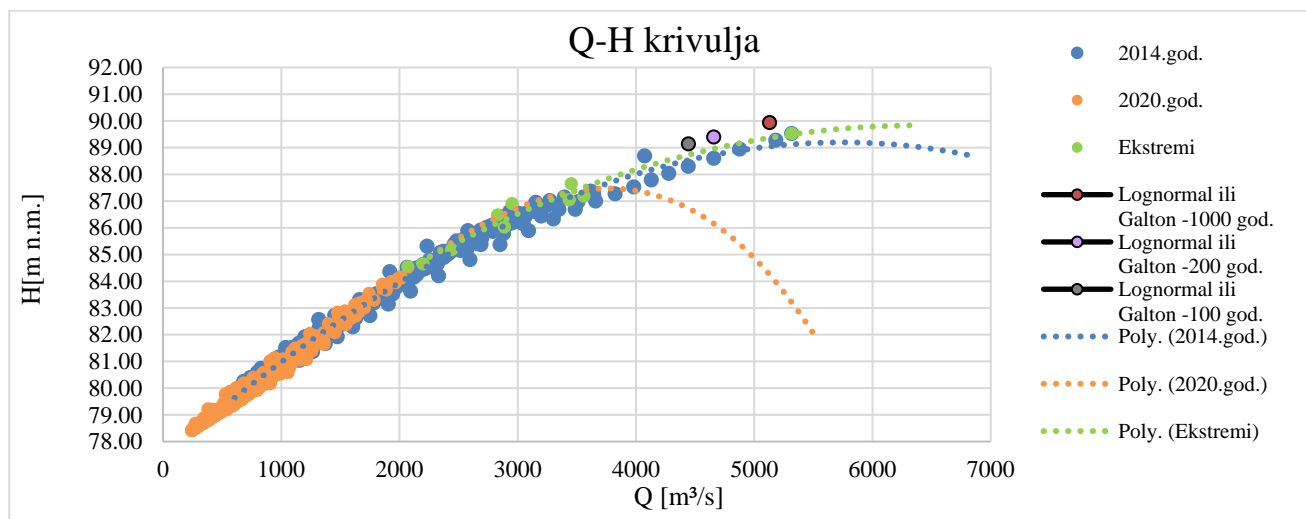
Dijagram 4. Krivulja trajanja i učestalosti protoka vodomjerne stanice Botovo

Provedeno je ispitivanje prilagodljivosti empirijskih funkcija raspodjele, testirane su sljedeće funkcije: Lognormal, Galton, Normal, Gauss i Weibull. Uspoređene su Q-H krivulje najkišnijih godina, zadnje godine dostupnih podataka i maksimalnih godišnjih protoka s pripadajućim vodostajima za svaki most (dijagrami 5-8). Možemo primijetiti da se ekstrapolirane Q-H krivulje

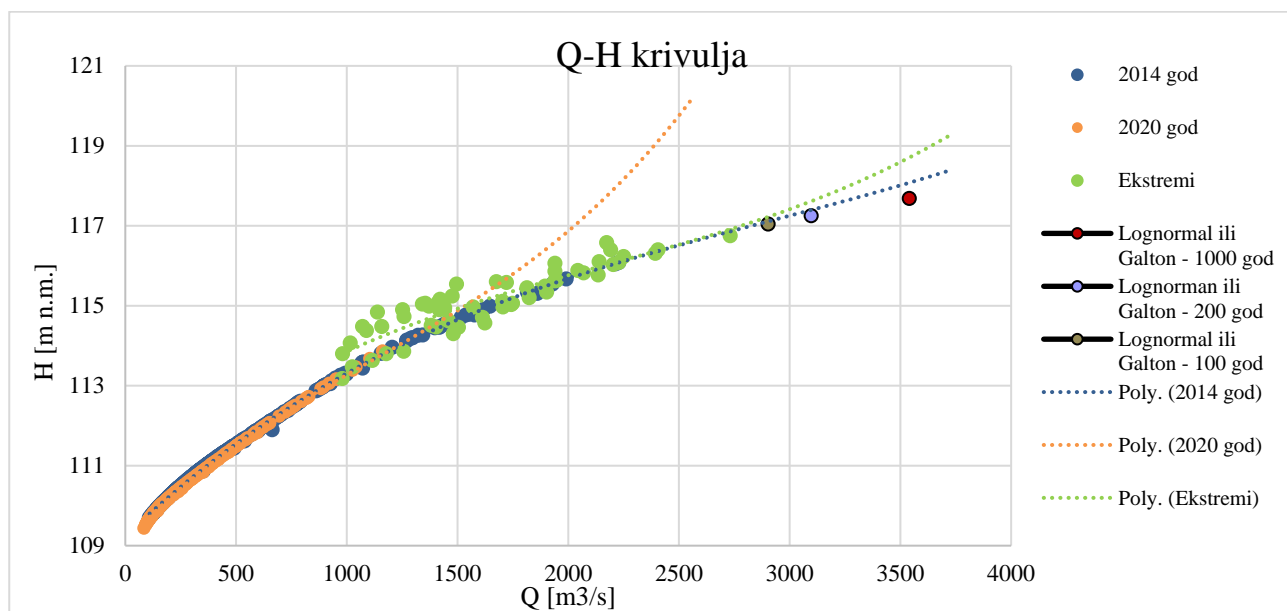
najkišnije godine za određenu vodomjernu postaju i maksimalnih godišnjih protoka skoro poklapaju sa dodanim podacima 1000god., 200god. i 100god. povratnog perioda u skladu s Lognormalnom empirijskom teorijom vjerojatnosti ili empirijskom teorijom vjerojatnosti izračunatoj prema Galtonu. Ekstrapolacija podataka je iznimno bitan podatak kako bismo, ovisno o potrebi, bili u mogućnosti izgraditi dugotrajnije objekte.



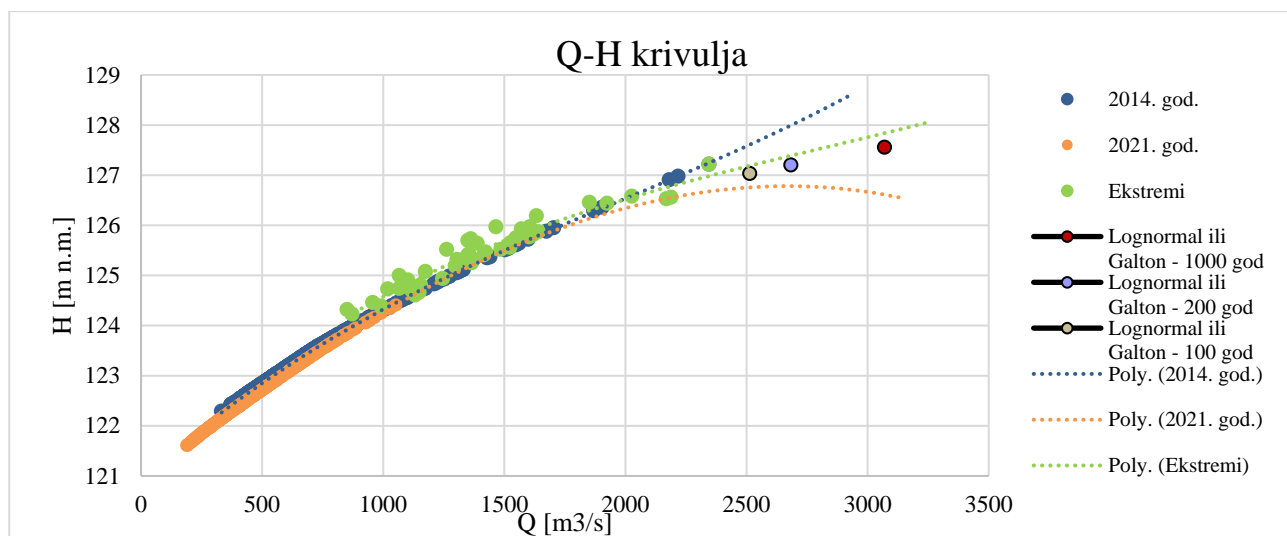
Dijagram 5. Q-H krivulje najkišnije godine (2014.god), zadnje godine podataka (2020.god.) i Qmax s pripadajućim H, vodomjerne stanice Podsused žičara



Dijagram 6. Q-H krivulje najkišnije godine (2014.god), zadnje godine podataka i Qmax s pripadajućim H, vodomjerne stanice Slavonski Šamac



Dijagram 7. Q-H krivulje najkišnije godine, zadnje godine podataka i Qmax s pripadajućim H, vodomjerne stanice Zagreb



Dijagram 8. Q-H krivulje najkišnije godine, zadnje godine podataka i Qmax s pripadajućim H, vodomjerne Botovo

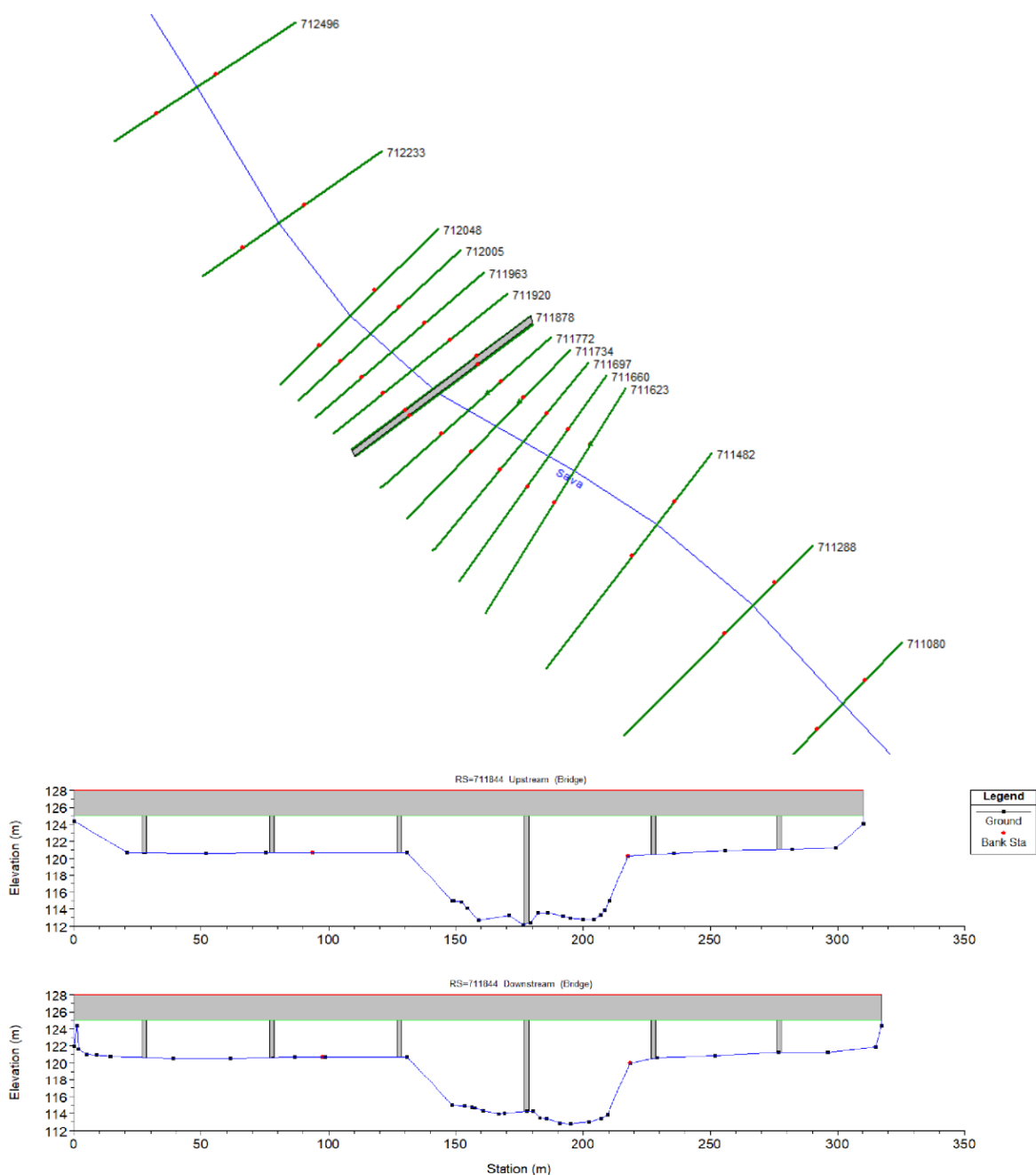
U sljedećoj tablici navedene su izračunane karakteristične vrijednosti promatranih situacija:

Tablica 2. Izračunane vrijednosti

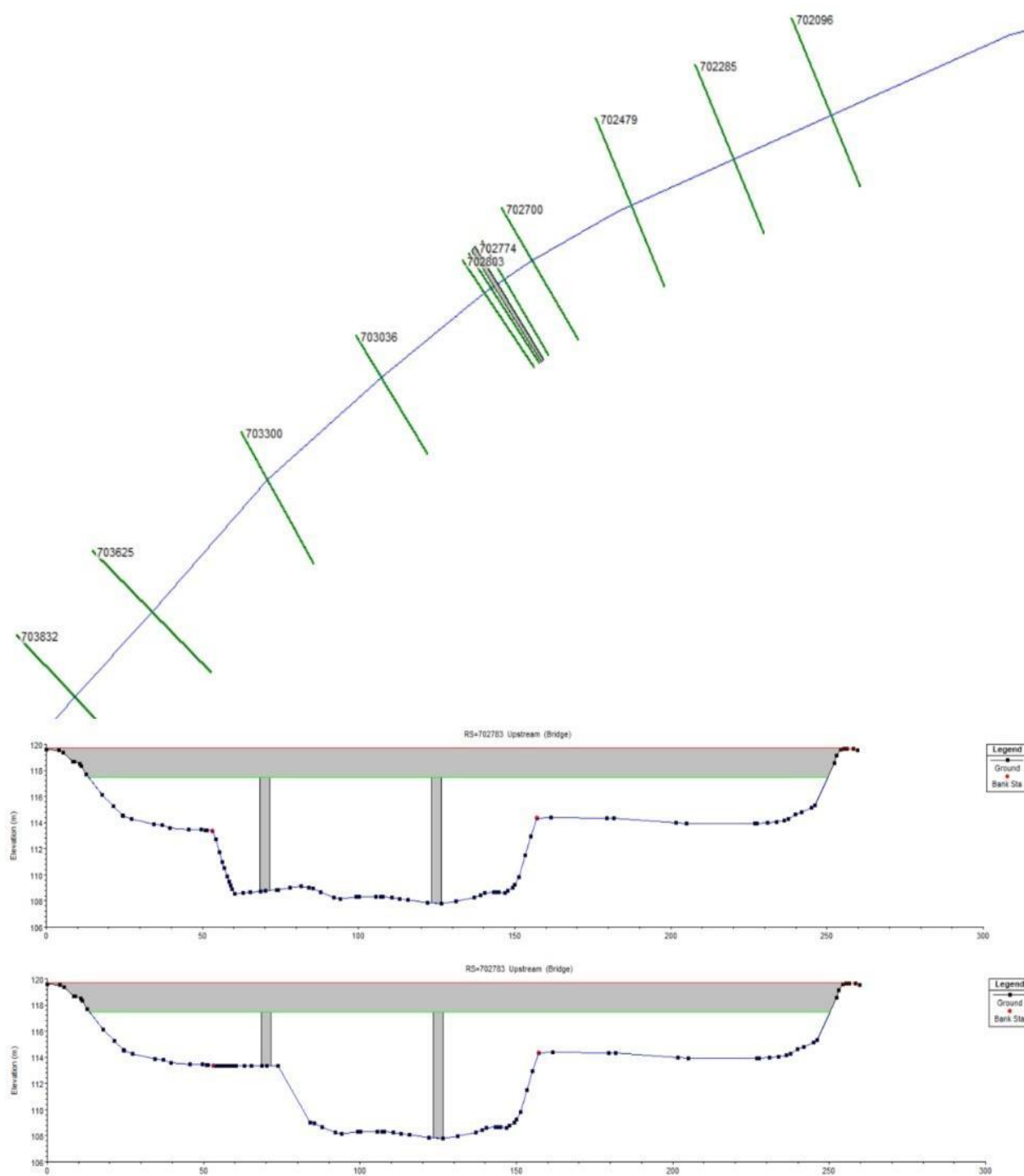
Most: most Jankomir			
VQ [m ³ /s]	3045.70	VV [m n.m.]	123.31
SQ [m ³ /s]	294.60	SV [m n.m.]	118.80
SNQ [m ³ /s]	77.17	SNV [m n.m.]	117.76
Most: Savski most			
VQ [m ³ /s]	2903.22	VV [m n.m.]	117.03
SQ [m ³ /s]	297.18	SV [m n.m.]	110.95
SNQ [m ³ /s]	80.40	SNV [m n.m.]	109.80
Most: most Slavonski Šamac			
VQ [m ³ /s]	4444.20	VV [m n.m.]	89.10
SQ [m ³ /s]	1095.70	SV [m n.m.]	81.90
SNQ [m ³ /s]	277.89	SNV [m n.m.]	79.34
Most: most Botovo			
VQ [m ³ /s]	2513.82	VV [m n.m.]	127.03
SQ [m ³ /s]	482.21	SV [m n.m.]	122.97
SNQ [m ³ /s]	182.12	SNV [m n.m.]	121.83

