

EKOLOŠKI PRIHVATLJIVO TEHNIČKO REŠENJE UREĐENJA DEONICE REKE SAVE ZA POTREBE PLOVIDBE

Ljiljana MARJANOVIĆ, dr Marina BABIĆ MLADENOVIĆ, Zoran KNEŽEVIĆ,
Dimitrije MLADENOVIĆ, Lazar IGNJATOVIĆ
Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ AD, Beograd

REZIME

U ovom radu prikazan je proces traženja ekološki prihvatljivih rešenja za unapređenje plovno putu na Savi, na kritičnoj deonici kod ušća Drine (od km 170 do km 188). Proces je zasnovan na projektnoj filozofiji „raditi sa prirodom“ koja je promovisana u Zajedničkoj izjavi o vodećim principima za razvoj unutrašnje plovidbe i zaštite životne sredine u slivu reke Dunav [9]. Prihvatanjem Zajedničke izjave, zemlje u slivu Dunava su se obavezale da budući projekti razvoja unutrašnje plovidbe budu integralni, promovišući i zaštitu životne sredine.

U skladu sa uputstvima datim u Zajedničkoj izjavi, novi regulacioni radovi na Savi planirani su u tri koraka:

- 1) Definisane ciljeve i mogućnosti: Određeni su plovidbeni ciljevi, identifikovane mogućnosti za postizanje ciljeva i ekološka poboljšanja;
- 2) Definisane mere: Definisane su varijante uređenja rečnog korita, sa hidrotehničkim objektima i radovima koji su potrebni za ispunjenje postavljenih ciljeva i ispitani njihovi efekti na plovidbu i životnu sredinu i
- 3) Optimizacija hidrotehničkih građevina: Proces traženja optimalnog rešenja bio je zasnovan na obimnim podlogama (batimetrijske, geološke, geotehničke, morfološke, hidrološke, hidrauličke, psamološke), 1D i 2D hidrauličkom modeliranju, tehno-ekonomskim analizama i analizi uticaja radova na životnu sredinu.

Podaci o prihvatanju članka

Primljen: 17.11.2023.

Ispravljen: 5.4.2024.

Prihvaćen: 14.4.2024.

Kontakt: ljiljana.marjanovic@jcerni.rs

Istraživanja prikazana u ovom radu izvršena su u sklopu pripreme tehničke dokumentacije koju su finansirale Evropska Investiciona Banka i Vlada Republike Srbije.

Ključne reči: Sava, plovidba, životna sredina, naperi

1. UVOD

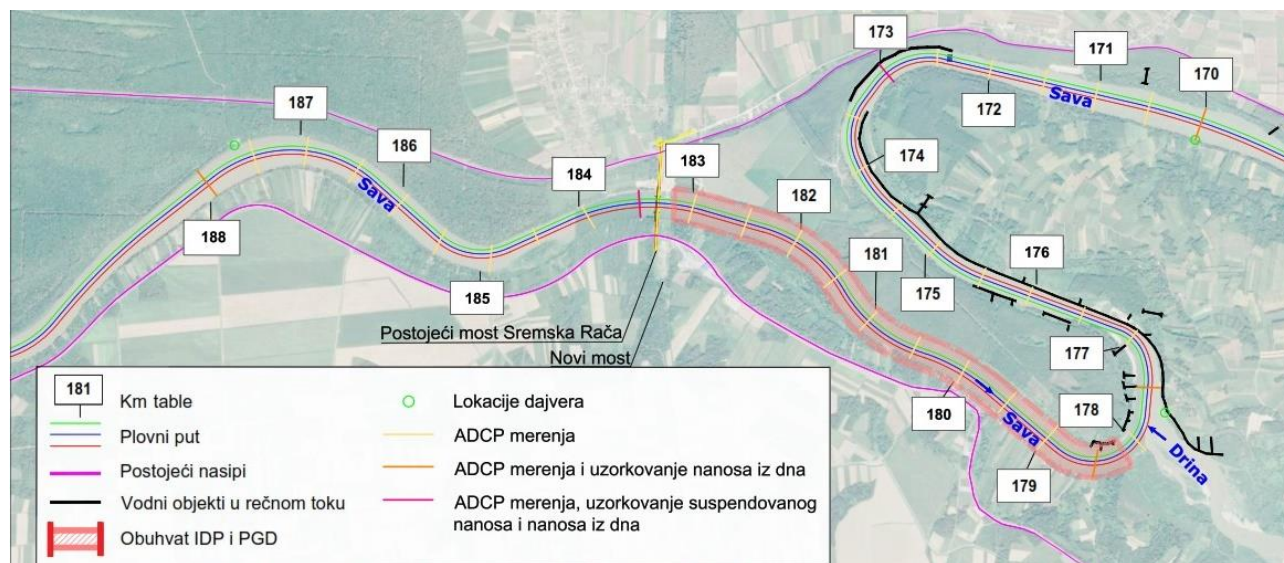
Republika Srbija planira da poboljša navigacione uslove na reci Savi koja je međunarodna plovna reka i deo transevropskog koridora Rajna – Dunav. U skladu sa zahtevima Međunarodne komisije za sliv reke Save, na plovnom putu Save kroz Srbiju treba obezbediti uslove najmanje IV kategorije unutrašnjih vodnih puteva.

To podrazumeva i trajno rešenje problema koji su prisutni na vodnom putu Save u zoni ušća Drine, od km 170 do km 188 (Slika 1), gde pri niskom plovidbenom nivou (EN) nisu obezbeđeni potrebni gabariti plovno putu (minimalna širina $B_{pl}=75$ m i dubina $H_{pl}=2,5$ m).

Složeni uslovi na ovoj deonici nastaju zbog hidrološko-hidrauličke interakcije reke Save sa njenom najvećom pritokom Drinom, koja se u Savu uliva u temenu veoma razvijenog meandra (na km 178), na konkavnoj obali.

Uzvodno od ušća Drine reka Sava čini prirodnu granicu Republike Srbije sa Bosnom i Hercegovinom, Republika Srpska. Na ovoj deonici nema regulacionih objekata, dok nizvodno od ušća Drine brojne građevine (4 km duga prava paralelna građevina, dva sistema napera itd.) sužavaju rečno korito Save.

Razmatrana deonica Save je u prostornom obuhvatu ekološki značajnog područja „Bosutske šume“ ekološke mreže Srbije, međunarodno značajnog područja za ptice IBA (Important Bird Area) „Bosutske šume“ i na



Slika 1. Kritična deonica Save kod ušća Drine

međunarodnom ekološkom koridoru reke Save. Tu se nalazi i arheološki lokalitet „Tvrđava u Sremskoj Rači“, koji je zaštićeno kulturno dobro.

2. TERENSKA ISTRAŽIVANJA

Bazna geodetska podloga za projekat uređenja reke Save je digitalni model rečnog korita i priobalja do nasipa (DMT, 1x1m). DMT je formiran na osnovu snimanja LiDAR-om i batimetrijskog snimanja, koje je ponavljano više puta u periodu 2020-2023. kako bi se pratile morfološke promene i novelirale geodetske podloge tokom fazne izrade tehničke dokumentacije.

U julu i novembru 2020. godine izvršena su merenja hidrauličkih parametara na 37 profila reke Save (Slika 1). Za merenja je korišćen TRDI RiverRay ADCP uređaj, a promene nivoa vode tokom merenja su praćene na više lokaliteta. U isto vreme su na više profila uzeti uzorci suspendovanog nanosa i nanosa u dnu. Konstatovano je da se u suspenziji kreću čestice peska i prašine, sa procentom učešća koji je vrlo sličan uzvodno i nizvodno od ušća Drine. Sastav nanosa u dnu je heterogen, pri čemu su neočekivano krupne frakcije šljunka nađene u sredini rečnog korita uzvodno od ušća Drine.

Geotehnička istraživanja (2022) su obuhvatila istražna bušenja (7 bušotina na kopnu i 30 u vodi, dubine 3-7 m) i druga ispitivanja terena. Konstatovano je da obale reke čine glinoviti, glinovito-prašnasti, prašinasto-peskoviti

i peskoviti sedimenti, dok se u koritu reke mogu naći svi varijeteti peskovito-šljunkovitih naslaga.

