

ZAŠTO JE PROSECANJE REČNIH KRIVINA RIZIČNA REGULACIONA MERA?

Dr Miodrag B. JOVANOVIĆ, dipl.građ.inž.
mjovanov@grf.bg.ac.rs

REZIME

Prosecanje rečnih krivina je veoma radikalna regulaciona mera sa neizvesnim posledicama u pogledu stabilnosti rečnog korita uzvodno i nizvodno od preseka. Naročito je rizično prosecanje samo jedne krivine meandrirajućeg korita. Prosecanje drastično remeti hidraulički i psamološki režim vodotoka i dovodi do regresivne erozije rečnog korita uzvodno od preseka, a njegovog zasipanja, nizvodno od preseka. Ovakve intervencije, zahtevaju veliku opreznost i ozbiljne hidrauličko-psamološke analize pomoću matematičkih i hidrauličkih modela. U ovom radu je na konkretnom primeru pokazano kako se i pomoću elementarnih hidrauličkih i psamoloških pokazatelja mogu odmah (i relativno brzo) sagledati uticaji na stabilnost korita i doneti zaključak o riziku prosecanja neke krivine, odnosno opravdanosti ove mere.

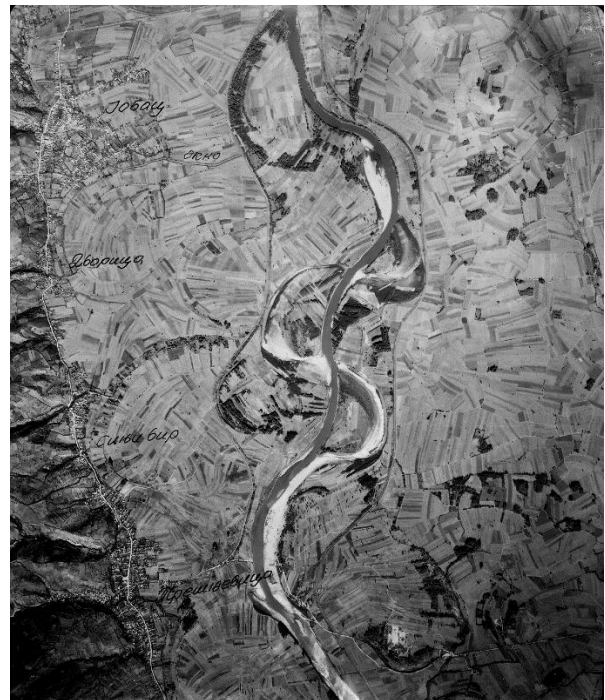
Ključne reči: regulacija reka, prosecanje krivine, rečni nanos

1. UVOD

Procena dinamike morfološkog razvoja aluvijalnog korita je veoma nesigurna zbog složene interakcije između rečnog toka i nanosa. U određenoj fazi razvoja, krivine postaju uska grla za evakuaciju velikih voda i transport nanosa i leda. U takvim uslovima, reka često (pri nailasku velikih voda) sama proseče novo - kraće korito u krivinama, kada utrošak energije na savlađivanju otpora po starom koritu postane previsok.

Veštačko prosecanje rečnih krivina je radikalna regulaciona mera koja ima za cilj povećanje propusne moći korita za vodu, nanos i led. Na plovnim rekama, ovoj meri se pribegava da be se „ispravila“ trasa plovnog puta, poboljšali plovidbeni uslovi, ili omogućio saobraćaj većih plovila.

Po pravilu, na jednoj reci se gradi više preseka, kako bi posle regulacije broj hodova ostao isti, sa najmanjim poremećajem prirodne trase vodotoka (Slika 1).



Slika 1. Aerofotogrametrijski snimak Velike Morave sa prosecima krivina izvedenim u prvoj polovini XX. veka.

Proseci mogu imati i funkciju rasteretnih kanala. Naime, da bi se smanjila erozija konkavne obale razvijenog meandra, može se izvršiti njegovo prosecanje kanalom koji bi omogućio razdvajanje protoka i smanjenje erozionog dejstva vode u starom koritu (Slika 2).