2.2 Obrada batimetrijskih podataka

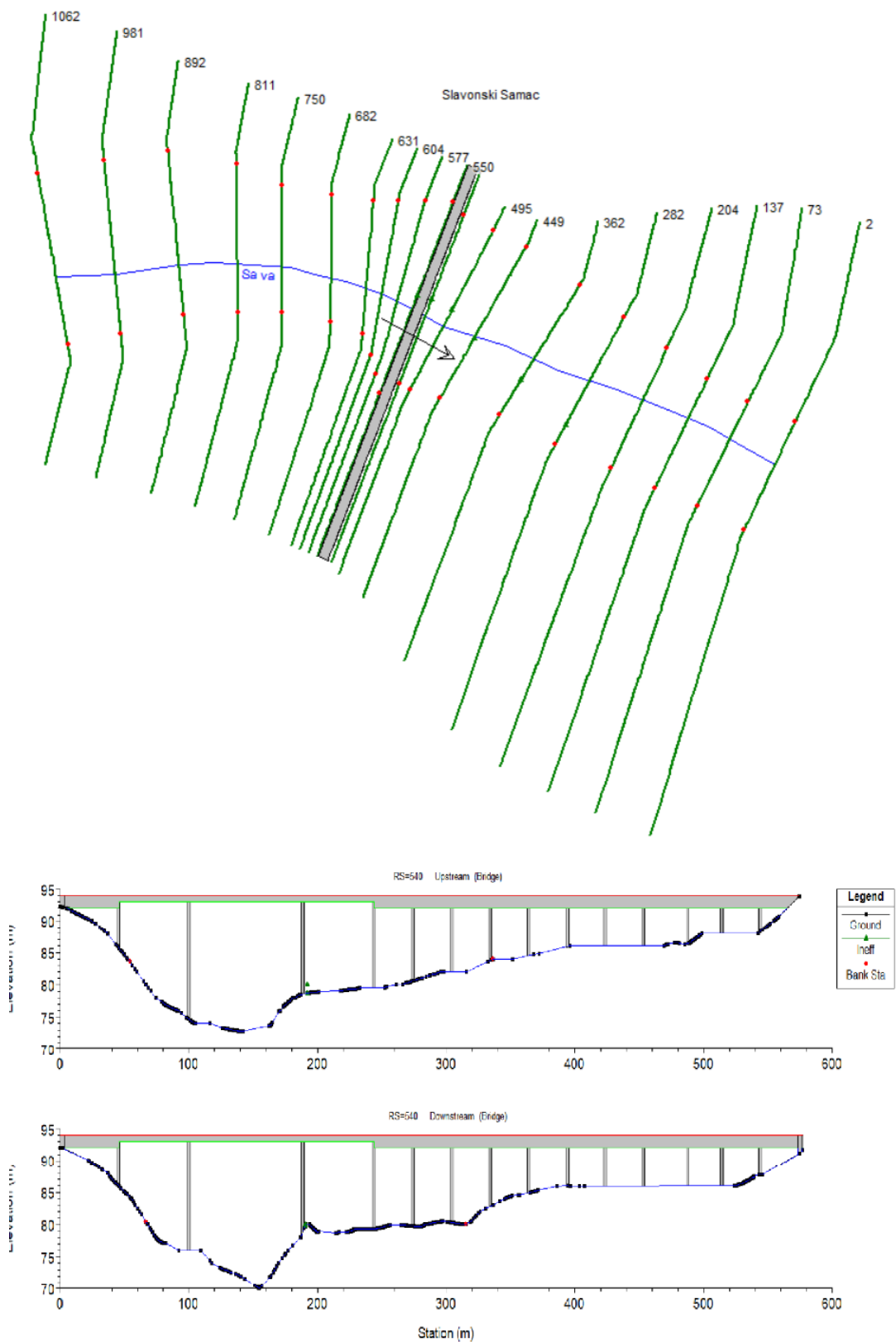
Obrada batimetrijskih podataka obuhvaćala je analizu podataka o geometriji korita snimljenih metodom poprečnih profila. Za svaki most snimljena je šira dionica vodotoka kako bi se podaci o batimetriji mogli koristiti za izradu matematičkog modela tečenja.



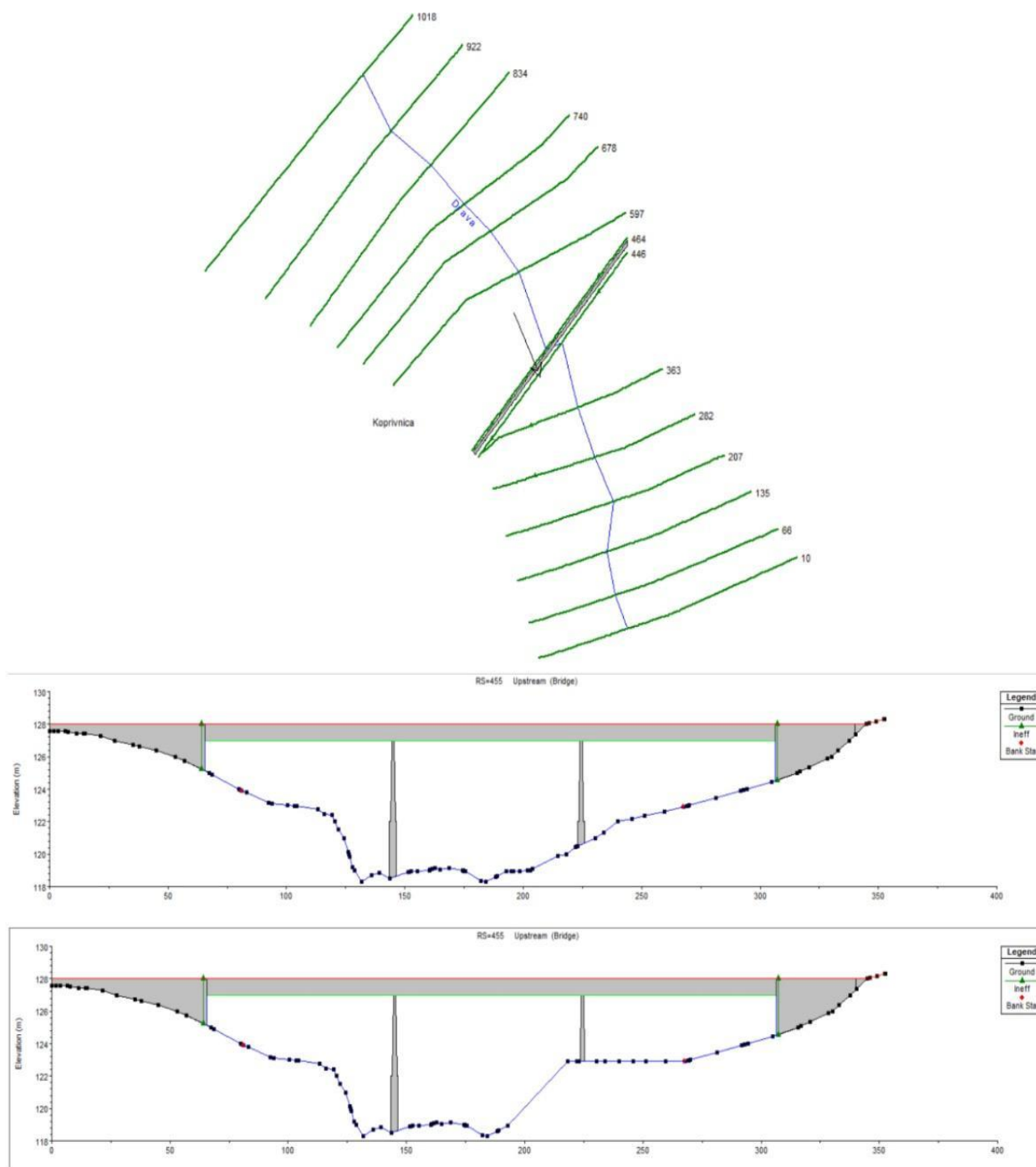
Slika 8. Prikaz modela mosta Jankomir



Slika 9. Prikaz modela Savskog mosta



Slika 10. Prikaz modela mosta Slavonki Šamac



Slika 11. Prikaz modela mosta Botovo

2.3 Obrada hidrografskih podataka

Hidrografski podaci obuhvaćali su snimanje protoka ADCP uređajem u svrhu kalibracije matematičkog modela HEC-RAS. Protok je sniman u dva navrata za svaki most, pri čemu je na svakom profilu snimljen protok i vodostaj [24, 25]. Na temelju tih podataka pristupljeno je kalibraciji modela gdje su kao rubni uvjeti zadani izmjereni protok uzvodno (ulaz u model), izmjereni vodostaj nizvodno (izlaz iz modela), a Manningov koeficijent hrapavosti variran je sve dok se izračunani vodostaji na profilima cijele dionice nisu poklopili s izmjerenim pri čemu je model smatran kalibriranim. Model za mostove zagrebačkog područja kalibriran je na temelju podataka iz članka [26] koji analizira prolazak velikog vodnog vala rijekom Savom 2010. g.

Model za most Botovo kalibriran je na temelju snimanja rijeke Drave iz travnja 2011. koje je proveo Zavod za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu. Pregled podataka dobivenih mjerenjima dan je u tablici (tablica 3), a prema podacima iz DHMZ-a srednji vodostaj na postaji Botovo iznosi $SV = 122.97$ m n.m. i pripadni srednji protok $SQ = 482.21$ m³/s.

Tablica 3. Protoci i vodostaji kao rubni uvjeti za kalibraciju modela mosta Botovo [24]

Mjerenje	Datum	Q [m ³ /s]	H [m n.m.]
m ₀₁	12.4.2011.	392	122.55
m ₀₂	21.4.2011.	259	121.99

Kalibracija modela mosta Slavonski Šamac izvedena je pomoću izmjerenih podataka protoka i vodostaja za vrijeme hidrauličkih mjerenja m₀₁ i m₀₂ (tablica 4). Hidrografska snimanja mosta Slavonski Šamac, obavljeno tijekom svibnja i lipnja 2011. godine, proveo je Zavod za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu. Prema podacima DHMZ-a srednji vodostaj vodomjerne postaje Slavonski Šamac iznosi $SV = 81.9$ m n.m., sa pripadnim protokom $SQ = 1095.7$ m³/s.

Tablica 4. Protoci i vodostaji kao rubni uvjeti za kalibraciju modela mosta Slavonski Šamac [25]

Mjerenje	Datum	Q [m ³ /s]	H [m n.m.]
m ₀₁	5.5.2011.	616	79.81
m ₀₂	9.6.2011.	729	80.05

Model za mostove zagrebačkog područja kalibriran je na temelju podataka iz članka [24] koji analizira prolazak velikog vodnog vala rijekom Savom 2010. g. U rujnu te godine na Savi se, kao posljedica velikih kiša na zapadnom dijelu sliva, formirao veliki vodni val 100-godišnjeg povratnog perioda. Maksimalni vodostaj zabilježen na VP Zagreb iznosio je 116.9 m n.m., a pripadni protok 2718 m³/s. To je najviši vodostaj zabilježen od 1964., ali tada još nije bio izgrađen oteretni kanal Odra. Procjena je da bi vodostaj na postaji Zagreb u slučaju da ne postoji preljev Jankomir iznosio 118.31 m n.m.. Tijekom prolaska vodnog vala provedeno je i nekoliko vodomjerenja, a pri jednom od njih zabilježen je protok od 2773 m³/s i pripadni vodostaj od 454 m n.m..

Na temelju obrađenih podloga izrađen je i kalibriran model HEC-RAS za svaki most. Model je uspostavljen za dva stanja korita – postojeće i za vrijeme sanacije. Postojeće stanje odnosi se na postojeće stanje korita i položaj stupova u koritu prema projektu. Stanje za vrijeme sanacije predstavlja privremeno stanje tijekom kojega je unutar mostovskog profila izgrađena pristupna rampa za potrebe provedbe odabrane tehnologije građenja prilikom sanacije stupova mosta. Dimenzije pristupne rampe procijenjene su iz snimljenih slojnica korita i fotografija. Pristupna rampa umetnuta je u HEC-RAS model kao prepreka u model i njen utjecaj na polje tečenja kroz mostovski profil procijenjen za 3 karakteristična hidrološka događaja: SV, VV i SNV. Uvjeti SV karakteristični su jer predstavljaju prosječno stanje vodnog režima kroz dulje vremensko razdoblje, VV je karakteristična jer se koristi kao za projektiranje mostova kao mjerodavna varijabla za procjenu veličine kaverne lokalnog podlokavanja, a SNV je karakteristična jer se na nju vežu elementi regulacijskih građevina, kao što je npr. kota krune nožice i predstavljaju uvjete oscilacije vodostaja ispod kojih nije očekivano snižavanje vodostaja, odnosno radovi ispod te kote će biti izvođeni pod vodom.

Rezultati su uspoređeni kako bi se procijenio utjecaj gradnje rampe na eroziju uslijed suženja toka kroz mostovski profil za raspon karakterističnih hidroloških događaja mjerodavnih za radove u koritu. Rezultati matematičkog modela su uspoređeni na svakom profilu za vodostaj, brzinu toka i posmično naprezanje te je na temelju njih izveden zaključak o utjecaju tehnologije gradnje na stanje korita.

3 REZULTATI I RASPRAVA

Djelovanje rampe na polje tečenja razmatrat će se određivanjem stanja pokretanja nanosa, prema kriteriju granične brzine i dopuštenog posmičnog napreznja. Kretanje čestice nanosa započinje tek u trenutku kada brzina u blizini dna dostigne određenu vrijednost, koja se naziva graničnom (kritičnom). Korišten je Laursenov kriterij:

$$v_{gr} = K_U \cdot h_1^{1/6} \cdot d_{50}^{1/3} \quad (1)$$

Gdje su:

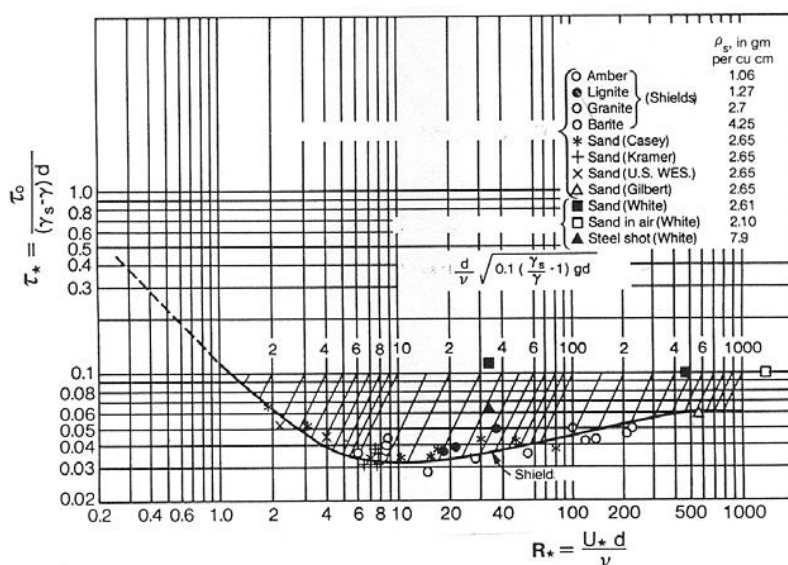
V_{gr} = granična brzina [m^3/s]

$K_U = 6.19$ [1]

h_1 = srednja dubina toka neposredno uzvodno od mosta [m]

d_{50} = promjer srednje veličine čestica iz korita [m]

Ako čestice materijala dna korita nisu dovoljno velike da se trenjem odupru posmičnom napreznju uslijed toka vode dolazi do narušavanja stabilnosti korita. To jest, ako napreznja premaše dopuštena granična posmična napreznja dolazi do pomicanja čestica nizvodno, što uzrokuje produbljenje korita. Podlogu za mnoga istraživanja na temelju posmičnog napreznja napravio je Shields, te je svojim mjerenjima konstruirao dijagram (slika 12):



Slika 12. Shieldsov dijagram [5]

Pri čemu je korišteno:

