

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.5>

Je li uklanjanje nanosa rješenje za smanjenje poplavnog rizika na rijeci Kupi?

Is Sediment Removal the Solution for Reducing Flood Risk on the Kupa River?

Marta Marija Gržić¹, Nevenka Ožanić¹, Nino Krvavica¹

(1) Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka,
mmgrzic@gradri.uniri.hr, nozanic@uniri.hr, nino.krvavica@uniri.hr

Sažetak

Sprudovi u rijekama nastaju kao rezultat složenih interakcija između toka vode, transporta sedimenta i morfologije korita. Zbog promjena u meteorološkim, hidrološkim te morfološkim procesima u slivu rijeke Kupe, nužno je evaluirati njihov utjecaj na povećanje opasnosti i rizika od poplava. Kroz ovo istraživanje, provedena je procjena utjecaja uklanjanja nanosa na hidrauličke karakteristike rijeke Kupe i pojavu poplava na tri lokacije: ušće Čabranke u Kupu, ušće Velike Belice u Kupu, ušće Kupice u Kupu. Analiziran je utjecaj uklanjanja nanosa za tri geometrije korita: postojeće stanje, djelomično uklanjanje nanosa (gornji sloj debljine 1m) i potpuno uklanjanje nanosa. Modeliranje je provedeno pomoću 2D hidrauličkog modela nestacionarnog toka vode, odnosno računalnog modela HEC-RAS 6.6. Rezultati analize su pokazali da uklanjanje nanosa ima minimalan utjecaj na smanjenje razine vode te obuhvat poplava, odnosno na smanjenje poplavnog rizika na navedenim lokacijama.

Ključne riječi: rijeka Kupa, uklanjanje nanosa, opasnost od poplava, rizik od poplava

Abstract

Bars in rivers form as a result of complex interactions between water flow, sediment transport, and channel morphology. Due to changes in meteorological, hydrological, and morphological processes in the Kupa catchment, it is necessary to assess their impact on the increase of flood hazard and risk. In this study, the impact of sediment removal on the hydraulic properties of the Kupa River and the occurrence of floods was investigated at three locations (confluences): the Čabranka with the Kupa, the Velika Belica with the Kupa and the Kupica with the Kupa. The impact of sediment removal was analyzed for three channel geometries: current state, partial sediment removal (upper layer thickness of 1m) and complete sediment removal. The HEC-RAS 6.6 software was deployed as a 2D hydraulic model for unsteady water flow. The results of this analysis show that sediment removal has a minimal impact on water levels, flood extent and flood risk reduction.

Keywords: Kupa river, sediment removal, flood hazard, flood risk

1. Uvod

Riječni sprud je nakupina pijeska, šljunka ili drugog riječnog materijala koji se stvara u koritu rijeke uslijed taloženja nanosa [1]. Oni su dinamični geomorfološki oblici nastali složenim interakcijama toka vode i pronosa nanosa [2]. Pojava i razvoj sprudova ovise o hidrološkim, meteorološkim i morfološkim utjecajima. Oni smanjuju dubinu dna rijeke te na taj način mogu biti jedan od uzroka izlivanja vode iz korita tijekom velikih voda. Primjer takve pojave je prisutan u gornjem toku rijeke Kupe. U posljednjih nekoliko godina zabilježeni su rekordni vodostaji i intenzivne oborine u slivu rijeke Kupe, što je dovelo do povećanog pronosa i taloženja nanosa u koritu, posebno na lokacijama ušća rijeke Kupe i pritoka Čabranke, Velike Belice i Kupice [3]. Na tim lokacijama se nalaze veći sprudovi u koritu te je opravdana pretpostavka da bi uklanjanje nataloženog nanosa iz korita moglo doprinijeti smanjenju opasnosti i rizika od poplava. Cilj ovoga rada je istražiti kakav utjecaj imaju sprudovi na pojavu poplava na navedenim lokacijama pomoću hidrauličkog modela toka rijeke Kupe.

2. Područje istraživanja

Rijeka Kupa je granična rijeka koja protječe kroz Republiku Hrvatsku i Republiku Sloveniju [4]. Prema prethodno provedenoj studiji [3], najkritičnije lokacije na uzvodnom toku rijeke Kupe su ušća pritoka Čabranke, Velike Belice i Kupice te su one predmet ovog istraživanja (slika 1).



Slika 1. Lokacije obuhvaćene istraživanjem: ušće Čabranke u Kupu (Hrvatsko), ušće Velike Belice u Kupu (Kuzelj) te ušće Kupice u Kupu (Brod na Kupi).