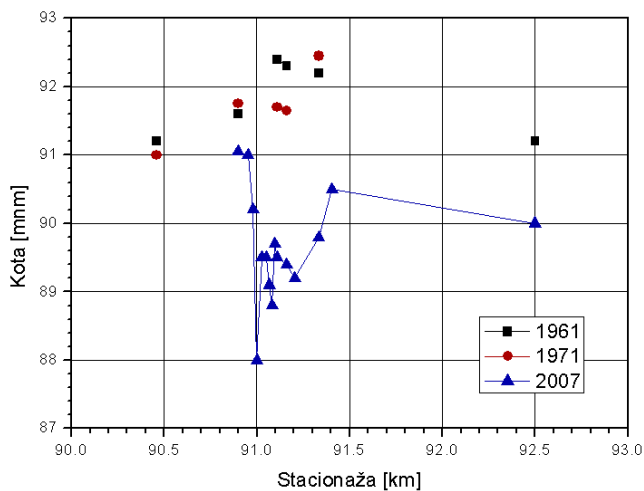
Brojni su primeri prosecanja krivina sa uspešnim i neuspešnim ishodom. Jedan od najpoznatijih je primer regulacije reke Rajne u IX. veku, gde je posledica prosecanja krivina bila velika dubinska erozija korita, opadanje nivoa podzemne vode i sušenje šuma u priobalju [4].



Slika 2. Prosek u funkciji rasteretnog kanala; 1-prosek; 2-prelivni pregradni objekat sa krunom na nivou male ili srednje vode; 3-obaloutvrda; optimalna širina proseka B_p je rezultat sumiranja troškova izgradnje proseka i pregradnog objekta T_p i troškova zaštite obale starog korita od erozije T_o ; povećanjem širine B_p rastu troškovi T_p , a smanjuju se troškovi T_o , jer se zbog smanjenja protoka i brzine toka u starom koritu za obaloutvrdu mogu primeniti lakša konstruktivna rešenja.

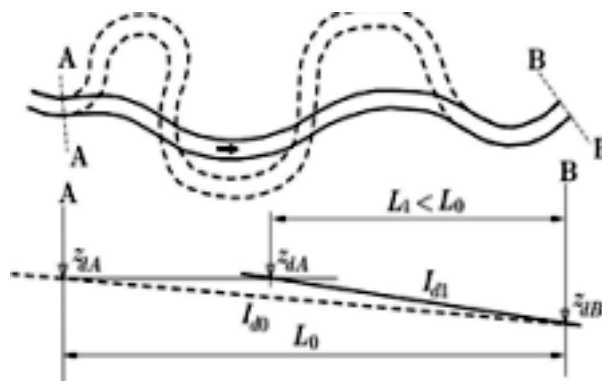
Druga reka koja je u struci poznata po presecanju krivina je Tisa. Do 1875. godine na Tisi je izvedeno 112 proseka ukupne dužine 136 km, sa ciljem da se poboljšaju plovidni uslovi i smanje inundacioni prostori. Efekti ovih prosecanja su bili polovični, jer su proseci rađeni nezavisno, ne poštujući uzvodni redosled gradnje. Do 1970. godine, u donjem toku Tise kod nas je izvedeno ukupno 31,5 km proseka. Za prosek kod Adorjana, hidraulički proračuni su kombinovani sa laboratorijskim ispitivanjima na fizičkom modelu [10].

Dinamika produbljenja korita Velike Morave prikazana na Slici 3, delimično je posledica prosecanja rečnih krivina i skraćenja trase u prošlosti (uz prekomernu eksploataciju peska i šljunka u sadašnjosti, kao i smanjenu produkciju nanosa posle obavljenih antierozivnih radova u slivu).



Slika 3. Sniženje kote dna po talvegu na Velikoj Moravi kod Markovačkog mosta (91 km uzvodno od ušća); spuštanje dna je delimično posledica regresivne erozije izazvane prosecanjem krivina u prošlosti [7].

Ovaj primer pokazuje da su regresivna erozija na uzvodnim deonicama i istaložavanje nanosa na nizvodnim deonicama pojave koje se posle prosecanja krivine mogu očekivati, ali ne i pouzdano predvideti. Međutim, već sami geometrijski odnosi, prikazani na Slici 4, pokazuju da skraćenje trase neminovno dovodi do produbljenja rečnog dna.



Slika 4. Skraćenje trase meandrirajućeg korita na deonici A-B (od dužine L_0 sa uzdužnim nagibom dna I_{d0} do dužine L_1 sa povećanim nagibom $I_{d1} = I_{d0} \cdot L_0 / L_1$) izaziva produbljenje korita [5].