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{(\rho_s \cdot \rho) \cdot g \cdot d_{50}} \quad (2)$$

$$R_* = \frac{U_* \cdot d_{50}}{\nu} = \frac{d_{50}}{\nu} \sqrt{0.1 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \cdot g \cdot d_{50}} \quad (3)$$

Gdje su:

τ_* = Shieldsov broj [/]

τ_0 = dopušteno posmično naprezanje [N/m^2]

R_* = Reynoldsov broj zrna [/]

U_* = brzina posmika [m/s]

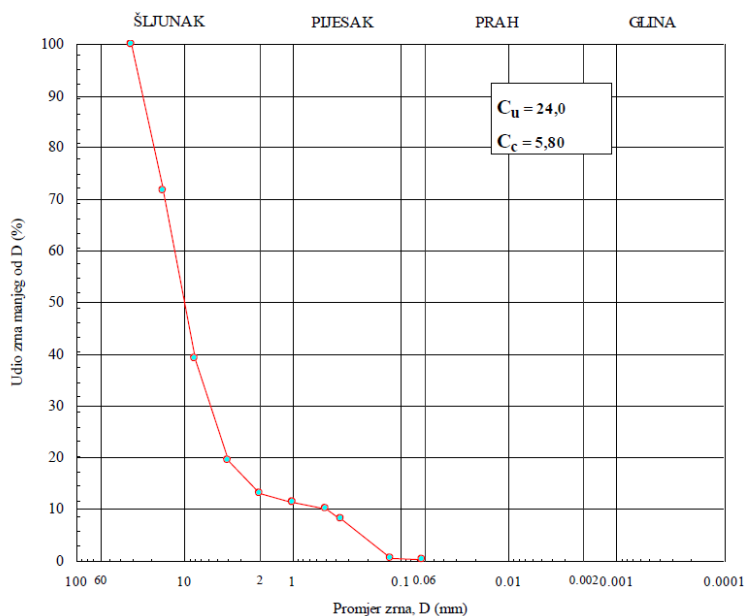
ν = kinematička viskoznost [m^2/s], koristit će se kinematička viskoznost pri $20\text{ }^\circ\text{C}$ = 10^{-5} [m^2/s]

ρ_s = gustoća uronjene mase zrna nanosa [kg/m^3] = 1800 [kg/m^3]

ρ = gustoća vode [kg/m^3], koristit će se gustoća pri $20\text{ }^\circ\text{C}$ = 998.207 [kg/m^3]

3.1 Most Botovo

Kritične vrijednosti brzine za most Botovo dobivene su temeljem ranije definirane Laursenove jednadžbe (jednadžba 1). Vrijednost srednjeg promjera zrna nanosa od $d_{50} = 0.01$ m koja figurira u jednadžbi preuzeta je iz elaborata Građevinskog fakulteta za koji su provedena mjerenja u koritu rijeke Drave u Botovu te je dobivena granulometrijska krivulja na slici (slika 13).



Slika 13. Granulometrijska krivulja mjerena u rijeci Dravi [24]

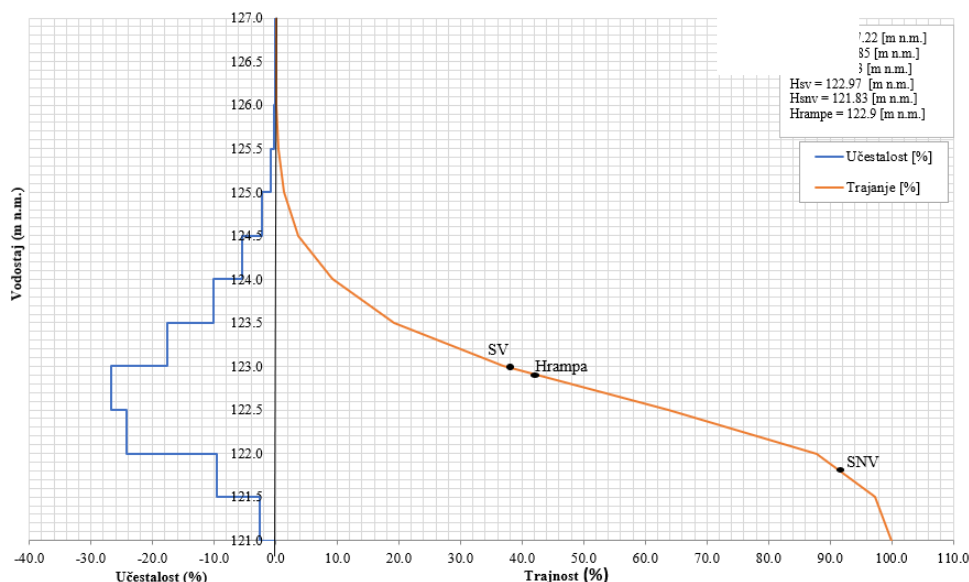
Vrijednosti izračunatih kritičnih brzina za pojedine hidrološke događaje prikazane su u tablici (tablica 5):

Tablica 5. Proračunate vrijednosti kritične brzine mosta Botovo

	h_1 [m]	v_{gr} [m/s]
VV	4.12	1.69
SV	2.19	1.52
SNV	1.8	1.47

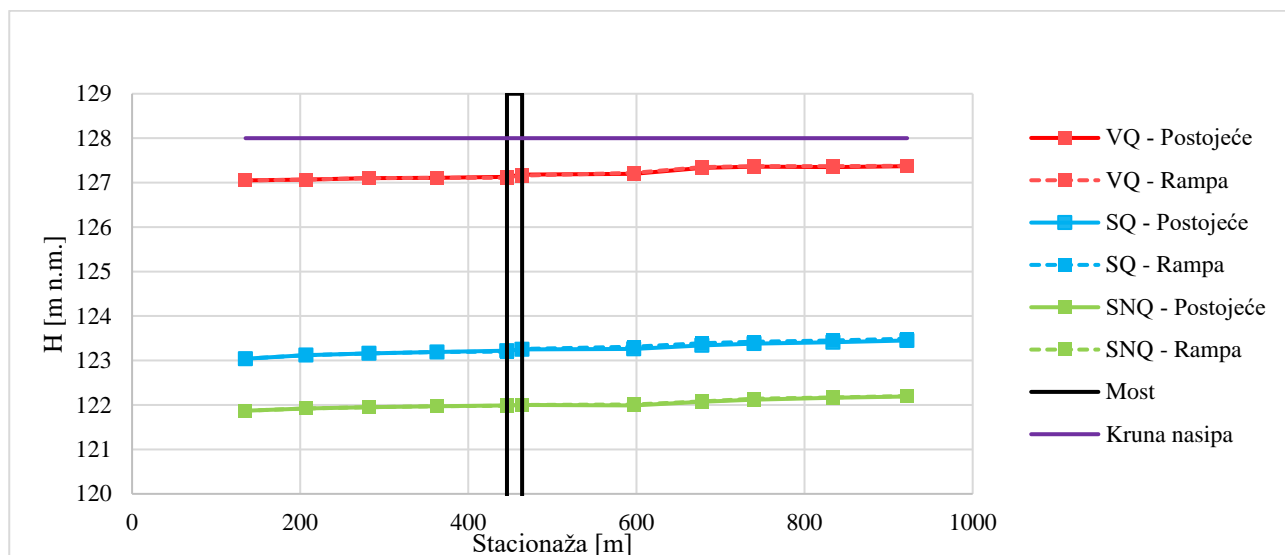
Grafično posmično naprezanje određeno je temeljem ranije prikazanog Shieldsovog dijagrama (slika 12) te pripadnih jednadžbi. Prema dijagramu, vrijednost Reynoldsovog broja veća od 200 podrazumijeva konstantnu veličinu $\tau_* = 0.06$ pa prema tome grafično posmično naprezanje iznosi $\tau_0 = 4.72 \text{ N/m}^2$.

Nadalje, prema krivulji trajanja prikazanoj na dijagramu (dijagram 9), srednji vodostaj dostignut je ili premašen 39 % vremena što je oko 142 dana u godini. Srednji niski vodostaj dostignut je ili premašen 91 % vremena, tj. oko 332 dana u godini, što ostavlja vrlo kratak period vremena od samo 33 dana za obavljanje radova u koritu. Na dijagramu je prikazana i visina rampe u odnosu na karakteristične vodostaje. Vodostaj koji će potopiti rampu dostignut je ili premašen 42 % vremena, odnosno korištenje rampe je dostupno 212 dana u godini.

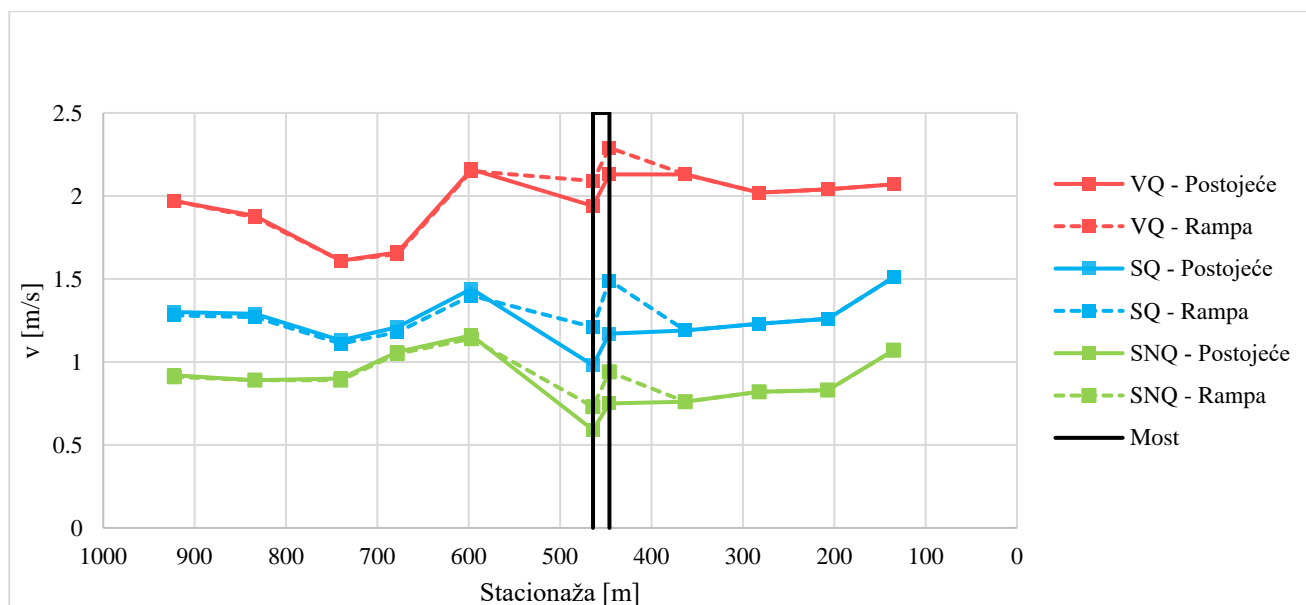


Dijagram 9. Krivulja trajanja i učestalosti vodostaja vodomjerne stanice Botovo

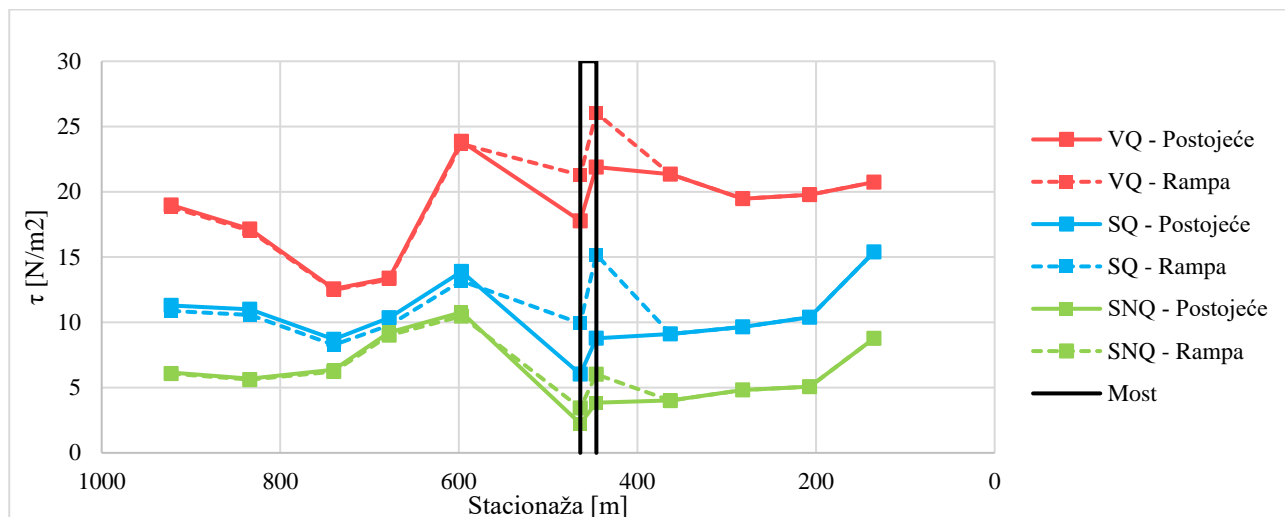
U nastavku je u obliku dijagrama prikazan uzdužni profil obrađenih podataka promjene vodostaja, brzine i posmičnog naprezanja pri uvjetima velikih, srednjih i malih voda. Vidljivo da rampa nema značajniji utjecaj na promjenu vodostaja u zoni mosta ni za jedan hidrološki događaj. Povećanje brzine i posmičnih naprezanja pri sva tri hidrološka događaja proteže se na duljini od oko 150 m uzvodno od mosta i 100 m nizvodno od mosta (dijagrami 10-12).



Dijagram 10. Utjecaj rampe na vodostaj u odnosu na postojeće stanje za most Botovo

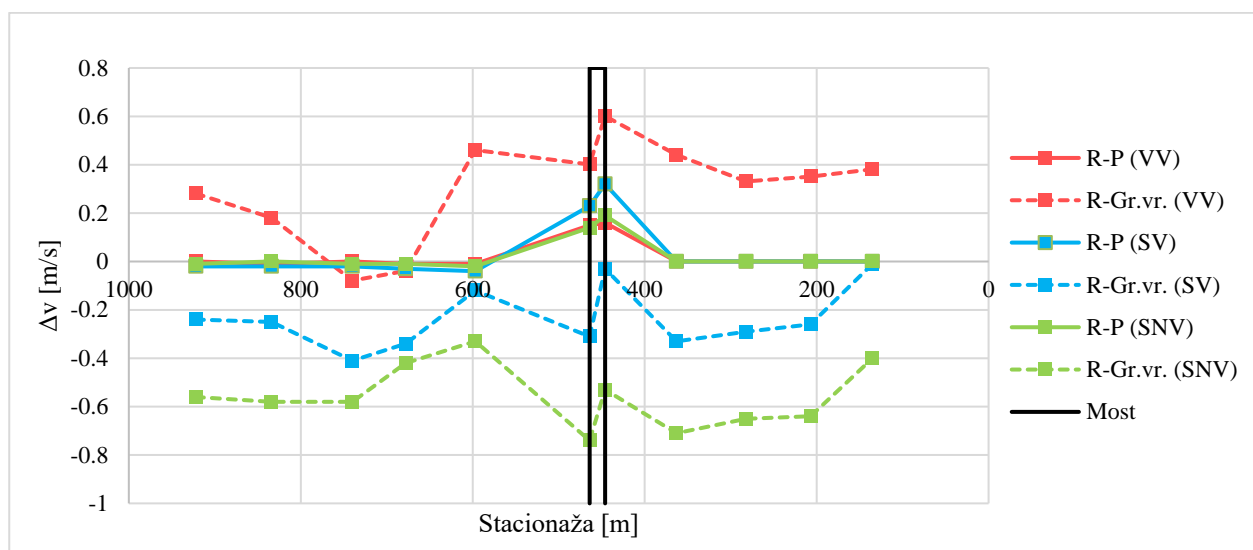


Dijagram 11. Utjecaj rampe na brzinu toka u koritu u odnosu na postojeće stanje za most Botovo



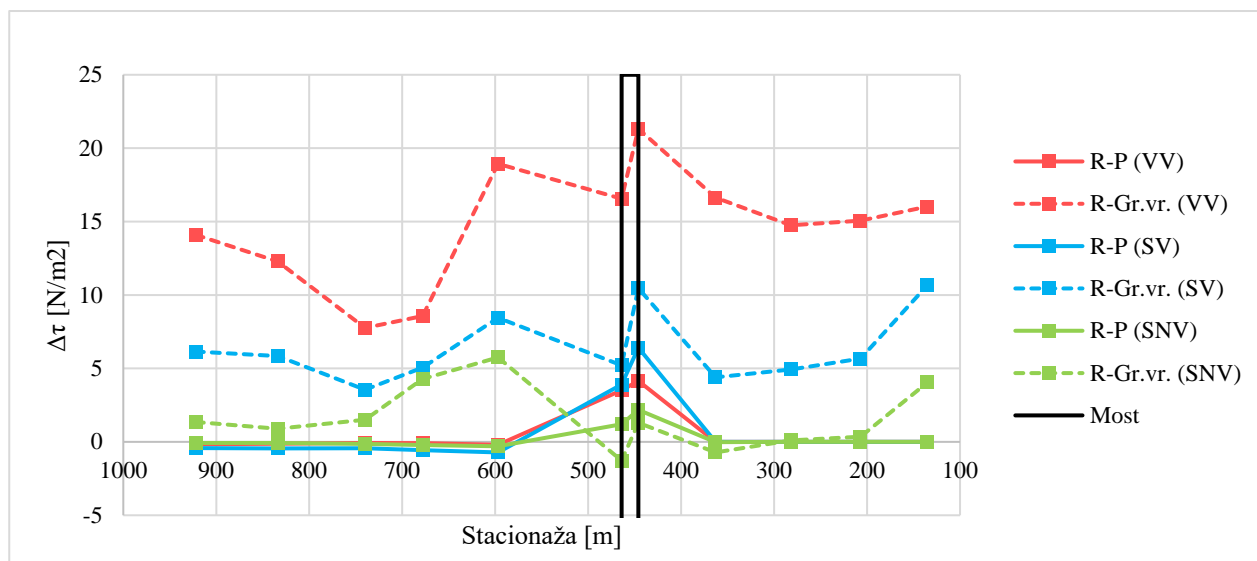
Dijagram 12. Utjecaj rampe na posmično naprezanje u koritu u odnosu na postojeće stanje za most Botovo

Očekivano je da su se u zoni mosta zbog rampe povećale brzine u odnosu na postojeće stanje. Pri stogodišnjoj vodi, povećanje brzine u odnosu na postojeće stanje iznosi u zoni mosta prosječnih 0.16 m/s, dok je granična brzina premašena za oko 0.5 m/s. Za srednjeg i niskog vodostaja ne dolazi do prekoračenja granične brzine, iako je vidljivo povećanje u odnosu na postojeće stanje.