3. ANALIZE POSTOJEĆEG STANJA

3.1. Morfološka analiza

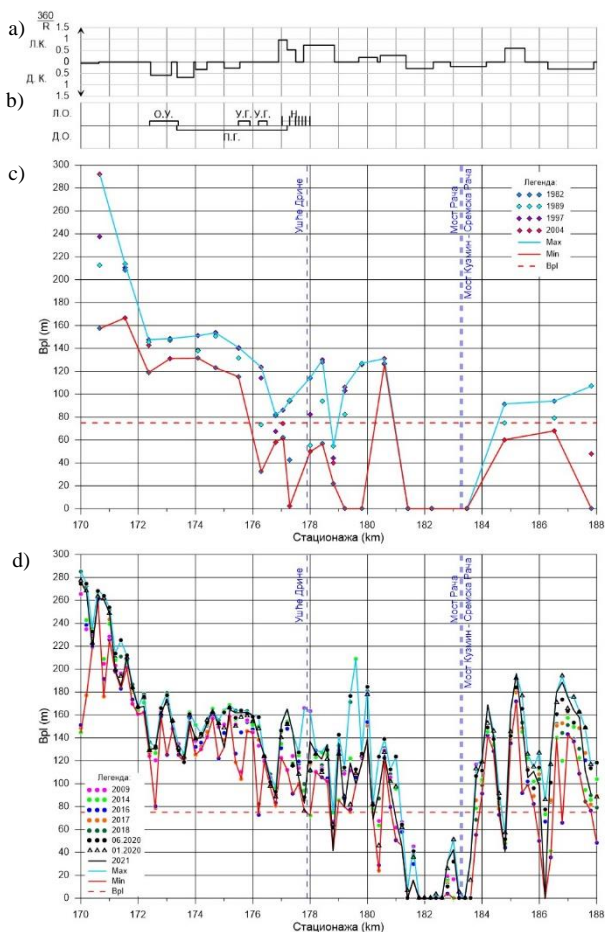
Posmatrani sektor Save od km 170 do km 188 ima veoma promenljivu zakrivljenost rečne trase (Slika 2a). Kod samog ušća Drine je vrlo oštra krivina ($R=375$ m), što je blisko minimalnom radijusu propisanom za IV kategoriju vodnog puta ($R=360$ m).

Za morfološku analizu korišćen je obiman fond podloga: evidencioni profili (EP) iz perioda 1961-2004, poprečni profili koje je snimio Plovput na međurastojanju od 200 m (2009, 2014, 2016, 2017, 2018 i 2020) i podaci novih batimetrijskih snimanja (2020-2023).

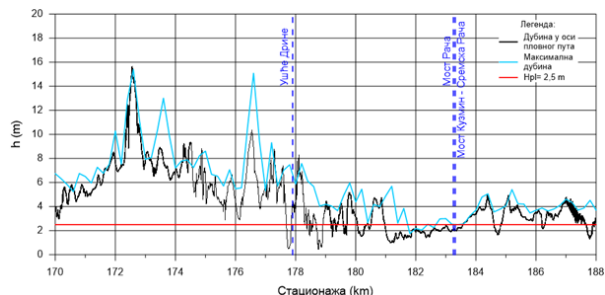
Deonice sa nedovoljnom širinom plovnog puta (B_{pl}) za zahtevanu minimalnu dubinu ($H_{pl}=2,5$ m) su identifikovane za dva vremenska perioda (1982-2004. i 2009-2020). Kao vrlo kritična uočava se deonica od km 181 do km 183,5 gde potrebne širine plovnog puta nisu nikad bile obezbeđene, dok se problemi povremeno javljaju i na kraćim potezima unutar deonica od km 176 do km 181 i od km 183,5 do km 188 (Slika 2c i 2d).

Deonice sa nedovoljnom dubinom u plovnom putu širine 75 m određene su na osnovu poprečnih profila iz perioda 2009-2020. godina (Slika 3). Uočava se da je na

deonici nizvodno od ušća Drine (km 170 - km 177,5) dubina plovnog puta velika, dok je od km 177,5 do km 183,5 na granici ili manja od 2,5 m.



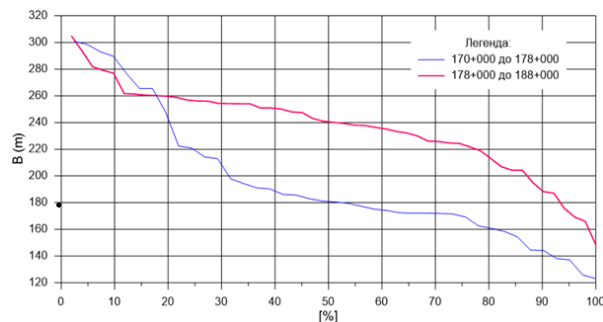
Slika 2. Podužni prikaz raspoloživih širina plovnog puta Save pri EN



Slika 3. Podužni profil dubina u plovnom putu pri EN

Analiza zastupljenosti širina vodnog ogledala Save pri EN pokazala je da se deonice uzvodno i nizvodno od ušća Drine bitno razlikuju. Na nizvodnoj deonici (km 170 - km 178) postoje regulacione građevine

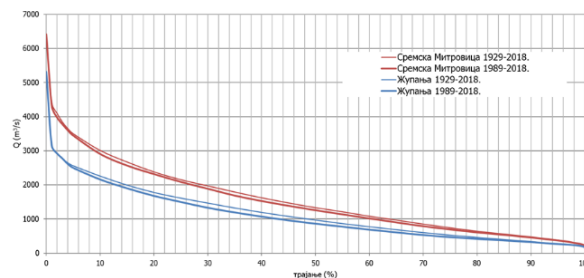
(Slika 2b) koje sužavaju rečno korito na 120-320 m, sa širinom zastupljenosti 50% od oko 180 m (Slika 4). Uzvodno (km 178 - km 188) su širine vodnog ogledala znatno veće, preko 240 m na 50% dužine deonice.



Slika 4. Zastupljenost širina vodnog ogledala pri EN

3.2. Hidrološka analiza

Na analiziranom sektoru Save hidrološki režim nije homogen jer značajan diskontinuitet prouzrokuje Drina, najveća pritoka Save. Stoga je urađena analiza srednjih, malih i velikih voda Save uzvodno (na osnovu podataka sa h.s. Županja, Hrvatska) i nizvodno od ušća Drine (h.s. Sremska Mitrovica, Srbija) za ukupan period osmatranja (1929-2018). Takođe, analizom trajanja protoka Save za poslednjih 30 godina (1989-2018, Slika 5) određeni su protoci od značaja za plovidbu (trajanja 1% i 94%). Rezultat hidrološke analize su protoci merodavni za plovidbu i projektovanje hidrotehničkih građevina (Tabela 1), koji su nadalje korišćeni u hidrauličkim proračunima.



Slika 5. Krive trajanja protoka Save

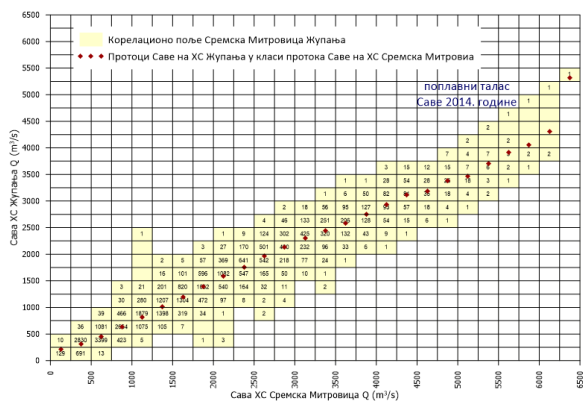
Tabela 1. Merodavni protoci reke Save (m³/s)

| H.st. | Q _{94%} | Q _{sr} | Q _{pk} | Q _{1%} | Q ₁₀₀ |
|-------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Županja | 276 | 1143 | 2159 | 3173 | 4754 |
| Sremska Mitrovica | 391 | 1560 | 2910 | 4420 | 6815 |

gde je:

Q_{94%} - niski plovidbeni protok; Q_{sr} - prosečan višegodišnji protok; Q_{pk} - protok trajanja 10% (~ puno osnovno korito reke); Q_{1%} - visoki plovidbeni protok; Q₁₀₀ – stogodišnja velika voda.

Uslovi na ušću Drine u Savu su veoma složeni jer zavise od hidroloških događaja u dva velika sliva. To ilustruje korelacija protoka Save, uzvodno i nizvodno od ušća, za period 1929-2018 (Slika 6).



Slika 6. Korelaciono polje protoka Save na h.s. Sremska Mitrovica i h.s. Županja

3.3. Analiza režima nanosa

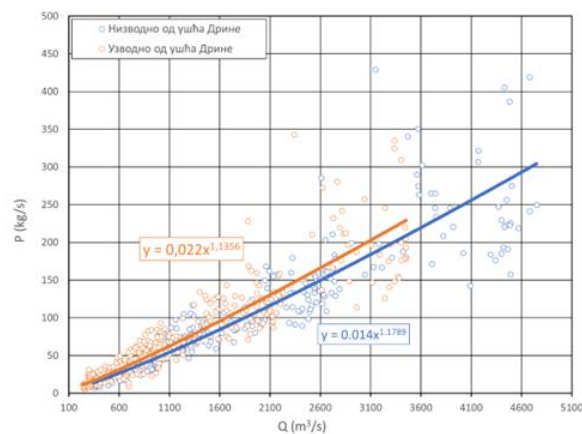
Reke Sava i Drina su tipični aluvijalni vodotoci, sa koritom usećenim u sopstveni nanos i stalnom razmenom čestica nanosa između rečnog dna i suspenzije.