Koristeći oznake na Slici 4, lako je pokazati da je:

$$\Delta z_{dA} = (I_{d1} - I_{d0}) L_1 = I_{d0} (L_0 - L_1). \quad (1)$$

Navedeni primeri potvrđuju da je svako prosecanje krivine radikalna regulaciona mera sa veoma neizvesnim posledicama po morfodinamiku rečnog korita. Zbog složene interakcije između rečnog toka i nanosa, prognoze veličine i brzine deformacije korita izazvane prosecanjem krivine su veoma nesigurne.

Ako se smatra da pojam *rizika* objedinjuje verovatnoću neke slučajne pojave (u ovom slučaju deformacije korita) i posledice te pojave (u ovom slučaju potencijalne štete izazvane morfološkim promenama korita), onda se prosecanje krivine s pravom može smatrati rizičnom interventnom merom. Stoga se u izradi projektata u oblasti regulacije reka (svih, a posebno onih koji predviđaju prosecanje krivina) mora pristupiti veoma studiozno, oslanjajući se na rezultate hidrauličko-psamoloških proračuna pomoću numeričkih modela i laboratorijskog ispiti-vanja pomoću fizičkih modela. Čak i tada, potrebna je velika obazrivost pri donošenju odluka, jer i navedeni modeli imaju svoja ograničenja.

Povoljna okolnost je to što se preliminarna ocena opravdanosti prosecanja neke rečne krivine, može doneti već u početnoj fazi projektovanja, na osnovu elementarne hidrauličko-psamološke analize. Tek ako takva, uprošćena analiza pokaže da je prosecanje opravdano, ima smisla da se pristupi zahtevnijim proračunima ili laboratorijskim proverama. Primena elementarnih hidrauličkih i psamoloških pokazatelja u problemu prosecanja krivina obrazlaže se u nastavku, uz pomoć jednog ilustrativnog primera iz prakse.

2. ELEMENTARNA HIDRAULIČKO-PSAMOLOŠKA ANALIZA PROSECANJA KRIVINA

Ispravan pristup u analizi hidrauličkih i psamološko-morfoloških posledica prosecanja krivina je da se deformacija rečnog korita sračuna pomoću odgovarajućeg matematičkog modela [6] ili ispita pomoću fizičkog modela u laboratoriji [5]. Međutim, u praksi je načešće slučaj da ne postoje potrebni uslovi da bi se tako nešto ostvarilo. U najboljem slučaju postoji samo ograničeni fond podataka o granulometrijskom sastavu materijala na rečnom dnu. Po pravilu nedostaju snimljene linije nivoa koje bi poslužile za kalibraciju računskog modela. To je naročito slučaj sa nivoima velikih voda, kada su nepogodni uslovi za merenja na terenu, a upravo tada su intenziteti brzina i tangencijalnih napona najveći i kao takvi, merodavni za procenu stabilnosti korita. Za proračun deformacije korita neophodni su i ulazni tovari nanosa, definisani na osnovu terenskih merenja, koja su kod nas retka i skopčana sa kratkim rokovima za izradu tehničke dokumentacije, kao i hroničnim nedostatkom finansijskih sredstava. U takvoj situaciji, izlaz se može potražiti u jednostavnijem pristupu, zasnovanom na analizi elementarnih indikatora kretanja vode i nanosa. Ovaj pristup ima nekoliko komponenti.

- (1) Hidraulički proračuni za stanje pre prosecanja
 - linije nivoa pri merodavnim protocima;
 - uzdužni profili rasporeda srednjih profilskih brzina i tangencijalnih napona;