Dijagram 13. Usporedba promjene polja brzine („višak brzine“) rampe u odnosu na postojeće stanje i graničnu vrijednost za most Botovo

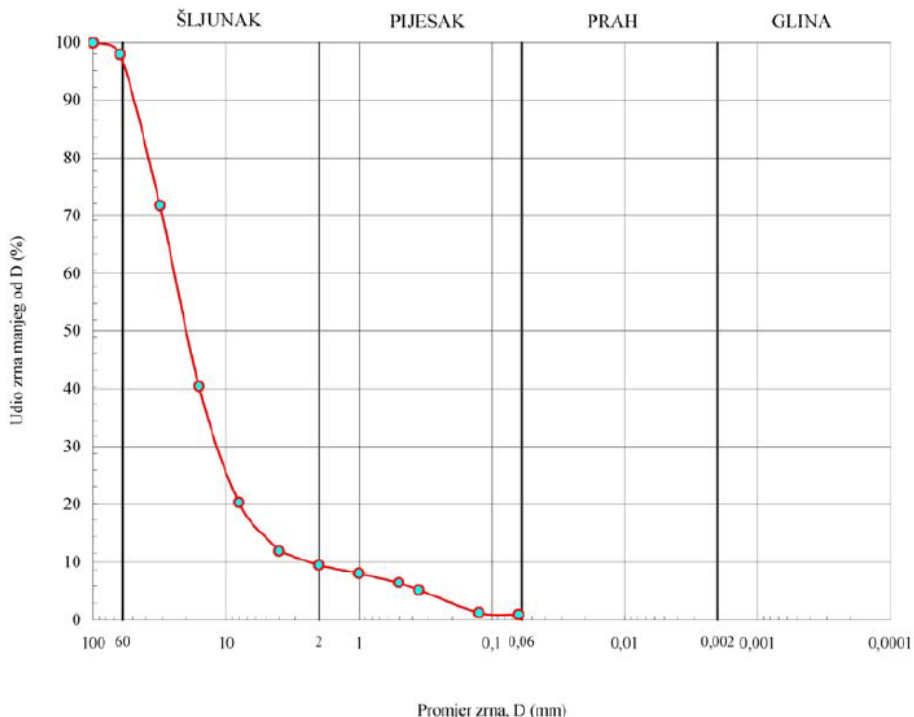
Posmična naprezanja se u zoni mosta pri stogodišnjoj vodi povećavaju za prosječnih 3.83 N/m^2 u odnosu na postojeće stanje, dok je granično posmično naprezanje premašeno za oko 18.94 N/m^2 . Pri uvjetima srednjeg vodostaja povećanje posmičnih naprezanja u odnosu na postojeće uvjete veće je za prosječnih 5.16 N/m^2 , a od graničnog posmičnog naprezanja veća su u prosjeku za 7.84 N/m^2 . Za niske vodostaje povećanje u odnosu na postojeće stanje iznosi oko 1.69 N/m^2 , a zbog malog promjera srednjeg zrna nanosa, i pri uvjetima malih voda dolazi do prekoračenja graničnih posmičnih naprezanja.



Dijagram 14. Usporedba promjene polja posmičnog naprezanja („višak posmičnog naprezanja“) rampe u odnosu na postojeće stanje i graničnu vrijednost za most Botovo

3.2 Most Jankomir

Vrijednost srednjeg promjera zrna nanosa od $d_{50} = 0.02$ m dobivena je prema granulometrijskoj krivulji na slici:



Slika 14. Granulometrijska krivulja mjerenja rijeke Save na području Zagreba [5]

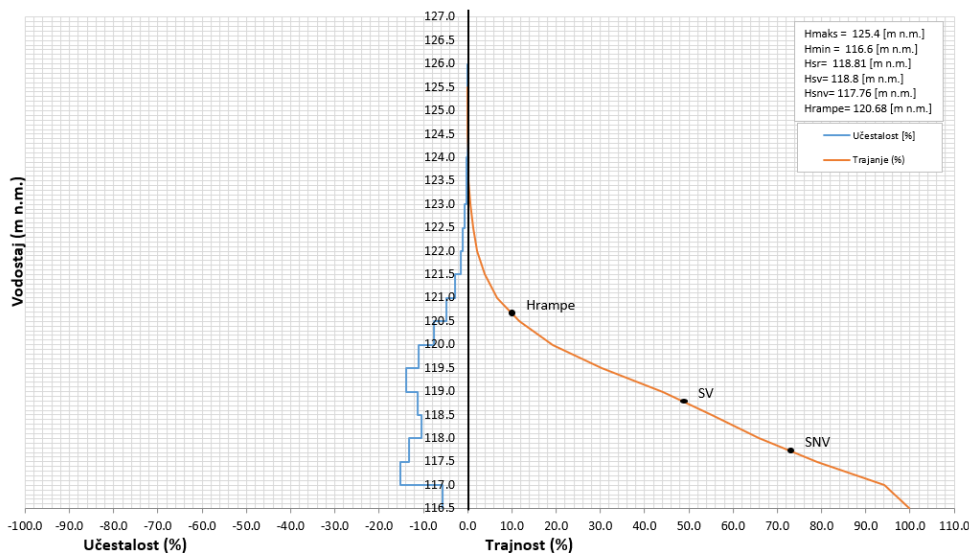
Uporabom jednadžbe 2 dobivene su veličine kritične brzine za promatrane situacije:

Tablica 6. Proračunate vrijednosti kritične brzine mosta Jankomir

	h_1 [m]	v_{gr} [m/s]
VV	4.59	2.17
SV	4.63	2.17
SNV	3.87	2.11

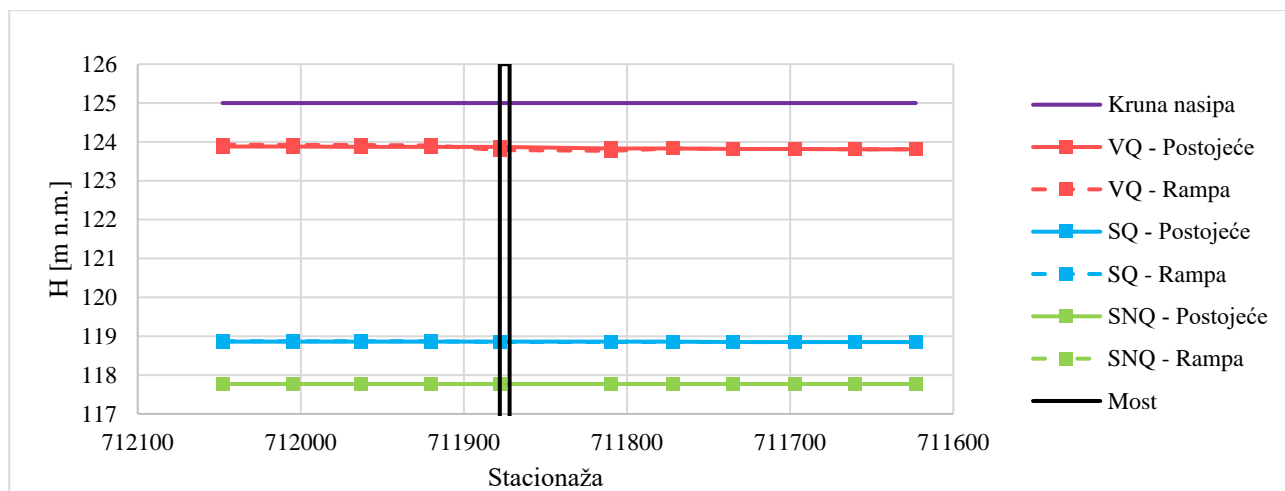
Uporabom jednadžbe 3 i korištenjem Shieldsovog dijagrama (slika 12) dobivene su veličine granične vrijednosti posmičnih naprezanja, pri čemu je vrijednost Reynoldsovog broja $R_* > 200$ te to podrazumijeva konstantnu veličinu $\tau_* = 0.06$, prema tome granično posmično naprezanje iznosi $\tau_0 = 9.44 \text{ N/m}^2$ za ovu dionicu.

Prema dijagramu 15, trajanje vodostaja iznad SV iznosi 49%, što bi otprilike iznosilo 179 dana u jednoj godini. Dok trajanje vodostaja iznad SNV iznosi 73%, to jest 267 dana u jednoj godini. Prema navedenim podacima preostaje 98 dana tokom kojih je moguće obavljati radove unutar korita. Visina rampe jednaka je visini lijeve obale. Očitano trajanje vodostaja iznad kote krune rampe iznosi 10%, te je otprilike 329 dana u godini dostupno za izvođenje radova preko rampe.

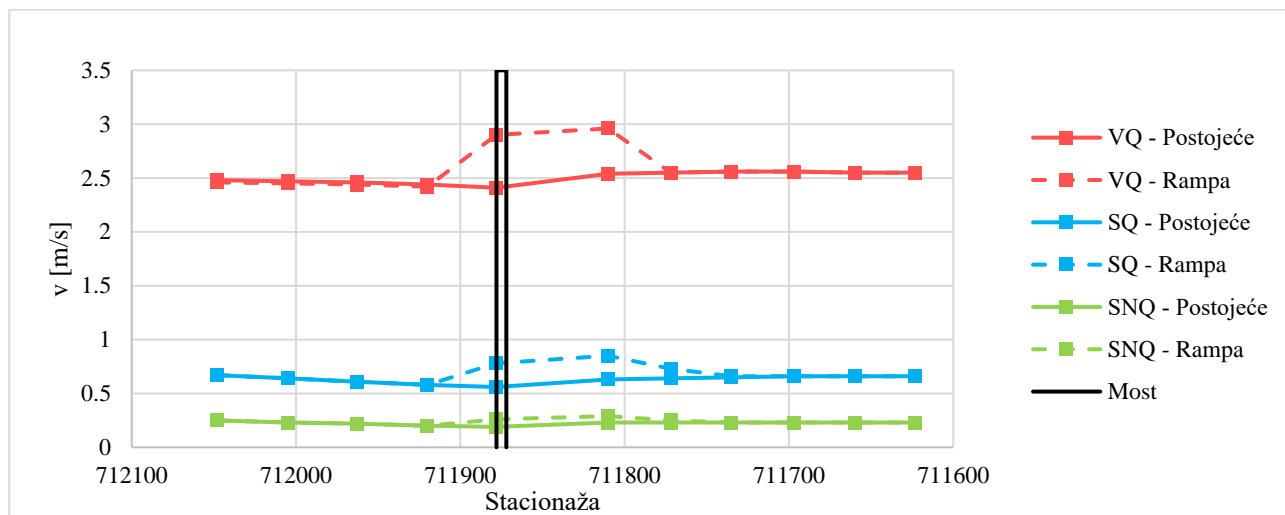


Dijagram 15. Krivulja trajanja i učestalosti vodostaja vodomjerne stanice Podsused žičara

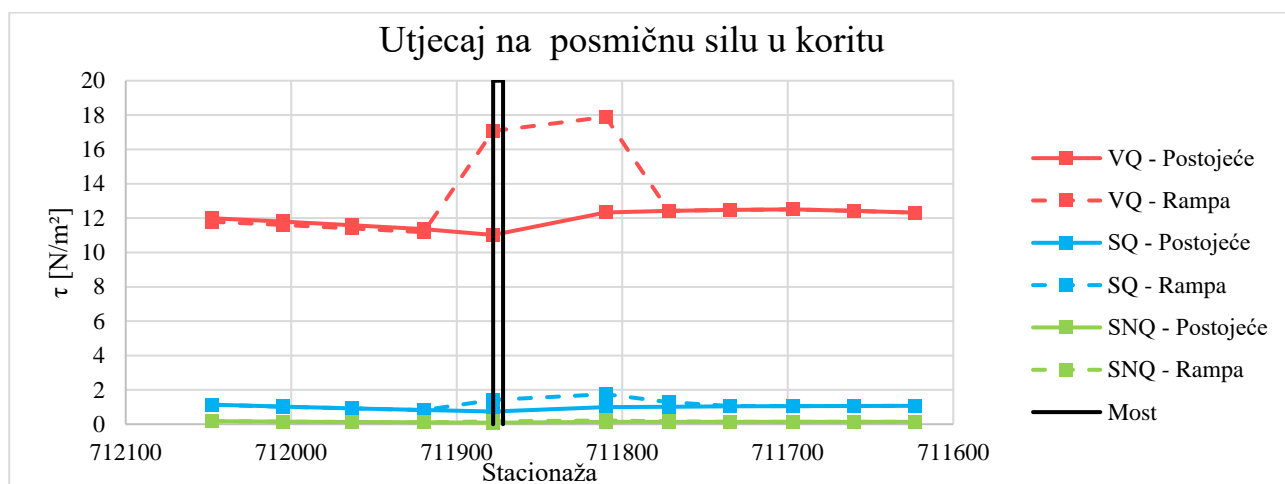
U nastavku je u obliku dijagrama prikazan uzdužni profil obrađenih podataka promjene vodostaja, brzine i posmičnog naprezanja pri uvjetima velikih, srednjih i malih voda. Rampa nema značajniji utjecaj na promjenu vodostaja u zoni mosta ni za jedan hidrološki događaj. Povećanje brzine i posmičnih naprezanja pri sva tri hidrološka događaja proteže se na duljini od oko 50 m uzvodno od mosta i 180 m nizvodno od mosta.