Monitoring suspendovanog nanosa vrši se samo na Savi nizvodno od ušća Drine (kod Sremske Mitrovice, km 136). Podaci merenja koje vrši Institut Jaroslav Černi pokazuju da se rekom godišnje pronese prosečno 3,3 miliona tona ovog nanosa (period 1974-2018. godine). Koncentracije suspendovanog nanosa variraju između 0,001 i 0,6 kg/m³, u zavisnosti od hidrološko-hidrauličkih uslova. Procenjuje se da, kao i na drugim velikim aluvijalnim rekama, vučeni nanos u proseku čini oko 10% od ukupnog transporta nanosa.

Na osnovu podataka terenskih merenja na profilu Sremska Mitrovica formirana je korelacija između protoka vode i pronosa suspendovanog nanosa (Slika 7). Slična relacija određena je za uzvodnu deonicu Save, uzimajući u obzir razliku u površini sliva.

Granulometrijski sastav nanosa u dnu ukazuje da složeni hidrološko-hidraulički uslovi na ušću Drine imaju veliki uticaj na režim nanosa Save. Uzorkovanja nanosa su pokazala da se u sredini Save uglavnom nalazi pesak (D₅₀~0,3 mm), dok se uz obale može naći šljunak. Izuzetak je deonica neposredno uzvodno od ušća Drine gde je materijal u sredini korita (D₅₀>20 mm) znatno

krupniji nego uz obale. Može se pretpostaviti da se u širokom koritu zadržava nanos koji pristiže sa uzvodnog dela sliva kada na deonici Save uzvodno od ušća Drine vladaju uslovi uspora. Krupan nanos se može pokrenuti samo ako se na Savi javi značajniji talas velike vode.



Slika 7. Korelacije pronosa suspendovanog nanosa i protoka vode Save uzvodno i nizvodno od ušća Drine

3.4. Analiza hidrauličkog režima

Hidraulička analiza postojećeg stanja zasnivala se na primeni linijskog (1D) i ravanskog (2D) modela tečenja reke Save od km 170 do km 188, korišćenjem programskog paketa HEC-RAS. Geometrija postojećeg stanja korita definisana je na osnovu DMT.

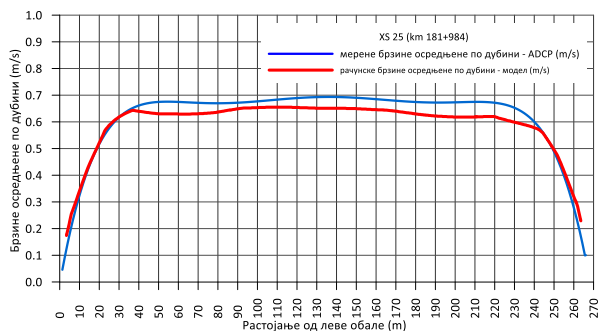
Nizvodni granični uslov je nivo vode u profilu na km 170. Računska kriva protoka na tom profilu određena je na osnovu poznate krive protoka na h.s. Sremska Mitrovica (km 139) i 1D hidrauličkih proračuna na potezu Save od Sremske Mitrovice do km 170. Uzvodni granični uslov su protoci sa h.s. Županja.

Vrednost Manningovog koeficijenta otpora određena je postupkom kalibracije na osnovu podataka prve serije merenja nivoa i brzina vode (jul 2020) i potvrđena postupkom verifikacije u kome su korišćeni podaci druge serije merenja (novembar 2020). Usvojene vrednosti su: nizvodno od ušća Drine 0,026 m^{-1/3}s i uzvodno 0,033 m^{-1/3}s.

Najvažniji rezultat 1D modeliranja je novi niski plovidbeni nivo (EN), koji je nadalje korišćen za projektovanje objekata.

Za 2D matematičko modeliranje formirana je računska mreža sa prostornom diskretizacijom 10-25 m, osim u zonama objekata gde je redukovana na 1-10 m kako bi se vernije prikazale promene pravca strujanja.

Kalibracija (Slika 8) i verifikacija 2D modela zasnivala se na poređenju računskih brzina toka i brzina izmerenih u prvoj i drugoj seriji hidrodinamičkih merenja.



Slika 8. Kalibracija 2D modela: Upoređenje merenih i računskih brzina na km 181+984 reke Save

Ravanski hidraulički proračuni za postojeće stanje urađeni su za sve karakteristične protoke, navedene u Tabeli 1. Pored dubina vode, najvažniji rezultati su brzine vode i strujna slika (Slika 14 i Slika 15).

4. TEHNIČKO REŠENJE UREĐENJA SAVE

Proces traženja tehnički i ekološki optimalnog rešenja uređenja reke Save za potrebe plovidbe odvijao se fazno, u sklopu pripreme tehničke dokumentacije.

U fazi izrade **Generalnog projekta (GNP) i Prethodne studije opravdanosti (PSO)** [TD 1] urađene su morfološka, hidrološka i hidraulička analiza i identifikovani problemi u vezi plovidbe na području projekta: oštra krivina na samom ušću Drine i nedovoljni plovidbeni gabariti od km 178,2 do km 183,2. Polazeći od toga, definisane su i analizirane 3 varijante hidrotehničkih radova kojima se može postići poboljšanje plovidbenih uslova na Savi:

- 1) Izgradnja novog plovnog kanala sa prevodnicom dužine 1,2 km, kojim se preseca oštra krivina Save km 173,7 – km 182,5;
- 2) Kapitalno i redovno godišnje bagerovanje sprudova u plovnom putu;
- 3) Izvođenje regulacionih građevina na deonici od ušća Drine do mosta kod Sremske Rače (km 178,2 – km 183,2), kako bi se rečno korito suzilo, povećale brzine i stvorili bolji uslovi transporta nanosa koji

pristiže sa uzvodnih sektora Save i zaustavlja se uzvodno od ušća Drine. Predviđeno je kapitalno bagerovanje rečnog korita i izvođenje po 11 napera sa krilima uz levu i uz desnu obalu (od cevastih materijala punjenih rečnim nanosom iz iskopa), između kojih se deponuje izbagerovani materijal.

Ekonomska analiza (Tabela 2) i prethodna analiza uticaja na životnu sredinu urađene su za sve tri varijante radova.

Tabela 2. Rekapitulacija ukupnih investicionih vrednosti po varijantama

| Predviđeni radovi | Investic. vrednost (10 ⁶ €) | Redovno održavanje (10 ⁶ €/god) | Operativni troškovi (10 ⁶ €/god) |
|---|--|--|---|
| 1 Izgradnja novog plovnog kanala sa prevodnicom | 42 | 0,63 | - |
| 2 Bagerovanje sprudova | 4,5 | 0,86 | - |
| 3 Regulacioni radovi | 5,4 | 0,20 | - |

U PSO je urađena višekriterijumska analiza varijantnih rešenja, na osnovu sledećih kriterijuma i potkriterijuma sa težinskim koeficijentima:

- 1) *Plovidba i bezbednost* – ukupno 30% (usklađenost sa zahtevima 40%, promena hidromorfološkog režima 40% i pouzdanost sistema 20%),
- 2) *Ekološki i sociološki aspekt* – ukupno 30% (uticaj na vodeni ekosistem 15%, uticaj na ptice 15%, kvalitet vode 20%, uticaj na protoke i nivo 20%, klimatske promene 15% i potreba preseljenja 15%),
- 3) *Tehnička pitanja* – ukupno 20% (vreme izgradnje 20%, izvođenje radova 20% i održivost 60%) i
- 4) *Troškovi* – ukupno 20% (ukupna investicija 30% i troškovi održavanja 70%).

Ocenjeno je da bi varijanta 1 trajno obezbedila potrebne plovidbene gabarite plovnog puta Save, jer se izbegava kompletan kritični „Račanski sektor“. Negativni aspekti ovog rešenja su visoka investiciona vrednost, nedostatak planskog dokumenta, potrebna eksproprijacija i raseljavanje na trasi objekta, kao i veliki uticaj na životnu sredinu.

Bagerovanje u varijanti 2 obezbeđuje velike količine građevinskog materijala koji bi mogao biti iskorišćen za potrebe infrastrukturnih projekata u blizini, ima nizak nivo uticaja na društvo, a u prostornim planovima su radovi na održavanju međunarodnog plovnog puta na Savi ocenjeni kao prioritetni. Problem je što kapitalno

bagerovanje nije trajno rešenje, već je potrebno periodično održavanje plovnog puta.

Varijanta 3 ocenjena je kao najpovoljnija, zbog više pozitivnih tehničkih aspekata, niskog uticaja na društvo i potencijalno povoljnog uticaja na životnu sredinu (formiraju se nova staništa na budućim međunapernim poljima).

Idejno rešenje (IDR) je urađeno za varijantu 3 iz GNP i dobijeni su lokacijski uslovi koji su objedinili uslove institucija nadležnih za vodoprivredu, plovidbu, zaštitu prirode i zaštitu kulturnih dobara.

U **Idejnom projektu (IDP)** [TD 2] su dalje razrađeni hidrotehnički radovi na deonici Save od km 178,2 do km 183,2. Predviđena je izgradnja regulacionih građevina (napera sa krunom na koti EN+1) na levoj i desnoj obali, kao i uklanjanje sprudova iz plovnog puta (do kote 2,8 m ispod EN).