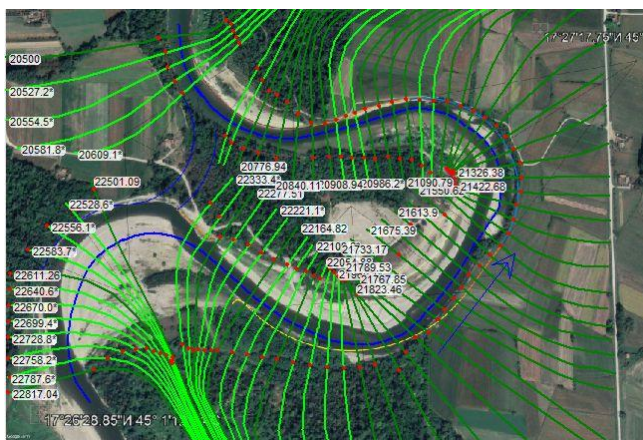
- kalibracija računskog modela (ako je moguća).
- (2) Geotehničke podloge
 - granulometrijski sastav vučenog nanosa;
 - karakteristike tla u probalju.
 - (3) Varijantna rešenja proseka
 - projektna dužina i širina proseka;
 - kineta ili iskop u punom profilu;
 - pregrada na ulazu ili bez pregrade;
 - prosek sa kaskadama ili bez kaskada;
 - (4) Hidraulički proračuni za stanje sa prosekom i starim koritom, koje ostaje aktivno i posle prosecanja
 - izbor merodavnih protoka;
 - podela protoka (prosek-staro korito);
 - linije nivoa pri merodavnim protocima;
 - uzdužni profili rasporeda srednjih profilskih brzina i tangencijalnih napona u proseku i starom koritu.
 - (5) Hidrauličke posledice prosecanja krivine
 - upoređenje podele protoka za razmatrana varijantna rešenja proseka;
 - upoređenje linija nivoa u proseku i starom koritu za varijantna rešenja proseka;
 - upoređenje rasporeda srednjih profilskih brzina i tangencijalnih napona za varijantna rešenja proseka;
 - (6) Psamološke posledice prosecanja krivine
 - promena tangencijalnog napona osrednjenog po deonicama, uzvodno i nizvodno od proseka;
 - rapored transportnog kapaciteta u vučeni nanos osrednjenog po deonicama;
 - upoređenje kapaciteta za pronos vučenog nanosa pre i posle izgradnje proseka.
 - (7) Ocena prihvatljivosti pojedinih varijantnih rešenja proseka sa stanovišta održivosti starog korita;
 - (8) Ocena opravdanosti izgradnje proseka sa stanovišta dugoročne stabilnosti rečnog korita uzvodno i nizvodno od proseka.

3. ILUSTRATIVNI PRIMER

Razmatra se prosecanje jednog razvijenog meandra u donjem toku reke Vrbas (Slika 5). U Tabeli 1 dati su raspoloživi podaci o merodavnim protocima.

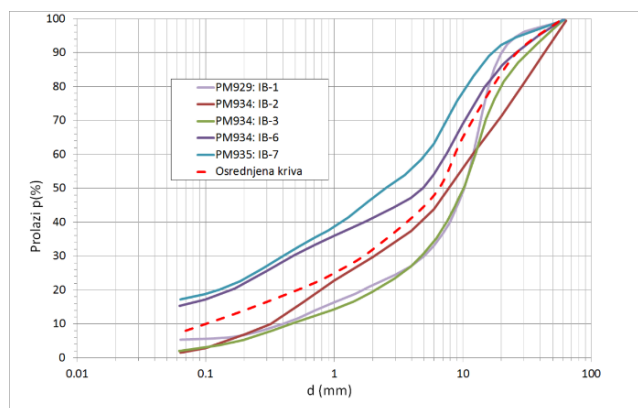
Tabela 1. Hidrološke podloge [12].

	Povratni period T	Karakteristični protok	Kraća oznaka
1	-	$Q_{95\%} = 22 \text{ m}^3/\text{s}$	Qmv
2	-	$Q_{sr} = 133 \text{ m}^3/\text{s}$	Qsv
3	5 god.	$Q_{20\%} = 854 \text{ m}^3/\text{s}$	Q5
4	10 god.	$Q_{10\%} = 1037 \text{ m}^3/\text{s}$	Q10
5	20 god.	$Q_{5\%} = 1249 \text{ m}^3/\text{s}$	Q20
6	100 god.	$Q_{1\%} = 1815 \text{ m}^3/\text{s}$	Q100



Slika 5. Meander reke Vrbas (km 20+840), sa snimljenim poprečnim profilima (tamno zelene boje) i interpolovanim profilima (svetlo zelene boje), koji su korišćeni u proračunu linijskog ustaljenog tečenja pomoću softverskog paketa HEC-RAS [1, 9, 12].

Na Slici 6 prikazane su granulometrijske krive definisane na osnovu terenskih istražnih radova [3].



Slika 6. Granulometrijske krive aluvijalnog materijala iz istražnih bušotina i osrednjena granulometrijska kriva (isprekidana linija) [3, 12].