Dijagram 16. Prikaz utjecaja rampe na promjenu vodostaja u odnosu na postojeće stanje mosta Jankomir

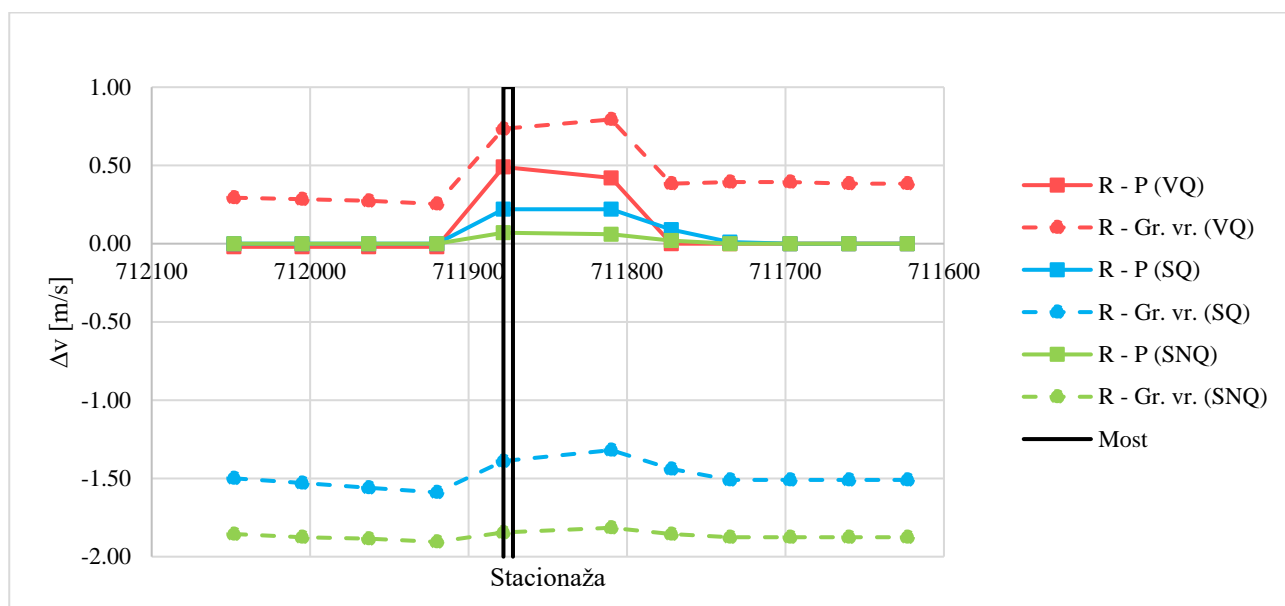


Dijagram 17. Utjecaj rampe na brzinu toka u koritu u odnosu na postojeće stanje za most Jankomir



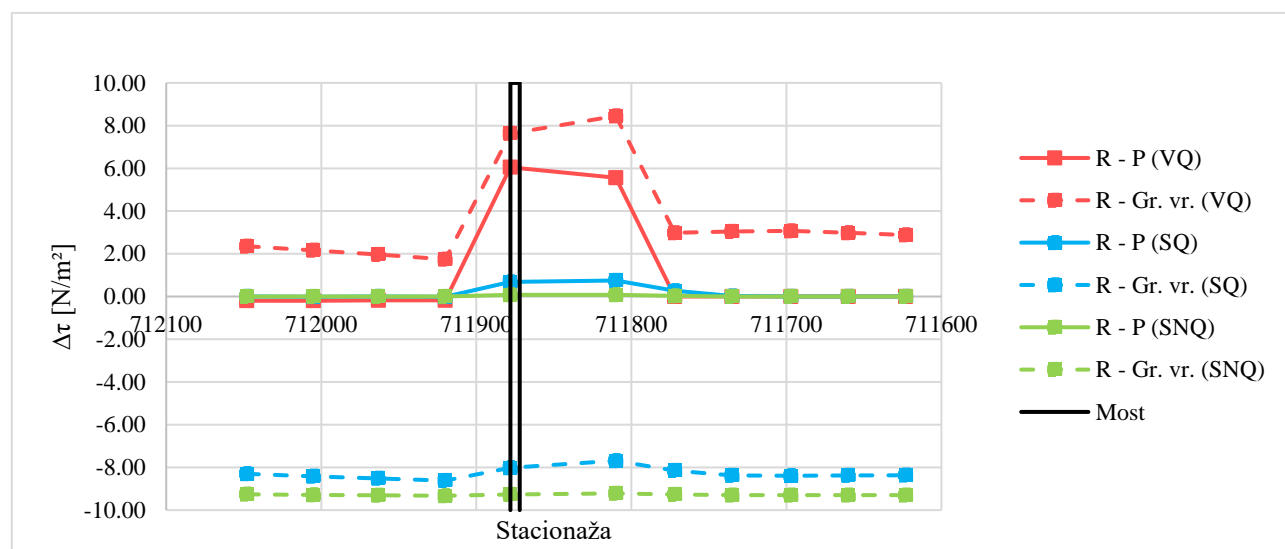
Dijagram 18. Utjecaj rampe na posmično naprezanje u koritu u odnosu na postojeće stanje za most Jankomir

Rampa ima utjecaj na povećanje brzine, očekivano zbog smanjenja površine protočnog profila. Dolazi do povećanja brzine u odnosu na situaciju s rampom, a do prelaska veličine kritične brzine dolazi pri situaciji stogodišnje vode, najveći na profilu neposredno nizvodno od mosta za iznos 0.79 m/s (dijagram 19), dok je za otprilike 0.45 m/s veća u odnosu na brzinu postojećeg stanja na profilima mosta .



Dijagram 19. Usporedba promjene polja brzine („višak brzine“) rampe u odnosu na postojeće stanje i graničnu vrijednost za most Jankomir

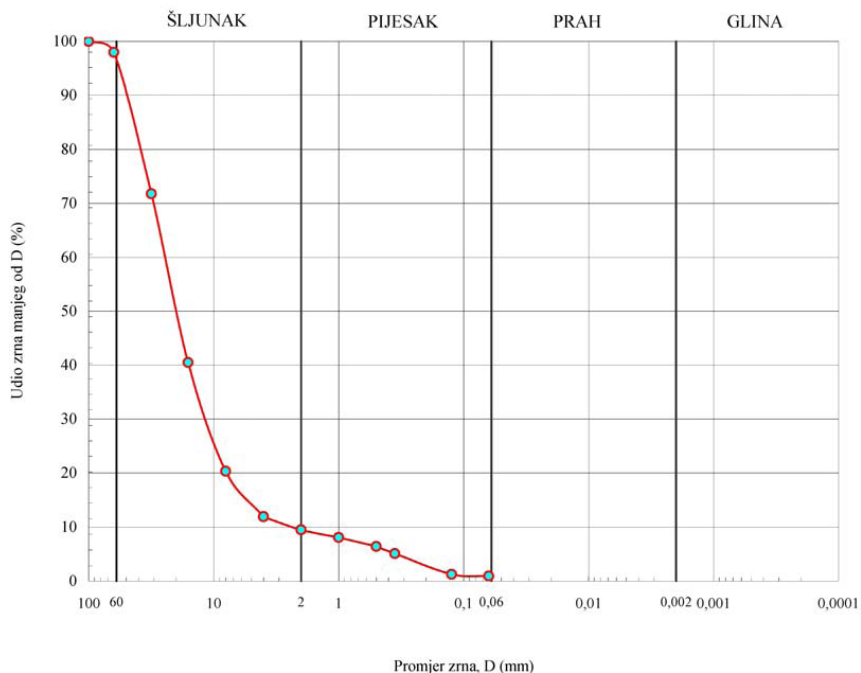
Dolazi do velikih promjena u veličinama posmičnog napreznja u situaciji s rampom na profilima neposredno uzvodno i nizvodno od mosta, što možemo vidjeti iz razlike sa postojećim stanjem i sa graničnom vrijednosti. Pri stogodišnjoj vodi dolazi do prekoračenja graničnog posmičnog napreznja u iznosu 7.63 N/m^2 uzvodno i 8.45 N/m^2 nizvodno od mosta, dok je za otprilike 5.75 N/m^2 veće u odnosu na posmično napreznje postojećeg stanja na profilima mosta (dijagram 20)



Dijagram 20. Usporedba promjene polja posmičnog napreznja („višak posmičnog napreznja“) rampe u odnosu na postojeće stanje i graničnu vrijednost za most Jankomir

3.3 Most Šamac

Vrijednost srednjeg promjera zrna nanosa od $d_{50} = 0.02$ m preuzeta je iz elaborata Građevinskog fakulteta za koji su provedena mjerenja u koritu rijeke Save kod Slavenskog Šamca te je dobivena granulometrijska krivulja prema slici (slika 15).



Slika 15. Granulometrijska krivulja rijeke Save na području Slavenskog Šamca [25]

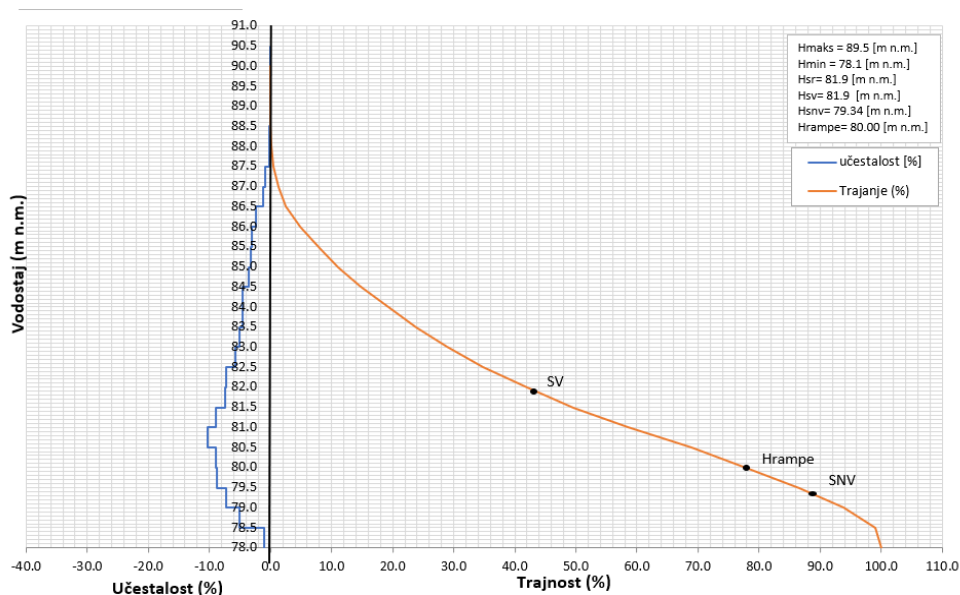
Uporabom jednadžbe 2 dobivene su veličine kritične brzine za promatrane situacije:

Tablica 7. Proračunate vrijednosti kritične brzine mosta Slavonski Šamac

	h_1 [m]	v_{gr} [m/s]
VV	7.56	2.35
SV	4.96	2.19
SNV	3.83	2.10

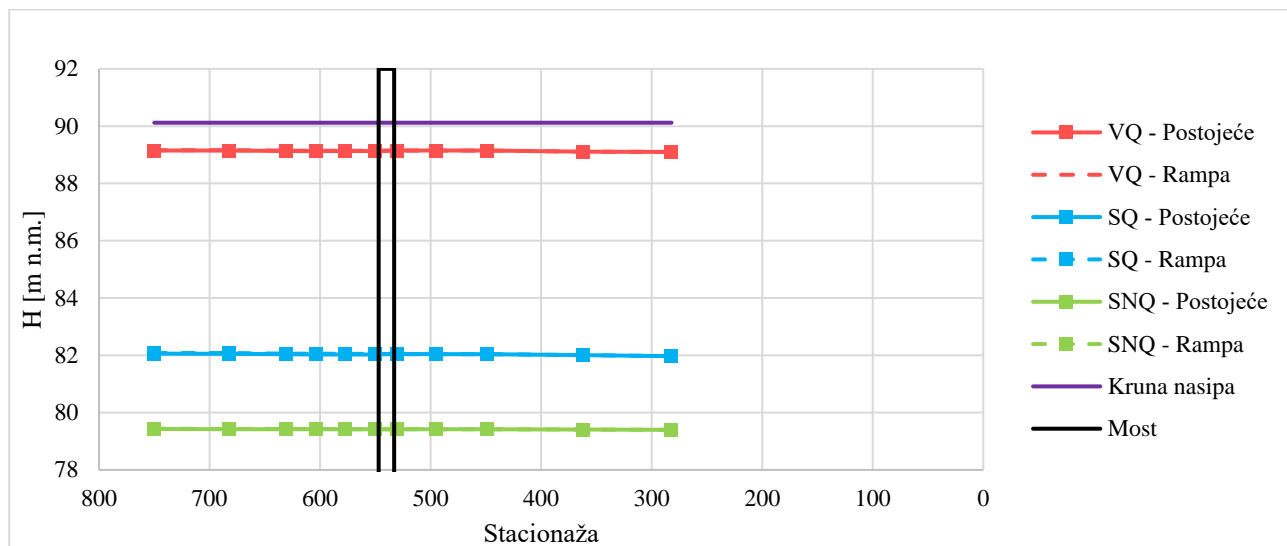
Uporabom jednadžbe 3 i korištenjem Shieldsovog dijagrama (slika 12) dobivene su iste veličine granične vrijednosti posmičnih naprezanja kao za most Jankomir zbog iste vrijednosti d_{50} , pri čemu je vrijednost Reynoldsovog broja $R_* > 200$ te to podrazumijeva konstantnu veličinu $\tau_* = 0.06$, prema tome granično posmično naprezanje iznosi $\tau_0 = 9.44$ N/m² za ovu dionicu.

Iznos trajanja vodostaja iznad SV iznosi 43%, što bi otprilike iznosilo 157 dana u jednoj godini. Dok trajanje vodostaja iznad SNV iznosi 89%, što bi otprilike iznosilo 325 dana u jednoj godini (dijagram 21). Prema tome ostaje samo 40 dana prigodnih za obavljanje radova u koritu, te oni moraju biti brzo i efikasno odrađeni. Očitano trajanje vodostaja iznad kote krune rampe iznosi 78%, te je otprilike 80 dana u godini dostupno za izvođenje radova preko rampe.

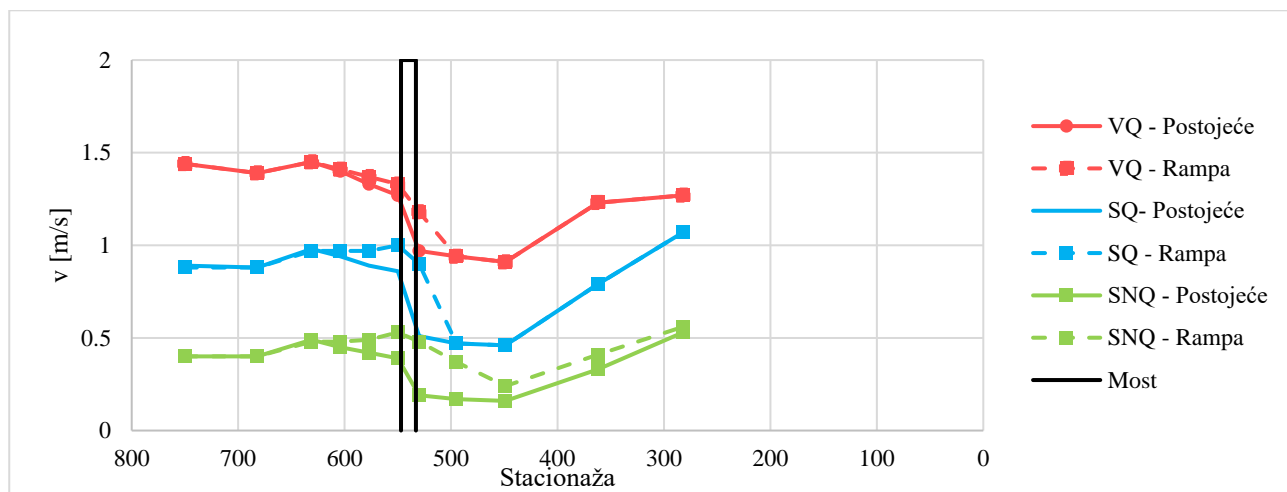


Dijagram 21. Krivulja trajanja i učestalosti vodostaja vodomjerne stanice Slavonski Šamac

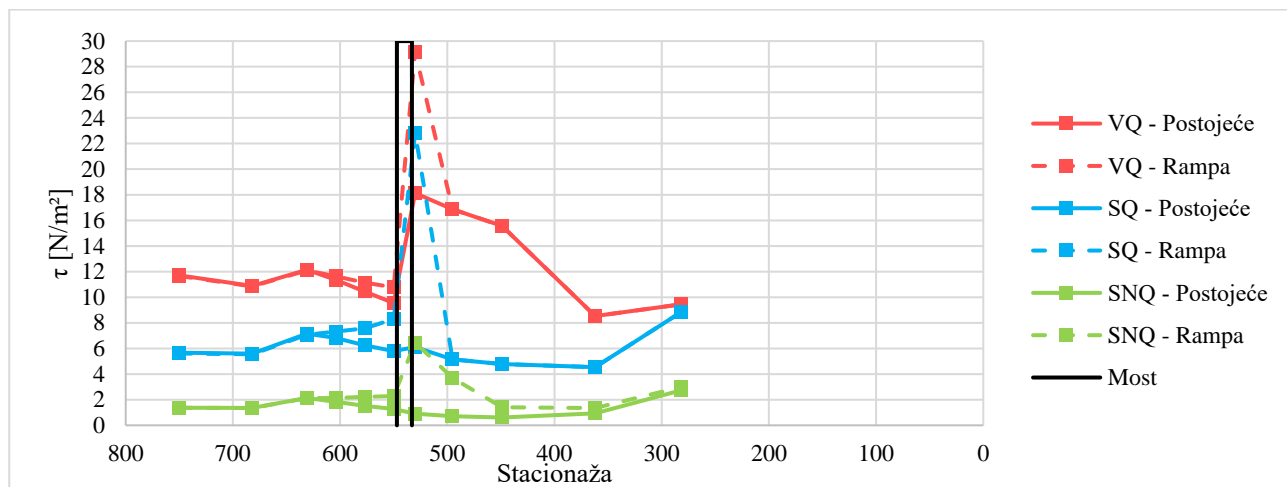
Prema prikazu utjecaja rampe na vodostaj (dijagram 22), možemo primijetiti da rampa nema veliki utjecaj na povećanje vodostaja iako značajno smanjuje protočni profil, što je posljedica širokog korita. Također ni pri pojavi stogodišnje vode ne prelazi kotu krune nasipa koja iznosi 90.12 m n.m.. Povećanje brzine i posmičnih naprezanja pri sva tri hidrološka događaja proteže se na duljini od oko 80 m uzvodno od mosta. Utjecaj rampe na tok nizvodno od mosta najveći je za male vode i proteže u duljini od otprilike 250m za male vode. Duljina djelovanja rampe pri velikoj vodi i srednjoj vodi je puno manja, a razlog tome je to što je tok pri maloj vodi koncentriran u koritu doka pri srednjoj i velikoj vodi dolazi do prelijevanja preko rampe.