Na tri navedene lokacije, identificirani su veći sprudovi u koritu. Na lokaciji ušća Čabranke u Kupu identificirana su dva spruda, dok je na lokacijama ušća Velike Belice u Kupu i ušća Kupice u Kupu identificiran po jedan sprud.

3. Hidrološki podaci

Podaci o protocima rijeke Kupe su preuzeti kao mjerodavni iz prethodnih studija [3]. Ulazni protoci definirani su za sve tri promatrane lokacije na temelju vršnih protoka za povratno razdoblje od 100 godina tako da su raspodijeljeni na uzvodni protok rijeke Kupe i protok pojedinog pritoka (Čabranke, Velike Belice i Kupice). U tablici 1 su prikazane usvojene vrijednosti koje su korištene kao rubni uvjeti u matematičkim modelima (poglavlje 3.3.).

Tablica 1. Usvojene vrijednosti protoka 100-godišnjeg povratnog perioda na promatranim lokacijama.

Ušće	Pritok Q_{100g} (m ³ /s)	Kupa (prije ušća) Q_{100g} (m ³ /s)	Kupa (nakon ušća) Q_{100g} (m ³ /s)
Čabranka – Kupa (Hrvatsko)	157	216	373
Velika Belica – Kupa (Kuželj)	108	368	476
Kupica – Kupa (Brod na Kupi)	81	432	513

4. Prostorne podloge

4.1. Digitalni model terena (DMT)

Digitalni model terena (DMT) generiran je integriranjem digitalnog modela reljefa razlučivosti 1 m izrađenim iz LiDAR snimaka Republike Slovenije (<https://gis.arso.gov.si/>), digitalnog modela reljefa razlučivosti 1 m izrađenim iz LiDAR snimaka Republike Hrvatske (<https://dgu.gov.hr/>) i geodetskog snimka dna korita na tri lokacije koje su predmet ovog istraživanja.

Kako bi se ocijenio utjecaj uklanjanja sprudova na obuhvat poplave, izrađeni su i dodatni modificirani modeli terena. Za djelomično uklanjanje sprudova usvojena je pretpostavka o uklanjanju nanosa s vrha sprudova, odnosno sloja nanosa u debljini od 1 m (gledano od najviše točke spruda), dok je za potpuno uklanjanje spruda usvojena pretpostavka o uklanjanju nanosa na način da se korito izravna po visinama izvan obuhvata sprudova. Treba napomenuti da su za lokaciju ušća Čabranke u Kupu provedene dodatne kombinacije s obzirom da su prisutna dva spruda (pojedinačno i zajedničko uklanjanje oba spruda). Dakle, za svaku lokaciju su generirana tri DMT-a, osim za ušće Čabranke u Kupu gdje ih je generirano pet.

4.2. Model zemljišnog pokrova

Model zemljišnog pokrova za riparijske zone (eng. *Riparian Zones*) preuzet je iz baze *Copernicus Land Monitoring Service* (<https://land.copernicus.eu>). Riparijske zone (RZ) predstavljaju prijelazna područja između kopnenih i vodnih ekosustava. RZ karta pokrova zemljišta pokriva uska područja uz vodene tokove te pruža visoku prostornu rezoluciju (5–10 m) i detaljne informacije o različitim klasama korištenja zemljišta i pokrova tla. RZ se temelji na satelitskim podacima Sentinel-2 i uključuje 55 klasa pokrova tla, od čega se 11 nalazi u

promatranim područjima. Originalni podaci su preuzeti u vektorskom obliku, a potom su pretvoreni u rasterski oblik rezolucije 1 m zbog usklađenja s DMT-om.

4.3. Model hrapavosti podloge

Budući da ne postoje unificirane i opće prihvaćene vrijednosti hrapavosti podloge za različite klase zemljišnog pokrova, preuzete su vrijednosti iz studije [5] u kojoj je uspostavljena metodologija procjene opasnosti i rizika od poplava koristeći slične tipove prostornih podloga. Pri tome je primijenjen najšire korišteni Manningov koeficijent hrapavosti n [6].