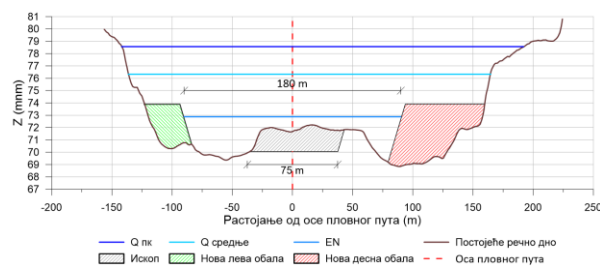
Proces izbora optimalnog tehničkog rešenja regulacije se sastojao od 3 koraka: 1) Definisane optimalne širine novog minor korita; 2) Definisane dispozicije i tipa objekata i 3) Izbor materijala za izvođenje objekata.

Koraci 1) i 2) su bili zasnovani na 2D hidrauličkoj analizi tečenja i transporta nanosa u regulisanom koritu Save od km 178,2 do km 183,6, za dijapazon hidroloških uslova (Tabela 1). Za proračun transporta ukupnog nanosa primenjena je formula Soulsby-van Rijn (2007).

Geometrijski modeli za varijante tehničkog rešenja dobijeni su integracijom zona bagerovanja i regulacionih objekata u digitalni model terena postojećeg stanja rečnog korita.

Analiza optimalne širine novog minor korita zasnivala se na primeni 2D hidrauličkog modela čiji geometrijski model reprezentuje idealizovanu situaciju posle bagerovanja sprudova i potpunog zasipanja međunapernih polja (Slika 9).

Ispitane su dve širine korita u nivou EN (B): 160 m i 180 m, koje su određene morfološkom analizom (Slika 4). Usvojeno je B=180 m (zastupljena na 50% deonice Save nizvodno od ušća Drine), zbog manjeg uticaja na tečenje i uslove plovidbe. Konstatovano je da će na uređenoj deonici strujanje u plovnom putu biti ujednačeno, sa nešto većim brzinama nego u sadašnjem stanju (do 15% u uslovima $Q_{1\%}$). Intervencija u rečnom koritu neće promeniti nivo merodavne velike vode Q_{100} .



Slika 9. Karakteristični profil regulisanog korita, sa prikazom zone bagerovanja i nasipanja

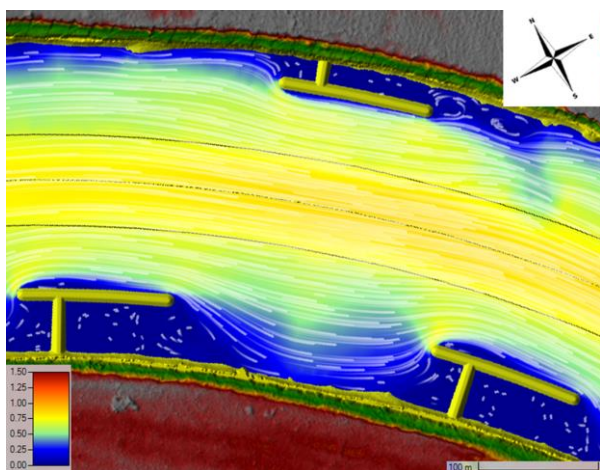
U sledećem koraku analizirane su 3 varijante uređenja korita Save, sa različitim dispozicijom i tipom regulacionih objekata (Tabela 3). U svim varijantama objekti prate regulacione linije korita za malu vodu na razmaku 180 m, a predviđen je isti obim bagerovanja sprudova u plovnom putu (Slika 10).

Tabela 3. Razmatrane varijante regulacionih objekata

| Varijanta | Opis |
|-------------------------------|--|
| 1. Naperi sa krilima | Gradi se 20 regulacionih objekata: 16 napera sa krilima (na razmaku $2B=360$ m) i 4 prave paralelne građevine (na uzvodnom i nizvodnom kraju sistema, na levoj i na desnoj obali). Svi objekti su ukorenjeni u obalu. |
| 2. Prosti ukorenjeni naperi | Gradi se 38 regulacionih objekata: 35 prostih upravnih napera (na razmaku $B=180$ m), 2 kosa napera na levoj i desnoj obali na uzvodnom kraju deonice i prava paralelna građevina na nizvodnom kraju, na levoj obali. Svi objekti su ukorenjeni u obalu. |
| 3. Prosti neukorenjeni naperi | Broj i dispozicija objekata su isti kao u varijanti 2. Objekti nisu ukorenjeni u obalu. Između obale i tela napera ostavljen je kanal čija je širina približno jednaka 1/5 dužine tela napera (po kruni objekta), čime se obezbeđuju uslovi za kretanje akvatičnih organizama. |

Izbor najpovoljnije varijante sistema objekata zasnivao se na analizi hidrauličkih efekata (upoređenju rezultata 2D hidrauličkih modela koji su razvijeni za postojeće stanje i varijante 1, 2 i 3) i obima radova, kao i njihovog potencijalnog uticaja na životnu sredinu.

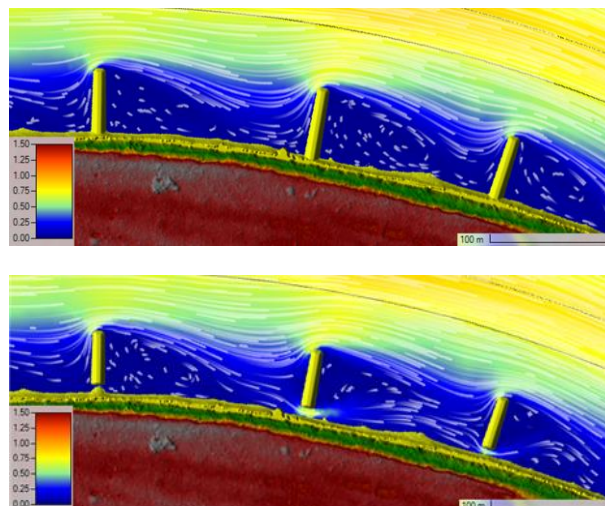
Konstatovano je da je varijanta 2 povoljnija od varijante 1 zbog manje potrebne količine materijala za izgradnju. Takođe, na osnovu rezultata 2D modeliranja konstatovano je da prosti naperi imaju bolje efekte od napera sa krilima (Slika 10), tako da se očekuje bolje istaložavanje nanosa u međunaperskim poljima i lakše formiranje projektovanog oblika korita za malu vodu. Ni naperi sa krilima ni prosti naperi nemaju uticaja na strujanje u plovnom putu, jer su od njega dovoljno udaljeni.



Slika 10. Brzine i strujna slika u varijantama 1 i 2 (gore: naperi sa krilom, dole: prosti naperi), $Q_{94\%}$

Hidrauličko modeliranje je pokazalo da postoje samo lokalne razlike u strujnoj slici u varijantama 2 i 3 (Slika 11), jer se kod neukorenjenih napera javlja tečenje kroz „kanal“ između objekata i obale.

Neukorenjeni objekti su usvojeni kao povoljniji sa stanovišta uticaja na životnu sredinu jer omogućavaju podužnu migraciju akvatičnih organizama kroz „kanal“ između obale i objekta [6].



Slika 11. Brzine i strujna slika u varijantama 2 i 3 (gore: ukorenjeni naperi, dole: neukorenjeni naperi), $Q_{94\%}$

Naperi malih dužina, za koje je nakon 2D hidrauličkog modeliranja zaključeno da nemaju funkciju jer ne izazivaju recirkulaciono strujanje, isključeni su iz finalne dispozicije regulacionih objekata na Savi.

Na osnovu svih izvršenih analiza, usvojena je finalna dispozicija regulacionih građevina na deonici od km 178,2 do km 183,2 sa: 2 kosa napera na uzvodnom kraju deonice, 14 upravnih napera uz levu obalu i 12 uz desnu obalu i 1 pravom paralelnom građevinom (PPG) na nizvodnom kraju deonice. Naperi su kratki, dužine 18–54 m, dok dužina PPG iznosi 356 m. Kako građevine nisu ukorenjene u obalu, u neposrednoj zoni njihovog uticaja potrebno je izvesti kratke obaloutvrde radi zaštite obala od erozije.

Uslovi transporta i istaložavanja nanosa na deonici projekta analizirani su 2D hidrauličkim modelom za finalnu dispoziciju objekata. Konstatovano je da će predviđeni radovi u koritu Save promeniti transportnu sposobnost reke u poprečnom smislu: očekuje se povećanje pronosa nanosa u središnjem delu korita (u zoni plovnog puta) i smanjenje u bočnim (priobalnim) zonama. Ukupan pronos nanosa se neće značajno promeniti, tako da se ne ugrožava nizvodna deonica Save.

Geometrijske karakteristike regulacionih građevina su određene na sledeći način:

- U skladu sa lokacijskim uslovima, usvojena je kota krune EN+1 m;
- Na osnovu hidrauličkih parametara toka Save (brzine i dubine vode) i proračuna talasa izazvanih vetrom i prolaskom plovila [8] određena je potrebna krupnoća kamena ($D=0,3$ m) i minimalna širina krune napera (2 m);
- Na osnovu preporuka iz [1], [2], [4] i [5], usvojeni su: podužni pad krune (od obale ka toku) 1:100, nagibi uzvodne i nizvodne kosine 1:1,5, kosine ka reci 1:3 i kosine ka obali 1:1,5.