Dijagram 22. Prikaz utjecaja rampe na promjenu vodostaja u odnosu na postojeće stanje mosta Slavonški Šamac

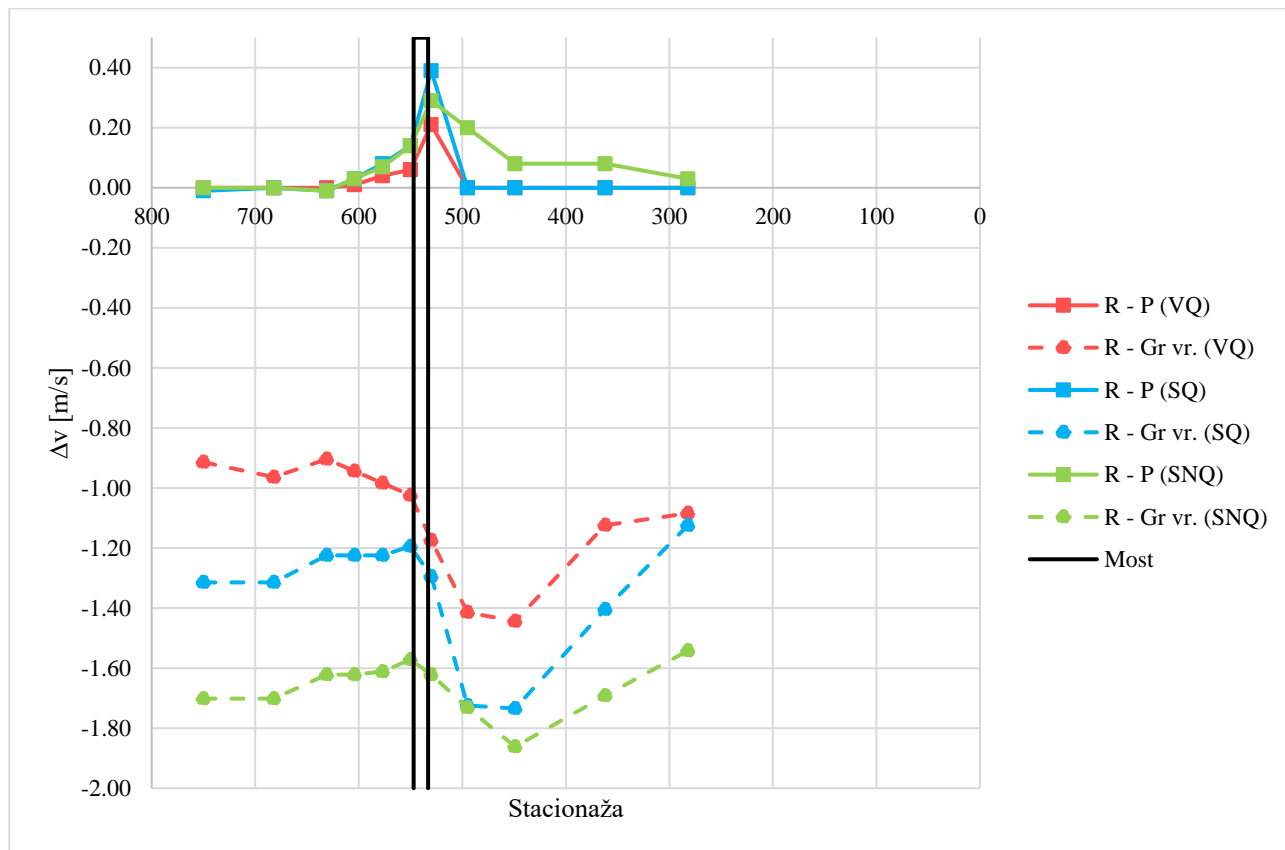


Dijagram 23. Utjecaj rampe na brzinu toka u koritu u odnosu na postojeće stanje za most Slavonški Šamac



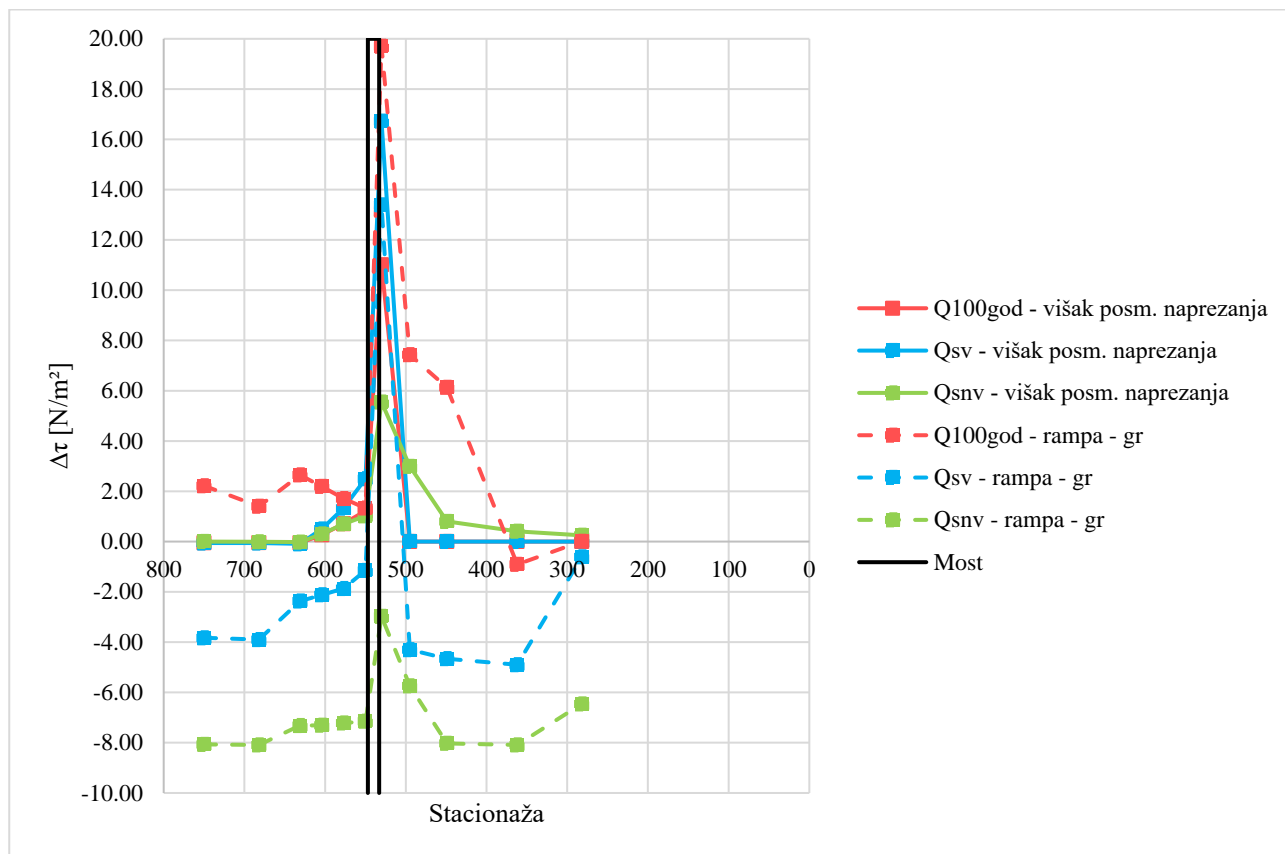
Dijagram 24. Utjecaj rampe na posmično naprezanje u koritu u odnosu na postojeće stanje za most Slavonški Šamac

Rampa ima utjecaj na povećanje brzine, očekivano zbog smanjenja površine protočnog profila. Međutim iako dolazi do povećanja brzine u odnosu na situaciju s rampom, ne dolazi do prelaska veličine kritične brzine izračunate za situaciju stogodišnje vode, srednje vode niti srednje niske vode (dijagram 25).



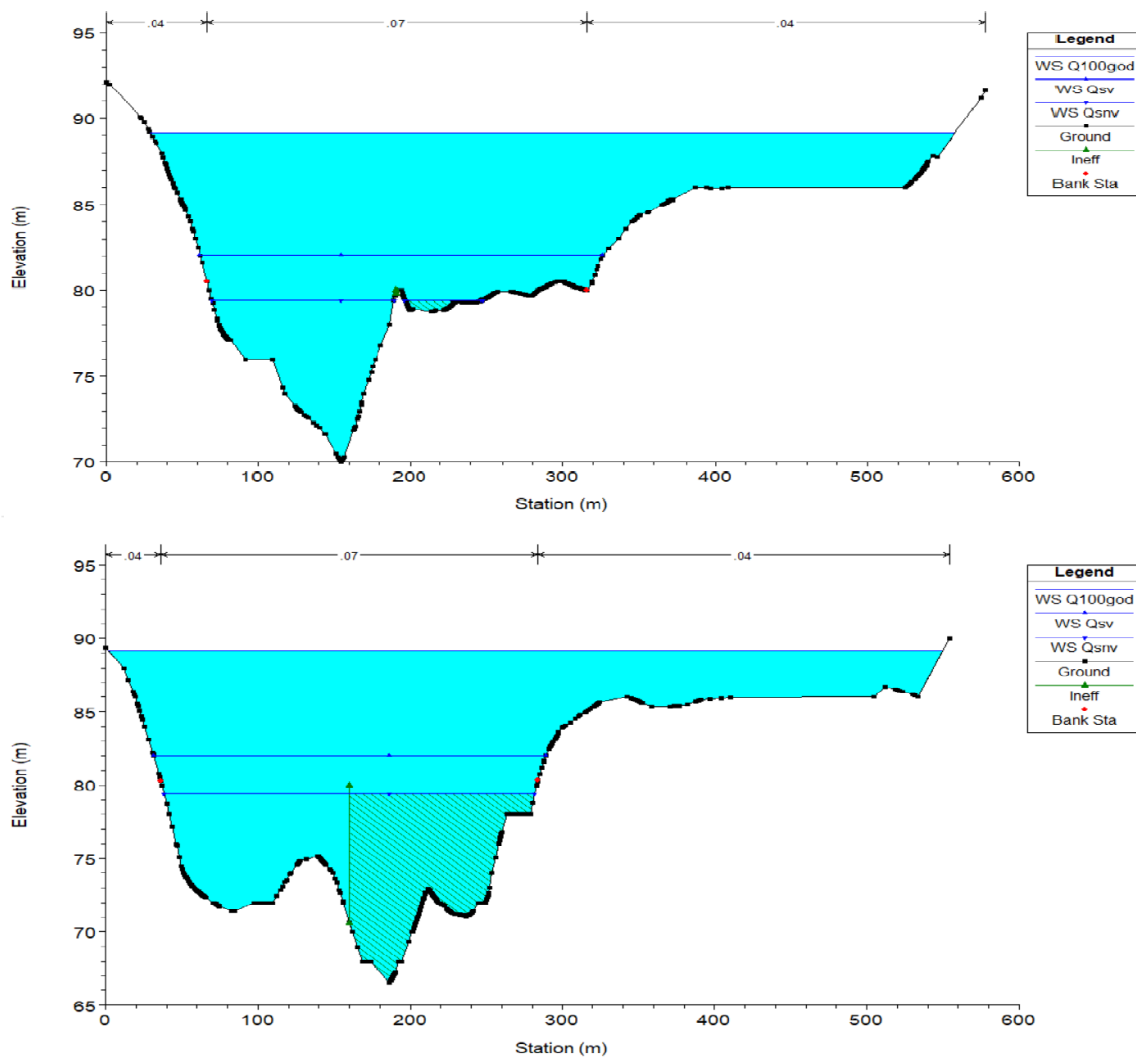
Dijagram 1. Usporedba promjene polja brzine („višak brzine“) rampe u odnosu na postojeće stanje i graničnu vrijednost za most Slavonski Šamac

Rampa ima najveći utjecaj na povećanje posmičnog naprezanja nizvodno od mosta, što možemo vidjeti iz razlike sa postojećim stanjem i sa graničnom vrijednosti. U slučaju stogodišnje vode prelazi granično posmično naprezanje u iznosu od 19.70 N/m^2 , dok čak pri srednjoj vodi na profilu neposredno nizvodno od mosta stvara razliku od 16.72 N/m^2 . Uz to u odnosu na stogodišnju vodu u postojećem stanju, iznos posmičnog naprezanja pri stanju s rampom na profilu nizvodno od mosta veći je za 11.01 N/m^2 , a u odnosu na srednju vodu veći je za 13.39 N/m^2 (dijagram 26).



Dijagram 26. Usporedba promjene polja posmičnog naprezanja („višak posmičnog naprezanja“) rampe u odnosu na postojeće stanje i graničnu vrijednost za most Slavonski Šamac

Posljedicu ovakvog djelovanja možemo vidjeti na snimljenom profilu iza postojeće rampe mosta Slavonski Šamac. Budući ova rampa nije uklonjena nakon što je izvršila svoju funkciju pri izvedbi radova na mostu, došlo je do produbljenja korita pored (suženje profila) i iza rampe (stvaranja vodnog skoka pri većim vodama). Prema slici (slika 16), primjećujemo da se prema lijevoj obali kota dna korita produbljuje za 4m (RS: 530, nizvodni profil mosta), dok nizvodno od same rampe pod djelovanjem vodnog skoka dolazi do produbljenja za čak 4.5m (RS: 495).



Slika 16. Usporedba poprečnog presjeka RS:530 i RS:495

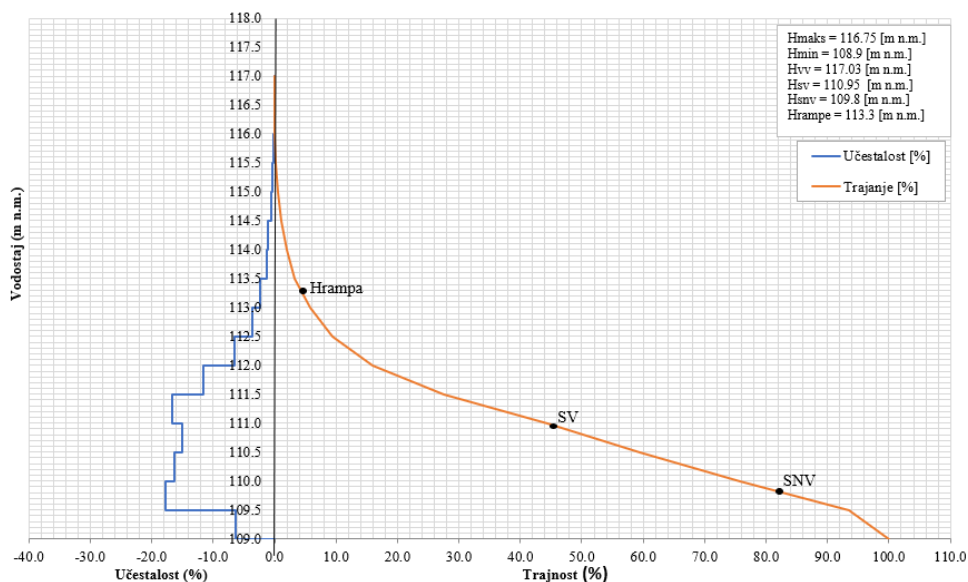
3.4 Savski most

Kritične vrijednosti brzine za Savski most također su dobivene temeljem ranije definiranih obrazaca. Vrijednost srednjeg promjera zrna nanosa iznosi $d_{50} = 0.02$ m, a određena je prema granulometrijskoj krivulji za rijeku Savu, kao što je ranije prikazano na slici (slika 14) [5]. Vrijednosti izračunatih kritičnih brzina za pojedine hidrološke događaje prikazane su u tablici (tablica 8):

Tablica 8. Proračunate vrijednosti kritične brzine Savski most

	h_1 [m]	v_{gr} [m/s]
VV	4.83	2.18
SV	2.34	1.94
SNV	1.27	1.75

Granično posmično naprezanje određeno je kao i za prethodne slučajeve, temeljem Shieldsovog dijagrama (slika 12) te pripadnih jednadžbi. Prema dijagramu, vrijednost Reynoldsovog broja veća od 200 podrazumijeva konstantnu veličinu $\tau^* = 0.06$ pa prema tome granično posmično naprezanje iznosi $\tau_0 = 9.44$ N/m².