5. Matematički model

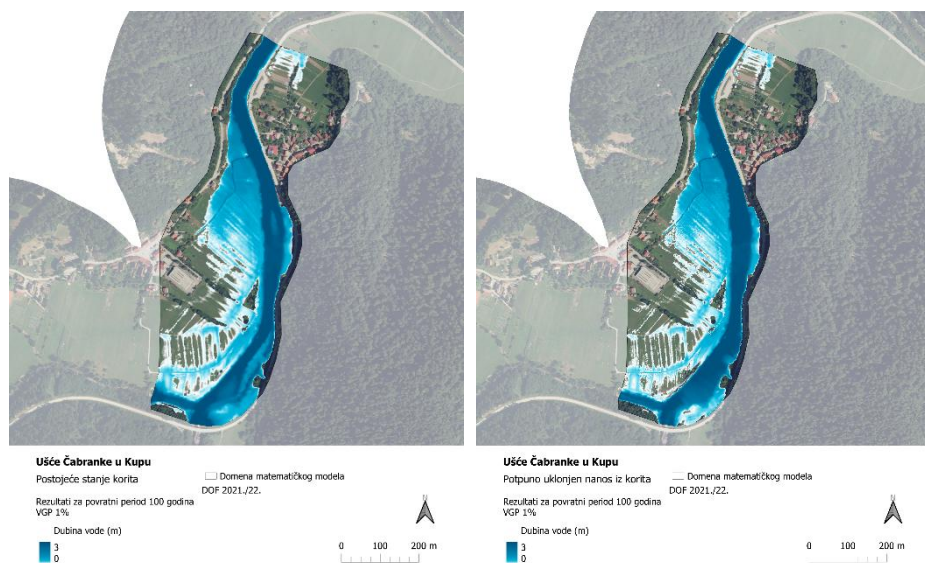
Analiza opasnosti od poplava zasniva se hidrauličkim simulacijama površinskog toka. U tu svrhu korišten je model HEC-RAS 6.6, računalni program za hidrauličke proračune koji omogućava proračun jednodimenzijskog (1D) i dvodimenzijskog (2D) stacionarnog i nestacionarnog toka površinskih voda. Na sve tri lokacije, radi se o vrlo malom obuhvatu te specifičnim uvjetima strujanja na ušćima rijeke Kupe i njenih pritoka zbog čega je korišten 2D nestacionarni tok kako bi se što realnije opisali fizikalni procesi strujanja oko i iznad sprudova te generiranja plavljenja inundacijskog područja.

Prostorna domena modela uvjetovana je obuhvatom geodetskog snimka korita te je proširena izvan samog korita na poplavne zone. Proračunska mreža je djelomično strukturirana, pri čemu se za područje izvan korita koristila mreža prosječne veličine 5 m, a unutar korita je mreža progušćena na 2 m kako bi se što detaljnije obuhvatila promjena geometrije terena na mjestima sprudova te je ista usklađena s dominantnim smjerom toka vode.

Zadano je više različitih tipova rubnih uvjeta za svaki model: na uzvodnim rubovima domene unutar korita, na nizvodnom rubu domene unutar korita te izvan korita. Na uzvodnim rubovima domene unutar korita zadani su sintetski hidrogrami trajanja 12 sati s vršnim protokom koji odgovara protocima 100-godišnjeg povratnog perioda. Na nizvodnom rubu domene unutar korita zadan je uvjet normalnog toka s nagibom energetske linije koja odgovara uprosječenom nagibu dna korita. Izvan korita, također je zadan uvjet normalnog toka s vrlo malim nagibom energetske linije (0,001). Korišten je nestacionarni 2D proračun te sustav jednadžbi plitkih voda (eng. Shallow Water Equations), konkretno model SWE-ELM, uz vremenski promjenjiv vremenski korak. Za implicitni proračun korišten je parametar $\theta=1,0$, a za rješavanje matrica korišten je PARDISO algoritam. Vremenski korak se računa s obzirom na CFL broj koji je u rasponu od 0,8 do 2,0.

6. Rezultati

Karte opasnosti od poplava, za svaku promatranu lokaciju, prikazuju dubine i obuhvat poplavljenog područja za vodni val povratnog perioda od 100 godina za različite geometrije korita (postojeće stanje – slika 2 lijevo, nakon uklanjanja sprudova - slika 2 desno). Za svaku lokaciju su također izrađeni poprečni i uzdužni profili na kojima je prikazana usporedba razina vode za različite geometrije korita pri vodnom valu povratnog perioda od 100 godina.



Slika 2. Karta opasnosti od poplava na ušću Čabranke u Kupu (dubina vode) za povratni period 100 godina za postojeće stanje korita (lijevo) i nakon uklanjanja sprudova (desno).