Karakteristični prečnici zrna sa osrednje krive granulometrijskog sastava imaju sledeće vrednosti:

$$d_{10} = 0,1 \text{ mm}; d_{15} = 0,2 \text{ mm}; d_{50} = 6 \text{ mm}; d_{60} = 8 \text{ mm}; \\ d_{85} = 20 \text{ mm}; d_{100} = 60 \text{ mm}.$$

Hidrološke podloge iz Tabele 1, snimljeni poprečni profili sa Slike 5 i podaci o aluvijalnom materijalu su tipični podaci sa kojima se obično raspolaže u praksi. To je istovremeno i najmanji fond podataka koji se

može očekivati da je investitor spreman da finansira u kratkom vremenskom periodu izrade projekta.

3.1. Analiza stanja pre izgradnje preseka

Najpre su obavljeni hidraulički proračuni za stanje bez preseka. Težište je na proračunu velikih voda, koje imaju najveći uticaj na stabilnost korita.

Parametrizacija računskog modela. Kako se nije raspolagalo snimljenim linijama nivoa, kalibracija računskog modela formalno nije bila moguća¹, već su vrednosti Maningovog koeficijenta otpora usvajane na osnovu iskustva i podataka iz literature [5, 9, 11, 12]. U konkretnom slučaju, procena je da vrednost Maningovog koeficijenta otpora za glavno korito iznosi oko $0,030 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$, dok u inundacijama te vrednosti mogu biti u granicama $0,040\text{-}0,045 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$.

Pri usvajanju ovih vrednosti vodilo se računa o tome da Maningov koeficijent otpora, kao jedini parametar linijskog modela strujanja, ima karakter globalnog parametra, jer odražava sve hidrauličke otpore na datoj rečnoj deonici (rapavost korita, lokalni uticaj krivine, prisustvo vegetacije i dr.) [5, 11]. Pored toga, u slučaju kada je kalibracija modela pomoću snimljenih nivoa moguća, vrednost Maningovog parametra "apsorbuje" i nedovoljnu tačnost snimljenih poprečnih profila.

Imajući u vidu da u ovom slučaju kalibracija Maningovog koeficijenta nije bila moguća, jasno je da se apsolutno tačni rezultati ne mogu očekivati, ali se može smatrati da su oni dovoljne tačnosti za inženjerske potrebe. Pogotovo što se u praktičnim zadacima regulacije reka rezultati hidrauličkih proračuna (dobijeni sa istim uslužnim podacima) *porede u relativnom smislu* i služe kao osnov za poredjenje varijantnih projektnih rešenja i troškova njihove realizacije.

Računski domen. Krivina dužine od oko 1,6 km, prikazana na Slici 5, diskretizovana je u računskom modelu sa 75 poprečna profila, od kojih je 30 profila interpolovano između snimljenih profila [1, 12]. (Zbog ograničenog prostora, ovi profili se ovde neće prikazivati.)

Granični uslovi. Poznato je da su za proračun linijskog ustaljenog strujanja potrebna dva granična uslova; na uzvodnom kraju predmetne deonice zadaje se ulazni protok, a na nizvodnom kraju, odgovarajuća kota nivoa. Vrednosti merodavnih računskih protoka, već su navedene u Tabeli 1. Za hidrauličku analizu prosecanja krivine naročito su

¹ Snimanje nivoa je moguće samo u glavnom koritu pri malim ili srednjim vodama, a nije pri velikim vodama, a baš su one primarne u projektu prosecanja krivine.

bitni protoci velikih voda. Kriva protoka na nizvodnom kraju računске oblasti (nizvodni granični uslov) definisana je računski, pod pretpostavkom lokalno jednolikog ustaljenog tečenja (Maningova jednačina), sa osrednjenim uzdužnim nagibom dna iz nekoliko najbližih susednih profila. Inače, prosečan uzdužni nagib dna na razmatranoj deonici iznosi 2 promila.

Rezultati proračuna. Od mnoštva rezultata hidrauličkog proračuna [12], za uprošćenu analizu prosecanja dovoljni su samo uzdužni profili nivoa, srednjih profilskih brzina i tangencijalnih napona. Rezultati hidrauličkog proračuna za stanje bez preseka se ne prikazuju u ovom radu, mada će neki od tih rezultata biti korišćeni kasnije u kontekstu prosecanja krivine.