Rečno dno oko napera se štiti slojem tucanika/lomljenog kamena na geotekstilu, ukupne debljine 0,6 m. Usvojena je dužina zaštite rečnog dna nizvodno od napera $L=2 \cdot H_{\max}$ (obežbeđuje zaštitu od erozije pri prelivanju), uzvodno od napera $L=H_{\max}$ i ka reci $L=2 \cdot H_{\max}$ (obežbeđuje zaštitu objekta od opšte i lokalne erozije u zoni glave napera).



Slika 12. Poprečni presek napera (a. od kamena, b. sa ispunom od cevastih elemenata i c. sa ispunom od džakova punjenih peskom)

Nakon razmatranja pozitivnih i negativnih aspekata svih varijanti, odbačene su geotekstilne cevi kao najnepovoljnije, zbog komplikovane pripreme terena i izvođenja, kao i problema sa uklapanjem cevi standardnih dimenzija u projektovane objekte.

Prema predmeru i predračunu za građevine od kamena i građevine od džakova punjenih nanosom, razlika u ceni je oko 6%. S obzirom na druge prednosti (jednostavna priprema i izvođenje, trajnost, iskustvo), za izvođenje su predložene građevine od kamena.

Planirano je da se najpre izvedu regulacione građevine, grupisane po podsistemima uz levu i desnu obalu, od uzvodnog ka nizvodnom kraju deonice. Po završetku određenog podsistema građevina počinje bagerovanje iz obližnje deonice plovnog puta.

Predviđena je zaštita rečne obale i dna u „kanalu“ između napera i obale, na istoj dužini kao i zaštite dna u zoni objekta (uzvodno $L=H_{\max}$ i nizvodno $L=2 \cdot H_{\max}$). Zaštita dna u „kanalu“ je od kamenog nabačaja na tepihu od šljunka ili tucanika, ukupne debljine 0,6 m. Za zaštitu obale od erozije izvodi se obaloutvrda do kote EN+2 m, od kamenog nabačaja na podlozi od tucanika, u nagibu 1:1,5. Krupnoća kamena je ista kao u oblozi napera. Kako su obaloutvrde male visine (1-3 m, prosečno 2 m), viši deo prirodne obale (ukupne visine 7-12 m) ostaje neporemećen i obrastao prirodnom vegetacijom, što je povoljno sa aspekta životne sredine.

PPG i traverza imaju isti poprečni profil kao naperi i nisu ukorenjene u obalu. Zaštita rečnog dna duž PPG od erozije izvodi se u širini $L=H_{\max}$ i ka reci i ka obali.

U sledećem koraku, razmotrene su prednosti i mane različitih materijala za izvođenje građevina. Analizirane su: građevine od kamena (Slika 12a) i građevine od „mekih“ elemenata od geotekstila punjenih rečnim nanosom i oblogom od kamena, sa dve podvarijante: cevasti elementi (geotekstilne cevi ili „tube“ – Slika 12b) i džakovi (Slika 12c).

Kapitalno bagerovanje korita Save treba da bude u skladu sa opštim preporukama za bagerovanje u cilju zaštite životne sredine [7] i ograničeno na sprudove u okviru koridora plovnog puta (širine 75 m). Zbog dugoročne održivosti gabarita plovnog puta usvojena je dubina kinete bagerovanja 2,8 m ispod EN. Kosine kinete bagerovanja su u nagibu 1:3. Ukupna količina materijala koju treba izbagerovati je oko 227.940 m³, od čega je na najuzvodnijoj deonici (km 182,9 – km 181,9) oko 160.000 m³.

Izbagerovani materijal se ne uklanja iz korita vodotoka, nego se prebacuje iz plovnog puta u međunaperna polja. Tu se rasprostire po celoj površini, osim u zoni „kanala“ uz obalu, koji ostaje protočan. Debljina sloja zavisno od visine napera koji ograničavaju polje (maksimalna debljina sloja je za oko 0,5 m manja od srednje visine napera). Na taj način uz levu obalu može

da se deponuje 124.615 m³, a uz desnu obalu 68.631 m³ nanosa. Višak treba transportovati nizvodno i deponovati u dublje delove osnovnog korita Save, nizvodna međunaperska polja ili druge lokalitete u major koritu Save.

Ekonomska analiza u **Studiji opravdanosti (SO)** [TD 2] pokazala je da će izvođenje sistema objekata i bagerovanje korita radi poboljšanja uslova plovidbe povećati društveno blagostanje.

U **Studiji o proceni uticaja na životnu sredinu (SPUŽS)** [TD 3] detaljno su razmotreni uticaji i definisane mere u cilju sprečavanja, smanjenja ili otklanjanja štetnog uticaja na životnu sredinu tokom izgradnje i eksploatacije projekta. Uvedena je zabrana izvođenja radova u periodu februar-jun kada se mresti najveći broj ribljih vrsta, kao i u periodu april-jul kada se gnezde zaštićene vrste ptica. Propisan je Program monitoringa, pre i u toku izgradnje - površinske vode (MDK sadržaja kiseonika, suspendovanih materija i mineralnih ulja-naftnih ugljovodonika za klasu II) i ihtiofaune (nulti monitoring 2 puta pre radova i 2 puta godišnje tokom radova). Tokom eksploatacije je potreban biomonitoring ihtiofaune i ornitofaune (broj jedinki u novoformiranom kanalu i međunaperskim poljima, jednom godišnje) da bi se pratili efekti primenjenog tehničkog rešenja.

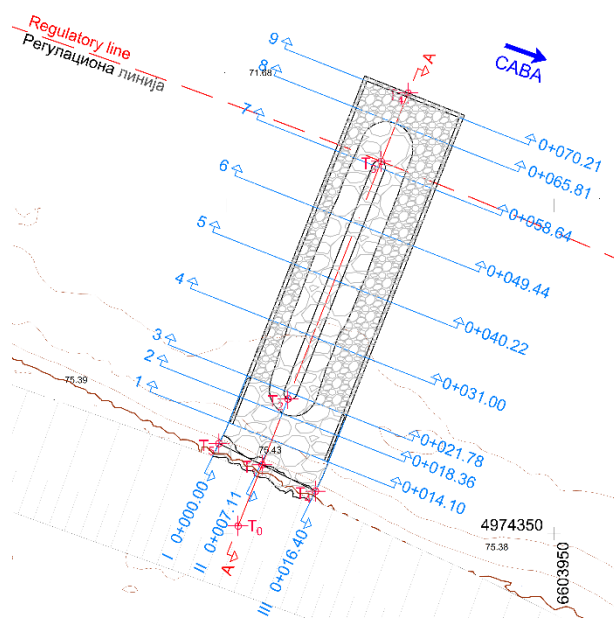
Zaključak SPUŽS je da je tehničko rešenje definisano uz primenu mera i uslova za smanjenje uticaja na životnu sredinu, a da se pri tom zadovolje strogo propisane karakteristike plovnog puta. Uz poštovanje zabrana, preporuka oko tehnologije građenja i dobru organizaciju izvođenja radova, radovi se mogu kvalitetno izvesti uz kratkotrajan negativan uticaj tokom izvođenja radova.

U **Projektu za građevinsku dozvolu (PGD)** [TD 4] dalje je razrađena varijanta usvojena u IDP. Urađeno je novo batimetrijsko snimanje (2023), na osnovu kog je ažurirana geometrija korita i konstatovano da jedan naper nije potreban, jer je došlo do zasipanja korita. Konačan broj, tip i položaj objekata prikazan je u Tabeli 4, a situacioni prikaz jednog napera dat je na slici 13.

Za finalno projektovano stanje rečnog korita (geometrijski model na Slici 16) urađeni su novi 2D hidraulički proračuni. U ovom radu su dati izabrani rezultati proračuna, za uslove male vode Q_{94%} i puno korito Q_{pk}. Prikaz brzina tečenja i strujne slike toka u regulisanom koritu Save dat je na slikama 17 i 18.