Dijagram 27. Krivulja trajanja i učestalosti vodostaja vodomjerne stanice Zagreb

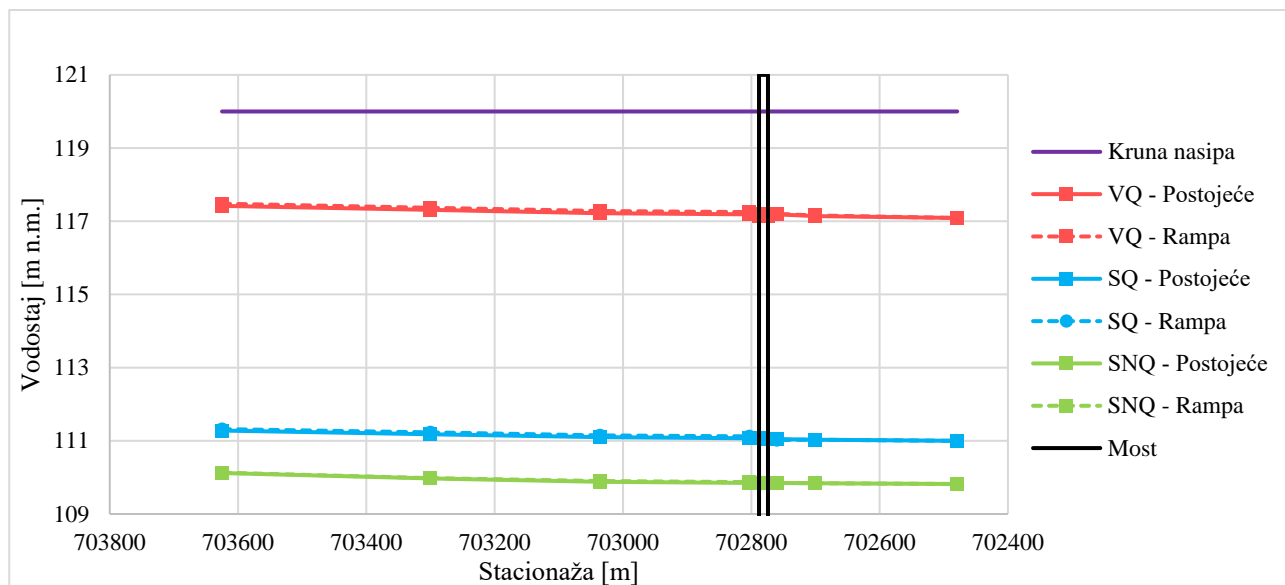
Prema krivulji trajanja prikazanoj na dijagramu 27, srednji vodostaj dostignut je ili premašen 45 % vremena što je oko 164 dana u godini. Srednji niski vodostaj dostignut je ili premašen 82 %

vremena, tj. oko 299 dana u godini, što ostavlja period vremena od 66 dana za obavljanje radova u koritu. Na dijagramu je prikazana i visina rampe u odnosu na karakteristične vodostaje. Prema krivulji trajanja, vodostaj koji odgovara visini rampe dostignut je ili premašen svega 4 % vremena, tj. oko 19 dana zbog čega bi u teoriji radovi u koritu trebali biti mogući dobar dio godine. No tijekom sanacije lijevog stupa Savskog mosta 2022. godine, desili su se hidrološki uvjeti zbog kojih je rampa bila potopljena od kraja ožujka do početka lipnja što ukazuje na izvanredne okolnosti nepredvidive prirode. Na slikama (slika 17) prikazana su opažanja na terenu.

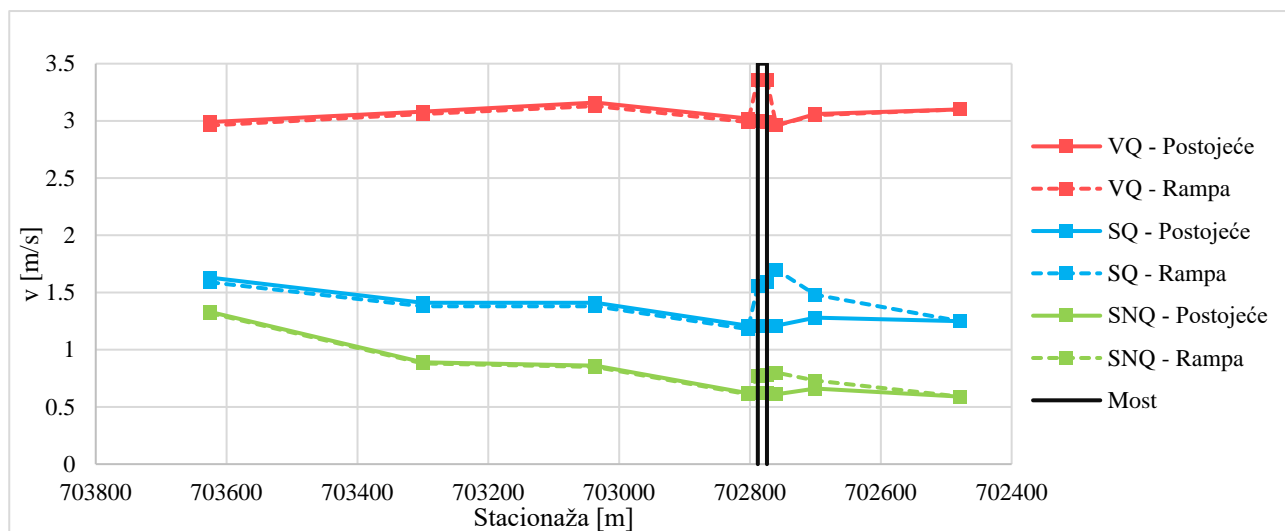


Slika 17. Zabilježena opažanja na Savskom mostu (25.3.2022. – gore lijevo, 1.4. 2022. – gore desno, 11.4. 2022. – dolje lijevo, 24.6. 2022. – dolje desno)

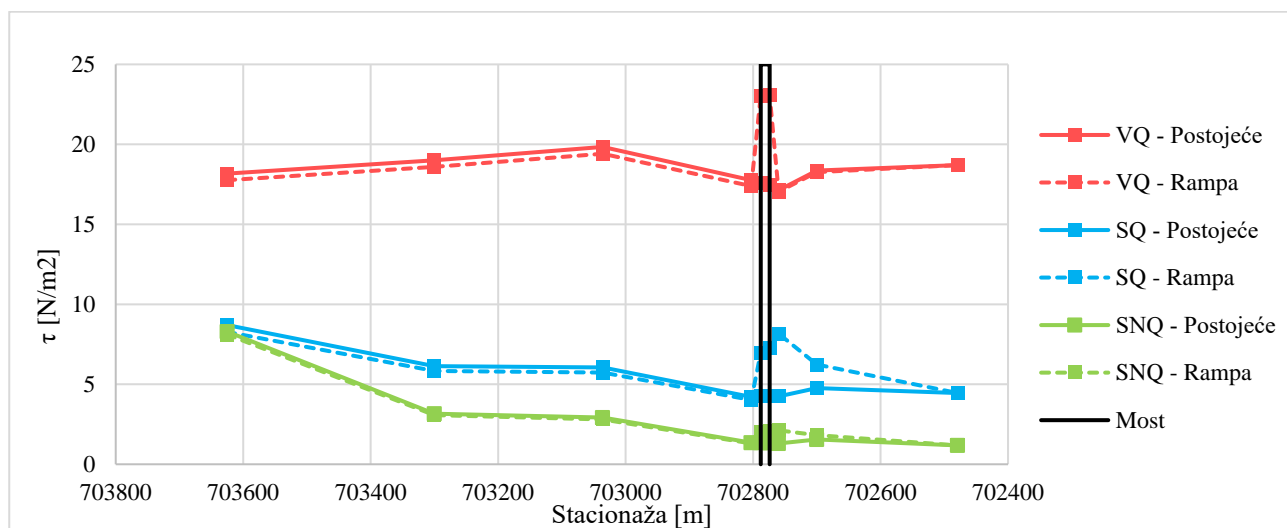
U nastavku je u obliku dijagrama prikazan uzdužni profil obrađenih podataka promjene vodostaja, brzine i posmičnog naprezanja pri uvjetima velikih, srednjih i malih voda. Iz grafova je vidljivo da rampa nema značajniji utjecaj na promjenu vodostaja u zoni mosta ni za jedan hidrološki događaj. Povećanje brzine i posmičnih naprezanja pri stogodišnjoj vodi obuhvaća uglavnom profile neposredno prije i neposredno nakon mosta, dok se povećanje brzine i posmičnog naprezanja pri uvjetima srednjih i niskih vodostaja osim u zoni neposredno uz most, proteže oko 250 m nizvodno.



Dijagram 28. Utjecaj rampe na vodostaj u odnosu na postojeće stanje za Savski most

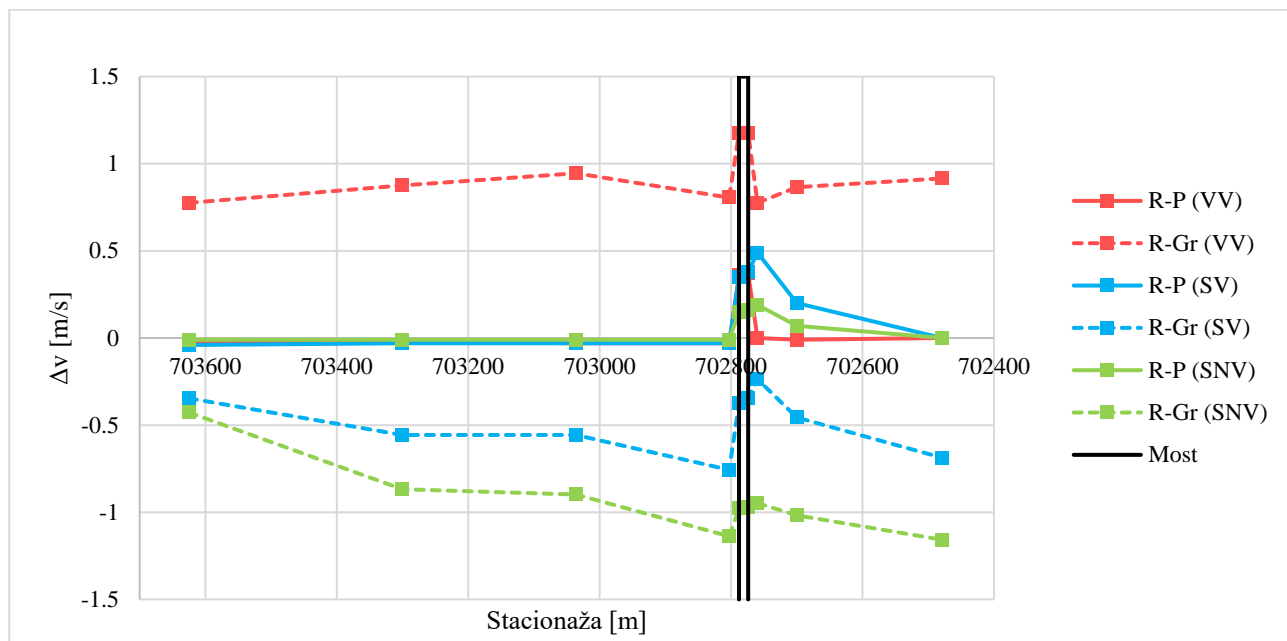


Dijagram 29. Utjecaj rampe na brzinu toka u koritu u odnosu na postojeće stanje za Savski most



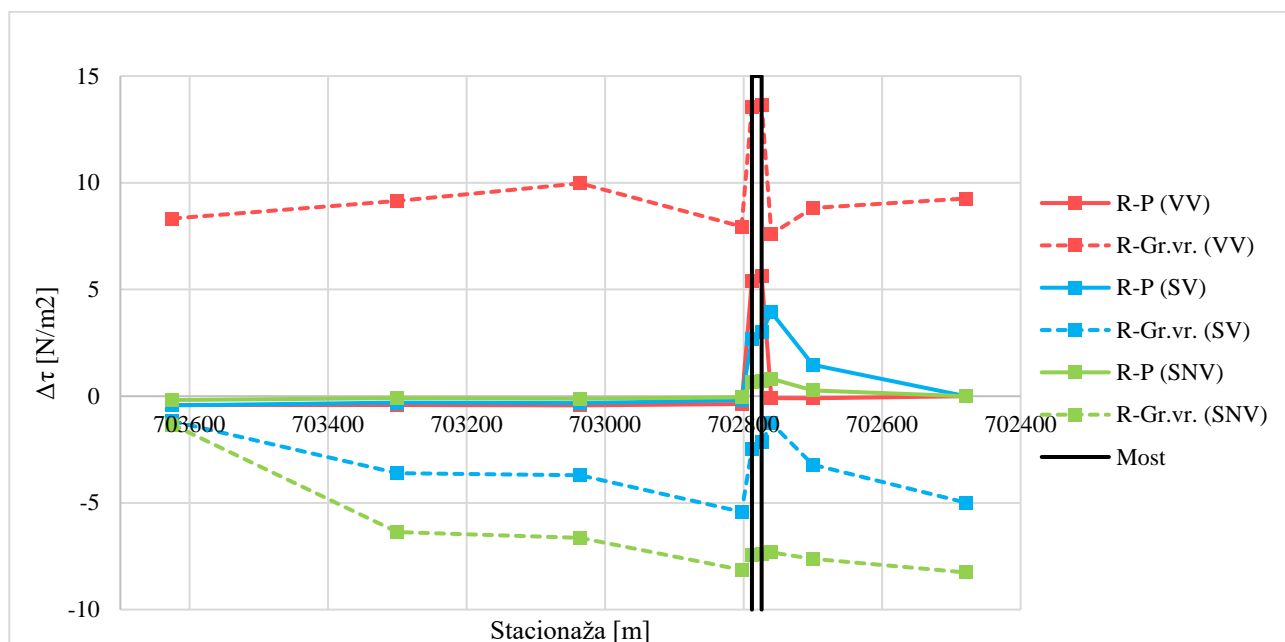
Dijagram 30. Utjecaj rampe na posmično naprezanje u koritu u odnosu na postojeće stanje za Savski most

Očekivano je da su se u zoni mosta zbog rampe povećale brzine u odnosu na postojeće stanje. Pri stogodišnjoj vodi, povećanje brzine u odnosu na postojeće stanje iznosi oko 0.36 m/s, dok je granična brzina premašena za oko 1.2 m/s. Pri uvjetima srednjeg vodostaja povećanje brzine u odnosu na postojeće uvjete također je veće za oko 0.36 m/s. Za srednjeg i niskog vodostaja ne dolazi do prekoračenja granične brzine



Dijagram 31. Usporedba promjene polja brzine („višak brzine“) rampe u odnosu na postojeće stanje i graničnu vrijednost za Savski most

Sličan uzorak kao kod povećanja brzine može se primijetiti i kod povećanja posmičnog naprezanja. Pri stogodišnjoj vodi, povećanje posmika u odnosu na postojeće stanje u zoni mosta iznosi u prosjeku 5.5 N/m^2 , dok je granični posmik premašen za oko 13.5 N/m^2 . Pri uvjetima srednjeg vodostaja povećanje posmičnih naprezanja u odnosu na postojeće uvjete veće je za prosječnih 2.5 N/m^2 , dok za niske vodostaje povećanje iznosi 2 N/m^2 . Za srednjeg i niskog vodostaja ne dolazi do prekoračenja graničnih posmičnih naprezanja.