3.2. Osnovni projektni elementi prosecanja

Položaj preseka. Na Slici 7 prikazan je položaj projektovanog preseka. Vodilo se računa da prosek bude što manje dužine i da se osovina preseka na hidraulički pogodan način poveže sa osovnom postojećeg korita.



Slika 7. Položaj preseka sa računskim profilima na međusobnom odstojanju od nekoliko metara [12].

Iz usvojenog položaja preseka proizašli su osnovni geometrijski projektni elementi:

- dužina preseka: 170 m;
- dužina starog korita: 1625 m;
- stepen skraćanja trase: $1625/170 = 9,56$;
- kota dna rečnog korita na ulazu u prosek: 95,5 mm;
- kota dna rečnog korita na izlazu iz preseka: 92,0 mm;
- visinska razlika u kotama dna korita: 3,5 m;
- uzdužni nagib dna preseka: $3,5 / 170 = 2 \%$.

Može se zaključiti da su stepen skraćanja trase (9,56) i uzdužni nagib preseka (2 %) izuzetno veliki. To već u startu ukazuje da se veliki hidraulički i psamološki poremećaj može očekivati. Primenjujući izraz (1), dobija produbljenje korita na uzvodnom kraju od oko 3 m!

Varijante preseka. Projektno rešenje preseka predviđa trapezni poprečni presek, sa širinom u dnu od 60 m i nagibom kosina 1:2. Razmatrane su tri varijante ulaza u prosek.

(1) Ulaz bez pregradnog objekta, sa kotom dna 95,5 mm; voda iz korita Vrbaša slobodno ulazi u prosek, koji je aktivan pri svim protocima. To znači da se dotok sa uzvodne deonice spontano deli na prosek i staro (postojeće) korito.

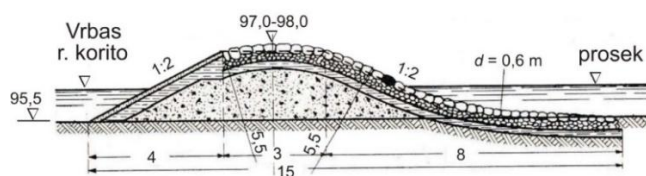
(2) Ulaz sa pregradnim, prelivnim objektom čija kota krune, 97,0 mm, odgovara koti male vode (Z_{mv}); svi protoci u domenu malih voda i dalje idu kroz staro (postojeće) korito Vrbaša, a prosek se aktivira samo pri protocima koji su veći od protoka male vode.

(3) Ulaz sa pregradnim, prelivnim objektom, čija kota krune, 98,0 mm, odgovara koti srednje vode (Z_{sv}); prosek postaje aktivan samo kada protok u reci premaši protok srednje vode.

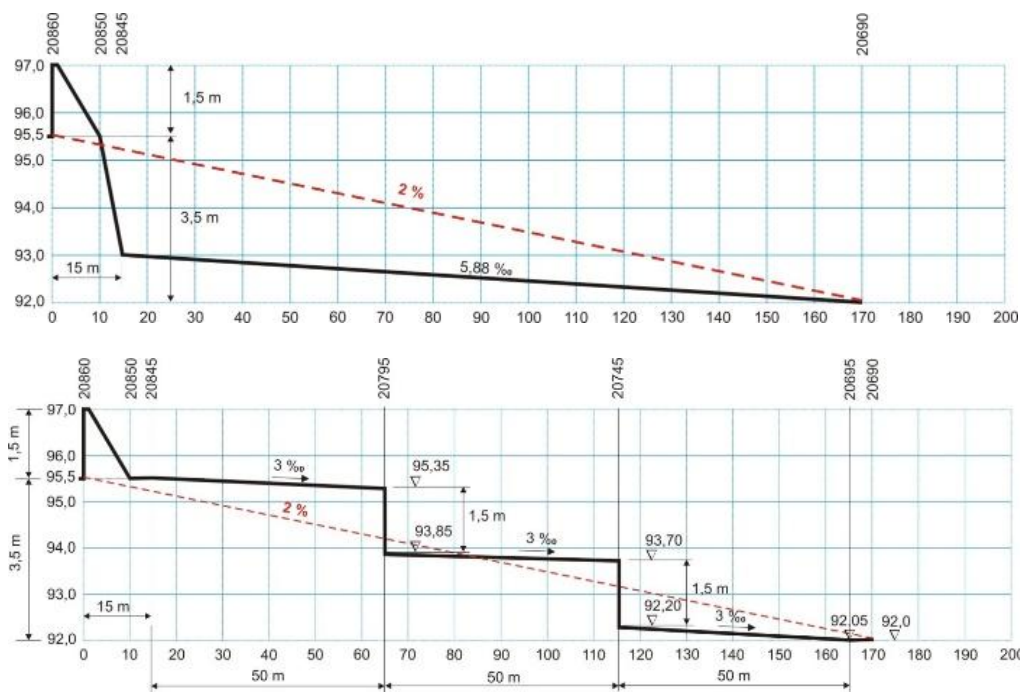
Varijante (2) i (3) su osmišljene sa namerom da se:

- a) aktiviranjem preseka samo u određenim periodima vremenski skрати hidraulički poremećaj uzvodno i nizvodno od preseka i tako bar delimično otklone nepovoljne psamološko - morfološke posledice prosecanja;
- b) spreči potpuno zasipanje starog (postojećeg) korita, u cilju održanja psamološke ravnoteže i ekološkog statusa vodotoka.

Pregradna građevina na ulazu u prosek konstruktivno može biti rešena na više načina (gabioni, betonski prag i dr.) Na Slici 8 prikazano je jedno od mogućih rešenja.



Slika 8. Pregradna prelivna građevina na ulazu u prosek; dužina pregrade je 60 m, a kota krune je na nivou male ili srednje vode [12].



Slika 9. Projektni uzdužni profili preseka; varijanta bez kaskada, sa dubinom ukopavanja na uzvodnom kraju od 2,5 m i uzdužnim nagibom dna od oko 5,9 ‰; dole: varijanta sa kaskadama visine 1,5 m i uzdužnim nagibom dna od 3 ‰. [12].

Na Slici 9 prikazane su dve varijante uzdužnog profila preseka. Varijanta bez kaskada motivisana je jednostavnijom gradnjom. Ukopavanjem i spuštanjem dna neposredno nizvodno od pregradne građevine, uzdužni nagib dna preseka je značajno smanjen – sa 2 ‰ na 5,9 ‰. Dobra strana ovog rešenja je što u periodima kada je prosek aktivan, visok nivo donje vode smanjuje brzinu toka i potapa hidraulički skok, tako da pregradna građevina na ulazu ne mora imati poseban bezen za umirenje prelivnog mlaza. Nedostatak ove varijante u odnosu na varijantu sa kaskadama su veći troškovi iskopa, oblaganja kosina, kao i veći troškovi ispumpavanja podzemne vode u toku gradnje.

Varijanta preseka sa kaskadama podrazumeva izgradnju 2 kaskade visine 1,5 m, koje dele prosek na 3 deonice dužine 50 m, sa uzdužnim nagibom dna od 3 ‰ (Slika 9, dole). Na taj način se smanjuju brzine u preseku, što doprinosi stabilnosti korita. S druge strane, troškovi ove varijante su opterećeni izgradnjom kaskada sa ojačanjem korita neposredno nizvodno od njih. Međutim, ekonomska valorizacija varijanti uzdužnog profila preseka ima smisla tek nakon sagledavanja hidrauličkih efekata obe varijante, kao i ocene opravdanosti izgradnje preseka u celini.