Tabela 4. Projektovani sistem regulacionih građevina na Savi

| Stacionaža (km) | Leva obala | | Desna obala | |
|--------------------|------------|--------------|-------------|-----------|
| | Podsystem | Objekat | Objekat | Podsystem |
| 178+200 | | | | |
| 178+475/178+880 | III-L | PPG | | |
| 178+850 | | 1L traverza | 1Dp naper | II-D |
| 179+030 | | | 2D naper | |
| 179+210 | | 2L naper | 2Dp naper | |
| 179+390 | | 2Lp naper | | |
| 179+570 | | 3L naper | | |
| 180+235 | II-L | 4L naper | | |
| 180+410 | | 4Lp naper | | |
| 180+603 | | 5L naper | | |
| 180+796 | | 5Lp naper | | |
| 180+990 | | 6L naper | | |
| 181+183 | | 6Lp naper | 6D naper | I-D |
| 181+353 | | 6Dp naper | | |
| 181+545 | | 7D naper | | |
| 181+740 | | 7Dp naper | | |
| 181+935 | | 8D naper | | |
| 182+130 | I-L | 9L naper | 8Dp naper | |
| 182+310 | | 9Lp naper | 9D naper | |
| 182+490 | | 10L naper | 9Dp naper | |
| 182+670 | | 10Lp naper | 10D naper | |
| 182+883 | | 11L kosi n. | | |
| 182+900 | | 10Dp kosi n. | | |
| 183+200 | | | | |

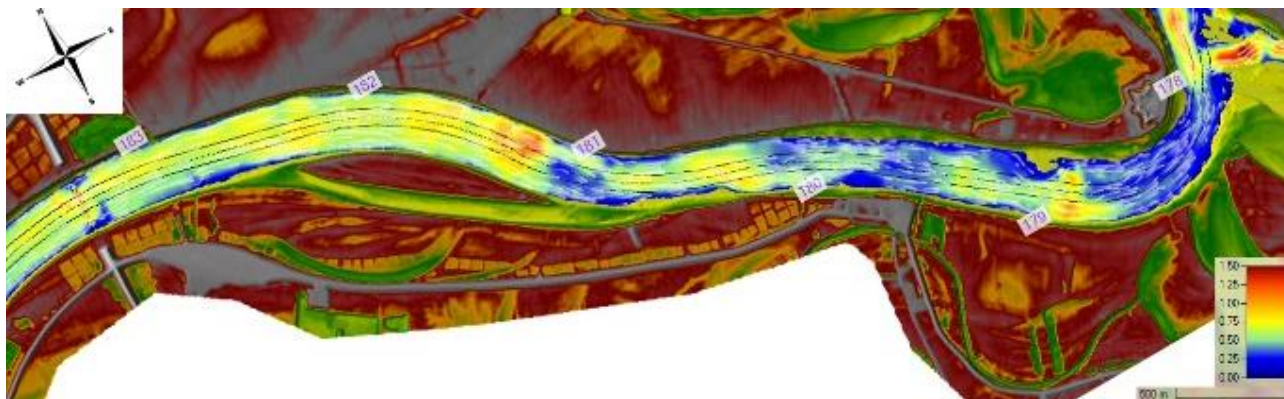


Slika 13. Dispozicija jednog od neukorenjenih pravih napera uz desnu obalu Save

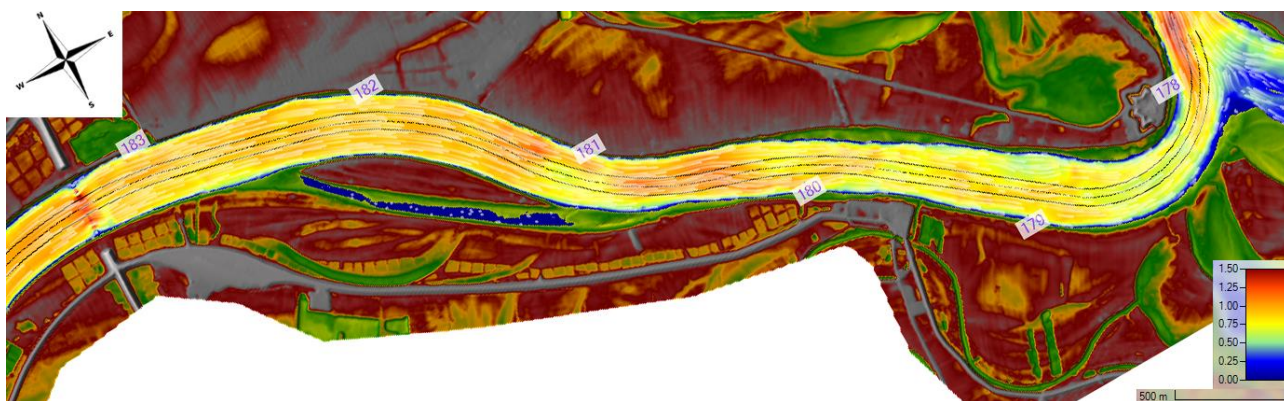
Preklapanjem rasterskih rezultata proračuna za postojeće stanje i usvojeno tehničko rešenje dobijene su razlike brzina za iste hidrološke uslove (Slika 19 i Slika 20).

Pronos nanosa u regulisanom koritu prikazan je na slikama 21 i 22, dok su razlike između usvojenog

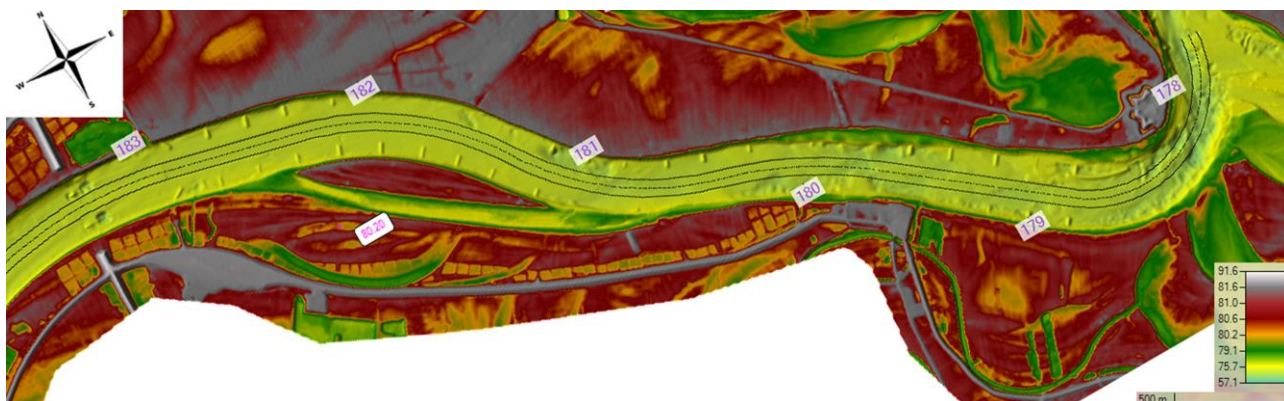
tehničkog rešenja i prirodnog stanja prikazane na slikama 23 i 24. Evidentan je uticaj napera i izvršenog bagerovanja u zoni plovnog puta. Naime, jedinični pronos nanosa se povećava u središnjem delu korita Save, dok se transportna sposobnost toka smanjuje uz obale. Pronos nanosa povećan je i do 50% u zoni plovnog puta u odnosu na postojeće stanje.



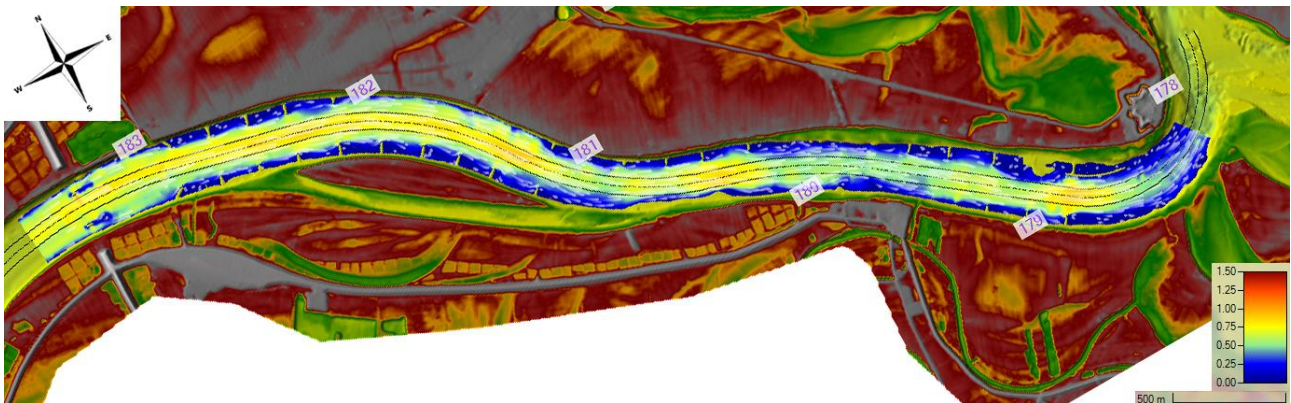
Slika 14. Postojeće stanje: Strujna slika i brzine tečenja pri $Q_{94\%}$