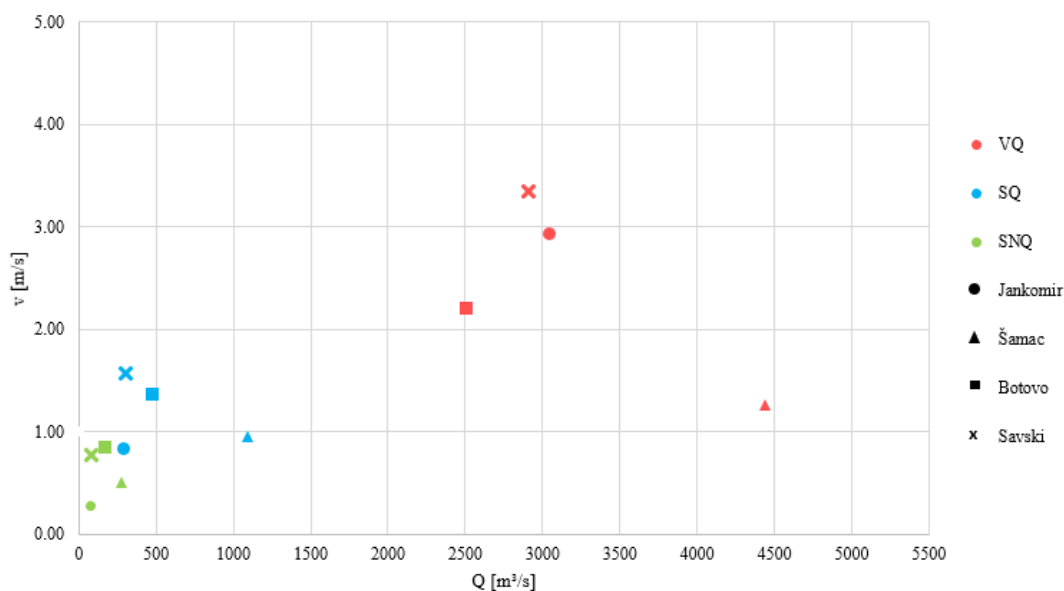


Dijagram 32. Usporedba promjene polja posmičnog naprezanja („višak posmičnog naprezanja“) rampe u odnosu na postojeće stanje i graničnu vrijednost za Savski most

3.5 Zajednička analiza

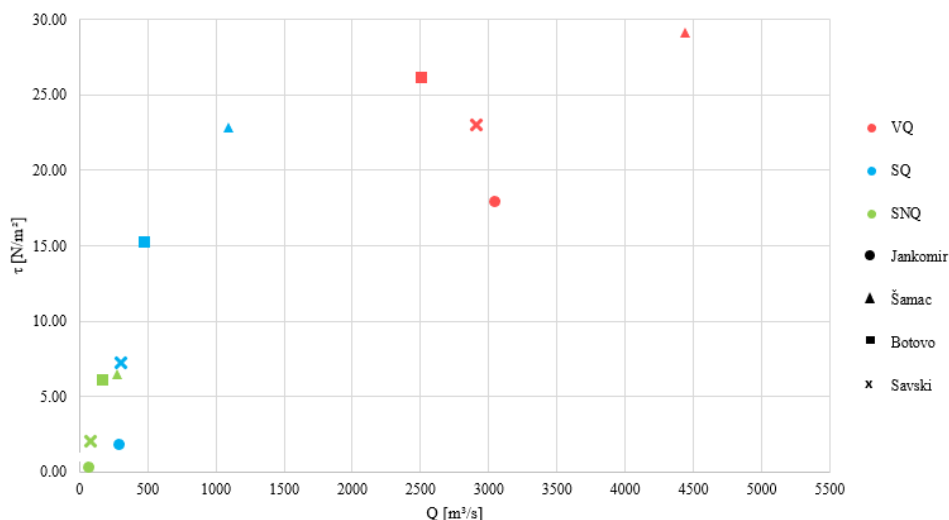
Na temelju analize promjene uzdužnih profila brzine i posmičnog naprezanja nakon izgradnje pristupne rampe za svaki most pojedinačno, može se uočiti opći trend utjecaja na povećanje brzine i na povećanje posmičnih naprezanja u okolici mosta. Rampa ima veći utjecaj nizvodno nego uzvodno, u duljini jednakoj otprilike jednoj do dvije širine glavnog korita rijeke što je vidljivo prema prethodno prikazanim dijagramima svakog mosta pojedinačno.

Ako se iscrta odnos protoka i brzine toka zajednički za sve mostove (dijagram 33) onda je vidljivo da za sve mostove postoji pozitivna korelacija između brzine toka i protoka. Između male i srednje vode postoji linearna zavisnost, dok prirast brzine opada s povećanjem protoka do velike vode. Najveće brzine se javljaju na Savskom mostu, dok se najmanje javljaju na mostu Slavonski Šamac.



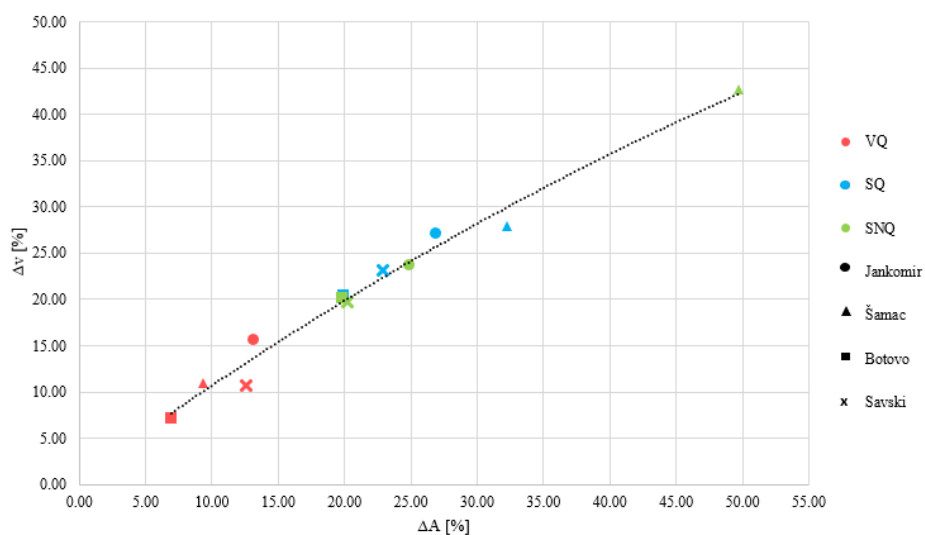
Dijagram 33. Zavisnost protoka i brzine toka pri situaciji s rampom

Sličan trend vidljiv je i za odnos protoka i posmičnog naprezanja (dijagram 34). Za sve mostove postoji pozitivna korelacija između protoka i posmičnog naprezanja. Između male i srednje vode postoji linearna zavisnost, dok prirast posmičnog naprezanja opada s povećanjem protoka do velike vode. Najveća posmična naprezanja javljaju na mostu Slavonski Šamac, dok se najmanja javljaju na mostu Jankomir.



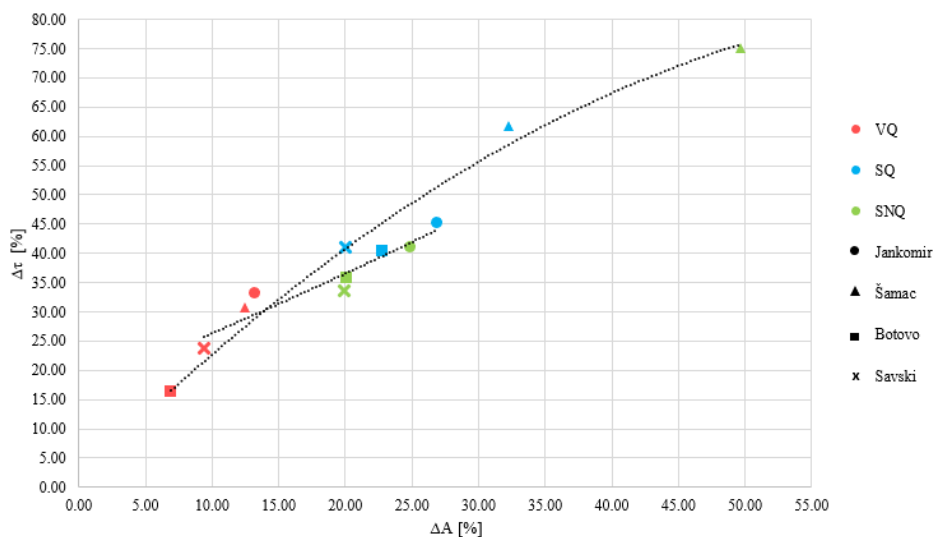
Dijagram 34. Zavisnost protoka i posmičnog naprezanja pri situaciji s rampom

Iako porast brzine toka i posmičnog naprezanja pokazuje pozitivnu korelaciju s protokom za sve mostove, vidljivo je da se intenzitet promjena mijenja, odnosno most s najvećim povećanjem brzine toka nije onaj s najvećim povećanjem posmičnog naprezanja. Za most Slavonski Šamac je obrnuta situacija – ima najveći prirast posmičnog naprezanja, a najmanji prirast brzine toka. Ako se promotri zavisnost promjene brzine toka s dimenzijama rampe, odnosno suženjem protočnog profila, onda je vidljivo da za sve mostove postoji gotovo identična linearna zavisnost (dijagram 35).



Dijagram 35. Odnos promjene polja brzina i promjene protočne površine za stanje s rampom i bez

Ovo upućuje na činjenicu da zbog velike protočne površine utjecaj promjene nagiba energetske linije nema značajan utjecaj na brzinu toka. Ako se promotri zavisnost promjene posmičnog napreznja s dimenzijama rampe, odnosno suženjem protočnog profila, onda je vidljivo da ne postoji zajednička zavisnost za sve mostove (dijagram 36), već je vidljiv trend odstupanja zagrebačkih mostova od druga dva, dok je za Savski most naročito izražen lokalni utjecaj na prijelazu iz male u srednju vodu.



Dijagram 36. Odnos promjene posmičnog napreznja i promjene protočne površine za stanje s rampom i bez

Iz navedene analize vidljivo je da iako porast brzine toka i posmičnih napreznja prati sličan trend, ne može se samo na temelju jednog parametra ocjenjivati utjecaj na eroziju mostovskog profila. Brzina toka je manje osjetljiva na lokalne promjene geometrije, dok na posmično napreznje u mostovskom profilu utječe lokalni nagib energetske linije koji ovisi o kontrakciji korita uslijed gradnje rampe.

4 ZAKLJUČAK

Upravljanje i održavanje mostova je važno zbog njihovog značenja u prometnoj infrastrukturoj mreži i snažne poveznice s ekonomskom djelatnosti te društvom u cjelini. Obzirom da se oko 60 % svih otkazivanja mostova povezuje s hidrauličkim uzrocima, posebno je bitno održavanje dijelova donjeg ustroja koji zadiru u vodotok. Stupovi i upornjaci u vodotoku remete strujnu sliku te izazivaju pojačanu eroziju koja se dodatno intenzivira izgradnjom pristupne rampe tijekom sanacije stupova. Iako je rampa praktično rješenje za obavljanje radova u koritu, nepovoljno mijenja hidrološko-hidrauličke karakteristike toka u zoni oko mosta. Zbog toga je važno prilikom izvođenja radova voditi računa o režimu voda kako suženje korita izazvano gradnjom rampe ne bi uzrokovalo promjene u koritu koje bi mogle utjecati na druge građevine kao što su nasipi ili mostovi u blizini. Također je potrebno voditi računa da se nakon izvedbe radova saniraju promjene u koritu, kao što su produbljivanje dna korita radi suženja protočnog profila na mjestu rampe te djelovanja vodnog skoka iza rampe.

Ovaj rad daje pregled utjecaja gradnje pristupne rampe i njezinih dimenzija na strukturu polja tečenja u okolici stupova mosta za 4 mosta aktualna zbog njihovih nedavnih sanacija. Obradom hidroloških, batimetrijskih i hidrografskih podataka te postavljanjem modela u HEC-RAS-u dobiveni su praktični statistički rezultati koji ukazuju na određene zakonitosti promjena hidrauličkih veličina. Na njih bi trebalo obratiti veću pozornost prilikom planiranja sanacije stupova jer se promjene u koritu nastale zbog rampe zadržavaju i nakon njenog uklanjanja. Kako takve promjene ne bi povukle druge probleme, potreban je pojačan oprez i praćenje stanja korita tijekom, ali i nakon radova sanacije.

Rezultati ovog rada pokazuju da porast brzine toka i posmičnog naprezanja pokazuje pozitivnu korelaciju s protokom za sve mostove, ali i da se intenzitet promjena mijenja, odnosno most s najvećim povećanjem brzine toka nije onaj s najvećim povećanjem posmičnog naprezanja. Brzina toka je manje osjetljiva na lokalne promjene geometrije, dok na posmično naprezanje u mostovskom profilu utječe lokalni nagib energetske linije koji ovisi o kontrakciji korita uslijed gradnje rampe. . Stoga se ne može samo na temelju jednog parametra ocjenjivati utjecaj na eroziju mostovskog profila, već je potrebno uz brzinu uključiti i posmična naprezanja na dno korita u analizu na širem području mosta.

5 POPIS LITERATURE

- [1] 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
- [2] Kuspilić N. Regulacije vodotoka, skripta za predavanja. Zagreb, 2009.
- [3] Contraction scour
- [4] Kuspilić, N. i Gilja, G.: UTJECAJ VODOTOKA NA SIGURNOST MOSTOVA. e-Zbornik, elektronički zbornik radova Građevinskog fakulteta, 8 (16), 24-38, 2018.
- [5] Kuspilić N.: Postupci zaštite od voda, Zagreb 2009./2010., 36-45
- [6] <https://www.kzmz.hr/2015/09/07/18-11-2012-sanacija-zeljeznickog-mosta-preko-save/> (Pristupljeno 11.05.2022.)
- [7] Zinaja S: <https://www.24sata.hr/news/igh-ce-popraviti-most-koji-se-gotovo-urusio-u-savu-111154> (Pristupljeno 11.05.2022.)
- [8] <http://arhiva.nacional.hr/clanak/88159/hz-za-sanaciju-zeljeznickog-mosta-sava-jakusevac-24-milijuna-kuna> (Pristupljeno 11.05.2022.)
- [9] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/bridge-failure> (Pristupljeno 11.05.2022.)
- [10] <https://www.timesunion.com/local/article/30-years-ago-Bridge-collapse-kills-10-12807492.php#taboola-1> (Pristupljeno 11.05.2022.)
- [11] <https://www.pressandjournal.co.uk/fp/news/transport/1766526/30-years-on-flashback-to-the-day-the-ness-viaduct-collapsed-and-the-far-north-was-cut-off-from-the-rest-of-scotland/> (Pristupljeno 11.05.2022.)
- [12] <https://neil.fraser.name/writing/bridges/viaduct.html> (Pristupljeno 11.05.2022.)
- [13] Noble D.: <https://www.flickr.com/photos/drnoble/359892531/in/photostream/> (Pristupljeno 11.05.2022.)
- [14] <https://www.idvia.es/en/scour-and-its-relation-to-the-collapse-of-bridges-2> (Pristupljeno: 11.05.2022.)
- [15] Tenžera D., Puž G. Sustav upravljanja mostovina na mreži državnih cesta u Hrvatskoj. Dani Hrvatske komore inženjera građevinarstva, 2020. Opatija
- [16] Hamill L. Bridge Hydraulics. London, UK: E & FN Spon; 1999.
- [17] Održavanje cestovnih građevina. Republika Hrvatska, Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine. Dostupno: <https://mpgi.gov.hr/UserDocsImages/7863>. (Pristupljeno: 13.05.2022.)
- [18] Crnobrnja, N.: Zagrebački savski mostovi. GRAĐEVINAR, 57 (2005) 12, pp. 977-985
- [19] <http://www.viadukt.hr/novi-jankomirski-most-preko-rijeke-save> (Pristupljeno: 16.06.2022.)
- [20] <https://blog.dnevnik.hr/nepoznatizagreb/oznaka/otok> (Pristupljeno 16.06.2022.)

- [21] Nadilo, B.: Obnova mosta između Slavanskog i Bosanskog Šamca, GRAĐEVINAR, 54 (2002) 3, pp. 181-184
- [22] <https://mapio.net/pic/p-15445285/> (Pristupljeno: 16.06.2022.)
- [23] <https://www.hzinfra.hr/rekonstrukcija-postojeceg-i-izgradnja-drugog-kolosijeka-na-dionici-krizevci-koprivnica-drzavna-granica/> (Pristupljeno 16.06.2022.)
- [24] Gilja G., Bekić D., Kuspilić N.: Hidrografsko snimanje korita i podvodni vizualni pregled donjeg ustroja mostova: Most Drava-Koprivnica, Zagreb,2011.
- [25] Gilja G., Bekić D., Kuspilić N.: Hidrografsko snimanje korita i podvodni vizualni pregled donjeg ustroja mostova: Most Slavonski Šamac, 2011.
- [26] Kratofil L., Havočić M., Juriša Z.; Poplave uz rijeku Savu. Hrvatska vodoprivreda. 2011; 194: 37-43.