6.1. Ušće Čabranke u Kupu

Provedena analiza pokazuje da uklanjanje uzvodnog spruda ima povoljniji učinak na smanjenje vodostaja nego uklanjanje nizvodnog spruda. Nakon djelomičnog uklanjanja uzvodnog spruda, maksimalno smanjenje vodostaja iznosi oko 10 cm, dok potpuno uklanjanje rezultira smanjenjem oko 20 cm. No, razlike u obuhvatu poplave su minimalne. S obzirom na to da su razlike u vodostajima i obuhvatu poplave prije i nakon uklanjanja sprudova minimalne, a poplave pogađaju samo poljoprivredne površine (što rezultira malim štetama), te imajući u vidu da sprudovi predstavljaju ugrožene i/ili rijetke stanišne tipove od nacionalnog i europskog značaja, može se zaključiti da uklanjanje sprudova nije opravdano na ovom području.

6.2. Ušće Velike Belice u Kupu

U naselju Kuželj razlike u vodostaju, dubini i obuhvatu poplava su vrlo malene. Vodostaj na sprudu je niži za samo nekoliko centimetara, dok na ušću ostaje gotovo nepromijenjen (1 cm). Duž korita je varijabilnost razine vode također vrlo mala, te se može zaključiti da su razlike u vodostajima i obuhvatu poplave prije i nakon uklanjanja spruda zanemarive. Zbog toga, ni na ovoj lokaciji uklanjanje sprudova nije opravdano.

6.3. Ušće Kupice u Kupu

U naselju Brod na Kupi, razlike u vodostaju i obuhvatu poplava su također zanemarive – manje od 10 centimetara. Iako je učinak uklanjanja sprudova povoljniji za vodostaj Kupice nego Kupe, razlike su samo nekoliko centimetara. S obzirom na to da su razlike u

vodostajima i obuhvatu poplave prije i nakon uklanjanja sprudova zanemarive, a poplave također pogađaju samo poljoprivredne površine, uklanjanje sprudova nije opravdano ni na ovom području.

7. Zaključak

Rezultati numeričkih modela pokazali su koliki utjecaj na smanjenje razine vode te na dubine i obuhvat poplava imaju dva prijedloga potencijalnih mjera (djelomično i potpuno uklanjanje nanosa) u odnosu na postojeće stanje. Rezultati ovog istraživanja sugeriraju da prisutnost sprudova na promatrane tri lokacije ima minimalan ili zanemariv utjecaj na posljedice ekstremnih poplavnih događaja. Iako nanos može smanjiti profil korita na određenim dionicama, a njegovo uklanjanje može poboljšati protočnost tijekom visokih vodostaja, učinak je ograničen zbog toga što poplavni valovi 100-godišnjeg povratnog perioda znatno nadmašuju kapacitet korita, bez obzira na prisutnost sprudova. Stoga je zaključeno da uklanjanje sprudova kao mjera ublažavanja poplava nije opravdana na promatranim lokacijama.

Zahvala

Ovaj rad je sufinanciralo Sveučilište u Rijeci projektom uniri-iskusni-tehnic-23-74 i uniri-iskusni-tehnic-23-83 te Hrvatska zaklada za znanost projektom IP-2022-10-7598.

Literatura

- [1] A. Crosato i E. Mosselman, „An Integrated Review of River Bars for Engineering, Management and Transdisciplinary Research“, *Water*, sv. 12, izd. 2, Art. izd. 2, velj. 2020, doi: 10.3390/w12020596.
- [2] Z. Li, Z. Wang, B. Pan, H. Zhu, i W. Li, „The development mechanism of gravel bars in rivers“, *Quaternary International*, sv. 336, str. 73–79, lip. 2014, doi: 10.1016/j.quaint.2013.12.039.
- [3] VPB d.d., „Studija o prekogranično usklađenom upravljanju rizicima od poplava na slivu rijeke Kupe“. 2018.
- [4] „Kupa – rijeka tirkiznog izvora koja izvire u nacionalnom parku | Hrvatske vode“. Pristupljeno: 07. svibanj 2025. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.voda.hr/hr/novost/kupa-rijeka-tirkiznog-izvora-koja-izvire-u-nacionalnom-parku>
- [5] GFRI, VPB d.d., i DHMZ, „Studija procjene opasnosti i rizika od poplava uslijed jakih oborina i djelovanja mora“. Interreg projekt STREAM, 2022.
- [6] V. T. Chow, D. R. Maidment, i L. W. Mays, *Applied hydrology*. u McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering. New York: McGraw-Hill, 1988.