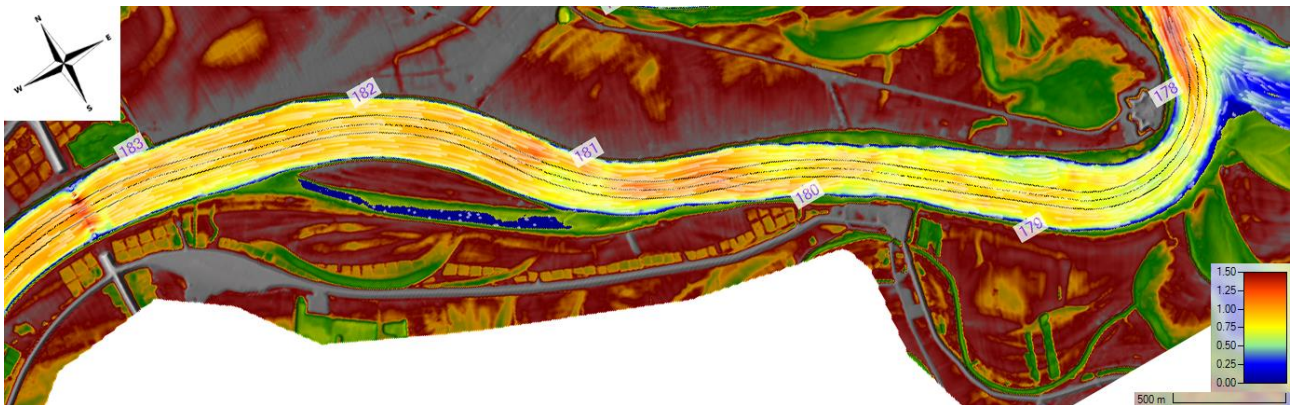
Slika 15. Postojeće stanje: Strujna slika i brzine tečenja pri Q_{pk}



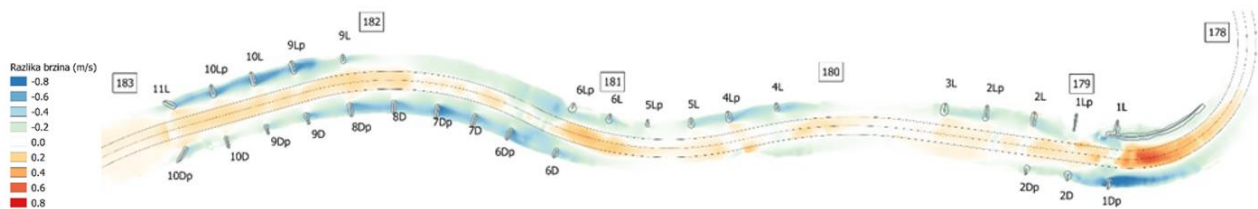
Slika 16. Usvojeno tehničko rešenje: Geometrijski model regulisanog korita



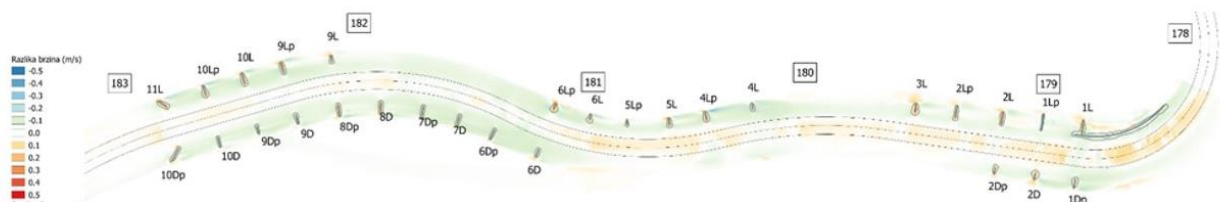
Slika 17. Usvojeno tehničko rešenje: Brzine i strujna slika pri $Q_{94\%}$



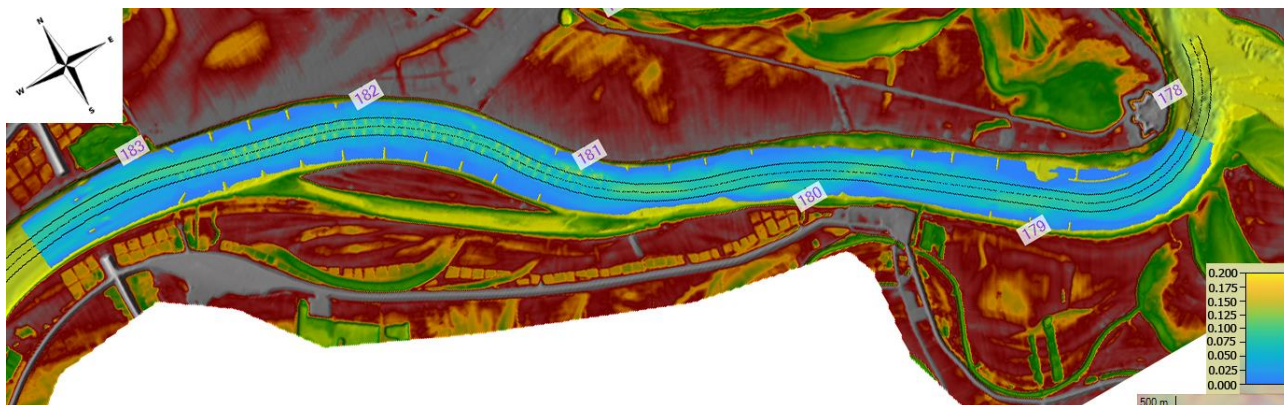
Slika 18. Usvojeno tehničko rešenje: Brzine i strujna slika pri Q_{pk}



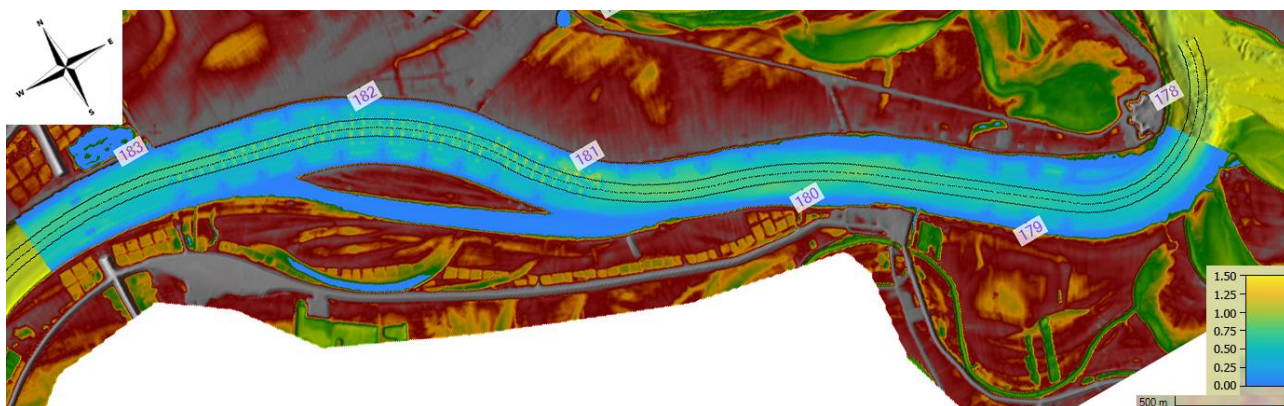
Slika 19. Razlike između usvojenog tehničkog rešenja i prirodnog stanja – Brzine pri $Q_{94\%}$



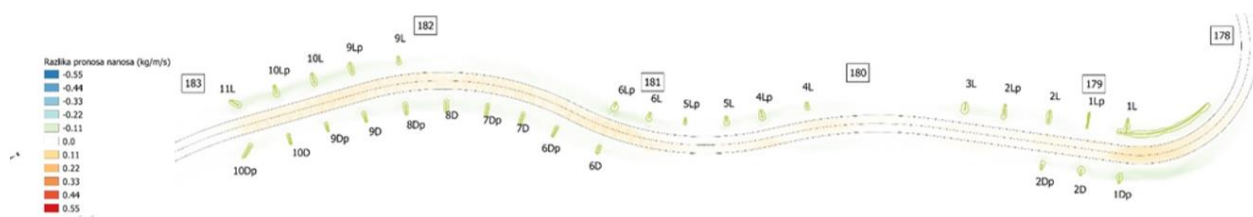
Slika 20. Razlike između usvojenog tehničkog rešenja i prirodnog stanja – Brzine pri Q_{pk}



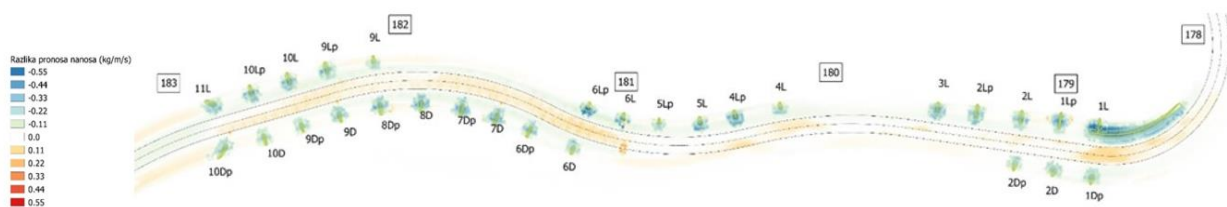
Slika 21. Usvojeno tehničko rešenje: Pronos nanosa (kg/m/s) pri $Q_{94\%}$



Slika 22. Usvojeno tehničko rešenje: Pronos nanosa (kg/m/s) pri Q_{pk}



Slika 23. Razlike pronosa nanosa između usvojenog tehničkog rešenja i prirodnog stanja pri $Q_{94\%}$



Slika 24. Razlike pronosa nanosa između usvojenog tehničkog rešenja i prirodnog stanja pri Q_{pk}

5. ZAKLJUČAK

Proces traženja ekološki prihvatljivog tehničkog rešenja za potrebe unapređenja plovnog puta na kritičnoj deonici Save kod Sremske Rače zasnovan je na nacionalnim i međunarodnim pravilima, normama i standardima, kao i relevantnim međunarodnim uputstvima i primerima dobre prakse. Polazeći od uslova po pitanju geometrije plovnog puta, tražena su rešenja koja bi imala dugoročniji efekat od bagerovanja i najmanji negativan uticaj na životnu sredinu.

Specifičnost radova u cilju unapređenja međunarodnog plovnog puta je u tome što se plovidbeni uslovi u malovodnom periodu ne mogu ispuniti bez izvesne promene geometrije korita, vodnog režima i režima nanosa.

U slučaju široke deonice Save uzvodno od ušća Drine (km 178,2 do km 183,2) poboljšanje se može postići suženjem rečnog korita i izmenom režima tečenja i transporta nanosa. Posle izgradnje brojnih novih hidrotehničkih objekata tok vode će se ubrzati u središnjem delu korita (plovni put), a usporiti u priobalnim zonama (buduća međunaperska polja). Kako će se izvođenjem novih regulacionih građevina poboljšati transportna sposobnost za nanos u budućem periodu, radovi na održavanju plovnog puta će se svesti na minimum.

Postojeći sprudovi od krupnozrnog nanosa moraju biti bagerovani, pri čemu će se ovaj materijal odložiti u prethodno formirana međunaperska polja.

U cilju zaštite staništa živog sveta reke i nesmetanog odvijanja njihovih životnih ciklusa, projektom je predviđena izgradnja regulacionih građevina koje nisu povezane sa obalom. Između građevina i postojeće obale ostaje „kanal“ koji omogućava nesmetanu migraciju riba i drugih vodenih organizama u svim hidrološkim uslovima. Delimično zasuta međunaperska polja će predstavljati nova staništa za barske ptice u IBA području „Bosutske šume“.

Projekat će u toku izvođenja radova imati kratkoročan negativan uticaj na životnu sredinu, ali dugoročno gledano uticaj neće biti negativan. Regulacione građevine od prirodnog materijala će se uklopiti u okolni teren i biće teško uočljive u odnosu na prirodno okruženje, i to samo u periodu malih voda.

Izvođenje radova će najverovatnije biti moguće samo u periodu jul-oktobar (4 meseca godišnje), zbog ograničenja u pogledu zaštite životne sredine (mrest, gnežđenje, ...) u zoni izvođenja radova ili nepovoljnih hidrometeoroloških uslova (visoki nivo vode, magla, led). Planirani radovi mogu da se završe za dve do tri letnje sezone, uz angažovanje adekvatnog broja radnih mašina (više pontona sa bagerom za radove u kamenu i bagera).

U PGD je investiciona vrednost izgradnje kompleksnog sistema objekata od km 178,2 do km 183,2 procenjena na oko 6,8 miliona evra, dok su u IDP bagerski radovi procenjeni na oko 2,3 miliona evra.

Na osnovu PGD dobijena je građevinska dozvola za uređenje deonice Save od km 178,2 do km 183,2, tako da se očekuje raspisivanje tendera i početak radova.

Priprema projekta uređenja rečnog korita na deonici koja čini prirodnu granicu Republike Srbije sa Bosnom i Hercegovinom (Republika Srpska), odvija se kroz punu saradnju nadležnih organa dve zemlje, po posebnom sporazumu.

Nakon završetka sistema objekata potrebno je stalno praćenje stanja novog minor korita Save. U prvih 5 godina nakon završetka radova potrebno je organizovati snimanje jednom godišnje, a obavezno nakon pojave poplavnog talasa Save u kome je prevaziđen visoki plovidbeni nivo. Svake pete godine treba snimiti međunaperska polja, kako bi se pratilo razvoj procesa u tim prostorima. Nakon pojave velike vode Save treba proveriti stanje regulacionih građevina.

Povoljan bilans nanosa na deonici regulacije mogu poremetiti značajniji poplavni događaji na Savi ili Drini. Ukoliko redovno snimanje korita posle poplavnih događaja pokaže da su u plovnom putu nastali sprudovi, potrebno je hitno preduzeti odgovarajuće mere održavanja.

U narednom periodu posebnu pažnju treba posvetiti praćenju stanja plovnog puta u zoni starog i novog mosta kod Sremske Rače, gde nije obezbeđena dubina od 2,5 m ispod EN. Međutim, očekuje se povoljan efekat nizvodne regulacije u vidu određene regresivne erozije, usled koje će se povećati dubine u plovnom putu. Ovo treba potvrditi snimanjima korita nakon izgradnje sistema nizvodnih objekata.

Ograničenja za plovidbu u oštroj rečnoj krivini Save nizvodno od deonice regulacije treba da ostanu na snazi, jer se projektnim rešenjem ne utiče na ovu zonu.

LITERATURA

- [1] Babić-Mladenović M.: Uređenje vodotoka, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, 2018
- [2] Jansen P. Ph et all.: Principles of river engineering - The non-tidal alluvial river, Pitman, London, 1979
- [3] Jovanović M.: Regulacija reka - Rečna hidraulika i morfologija, Građevinski fakultet, Beograd, 2008
- [4] Mohamed F. M. Yossef: The Effect of Groynes on Rivers - Literature review, 2002
- [5] Muškatirović D.: Regulacija reka, Građevinski fakultet, Beograd, 1991
- [6] PLATINA Manual on Good Practices in Sustainable Waterway Planning, FP7, 2010
- [7] Dredging and dredged material management, US Army Corps of Engineers, 2015
- [8] The Rock Manual - The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition), Ciria, London, 2012
- [9] Zajednička izjava o vodećim principima za razvoj unutrašnje plovidbe i zaštite životne sredine u slivu reke Dunav (Joint Statement on Inland Navigation and Environmental Sustainability in the Danube River Basin), Međunarodna komisija za zaštitu sliva reke Dunav (ICPDR), Dunavska komisija (DC) i Međunarodna komisija za sliv reke Save (ISRBC), 2008.
- TEHNIČKA DOKUMENTACIJA PROJEKTA Unapređenje plovnih puteva u Republici Srbiji (Serbian Inland Waterways Infrastructure Project, 07-WBK-SER-TRA), Segment A
- [TD 1] Prethodna studija opravdanosti i Generalni projekat uređenja sektora reke Save (rkm 170 – rkm 188) i reke Drine (rkm 0 – rkm 5) za potrebe unapređenja međunarodnog plovnog puta, 2021
- [TD 2] Studija opravdanosti i Idejni projekat uređenja reke Save (rkm 178+200 - rkm 183+200) za potrebe unapređenja međunarodnog plovnog puta, 2022
- [TD 3] Studija o proceni uticaja na životnu sredinu projekta uređenja reke Save iskopom materijala iz korita duž plovnog puta i izgradnjom sistema regulacionih objekata od kamena ili materijala iz iskopa za potrebe unapređenja međunarodnog plovnog puta, od km 178+200 do km 183+200, na k.p. br. 989 i 987, KO Sremska Rača, na teritoriji grada Sremska Mitrovica, 2023
- [TD 4] Projekat za građevinsku dozvolu sistema regulacionih objekata za uređenje reke Save od km 178+200 do km 183+200 za potrebe unapređenja međunarodnog plovnog puta, 2024

ENVIRONMENTALLY ACCEPTABLE TECHNICAL SOLUTION FOR THE SAVA RIVER TRAINING FOR NAVIGATION

by

Ljiljana MARJANOVIĆ, dr Marina BABIĆ MLADENOVIĆ, Zoran KNEŽEVIĆ,
Dimitrije MLADENOVIĆ, Lazar IGNJATOVIĆ
Jaroslav Černi Water Institute, Belgrade

Summary

This paper presents the process of searching for environmentally acceptable solutions to improve the waterway on the Sava at the critical section near the mouth of the Drina (from km 170 to km 188).

The process is based on the "working with nature" project philosophy promoted in the Joint Statement on Guiding Principles for the Development of Inland Navigation and Environmental Protection in the Danube River Basin (2008). By accepting the Joint Statement, the countries in the Danube basin agreed to integrate the interests of inland navigation and environmental protection.

Based on the instructions given in the Joint Statement, the new training works on the Sava are planned integrally and in several steps: 1) Definition of goals and opportunities: navigation goals are determined, opportunities to achieve goals and environmental improvements are identified; 2) Definition of measures:

Variant solutions of the river bed training were defined, with hydrotechnical structures and works that are needed to fulfil the set goals, and their effects on navigation and the environment were examined. 3) Optimization of hydrotechnical structures.

Searching for the optimal solution was based on extensive data (bathymetric, geological, geotechnical, morphological, hydrological, hydraulic, and sediment data), 1D and 2D hydraulic modelling, techno-economic analyses, and environmental impact analysis.

The presented research and analyses were carried out as a part of preparing technical documentation financed by the European Investment Bank and the Government of the Republic of Serbia.

Keywords: Sava River, navigation, environment, groynes