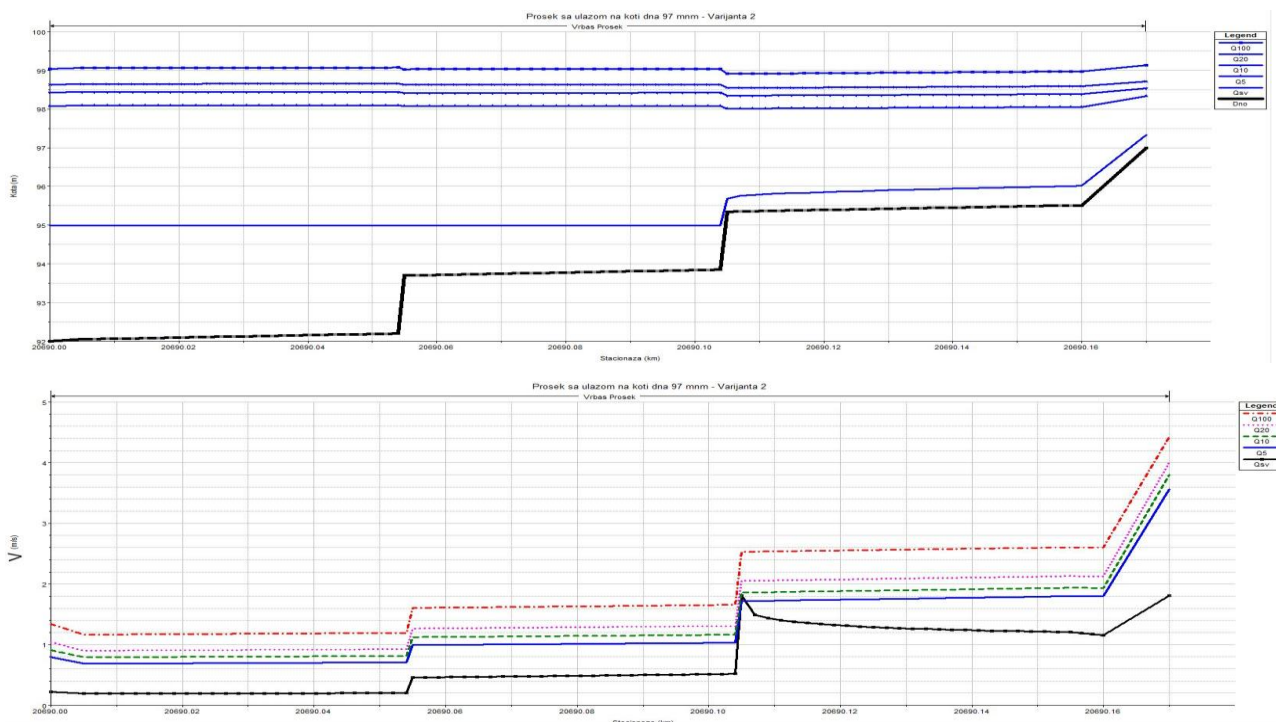
Opisana varijantna rešenja pokazuju da projektovanje preseka nije jednostavno i da zahteva puno proračuna dok se dođe do prihvatljivog hidrauličkog i ekonomskog rešenja. To se najbolje vidi iz Tabele 2, u kojoj su sumirane računске varijante u datom slučaju.

Tabela 2. Pregled računskih varijanti [12].

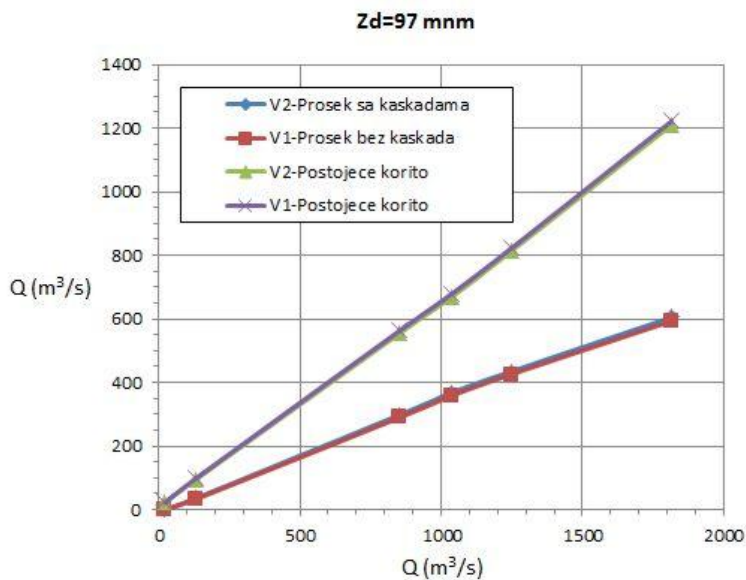
Prosek		Računske varijante (6 protoka iz Tabele 1)					
		1	2	3	4	5	6
Kota ulaza (mnm)	95,5 (rečno dno)	+			+		
	97,0 (pregrada)		+			+	
	98,0 (pregrada)			+			+
Uzdužni profil	bez kaskada	+	+	+			
	sa kaskadama				+	+	+

3.3 Analiza stanja posle izgradnje preseka

U nastavku se prikazuju rezultati proračuna preseka sa kaskadama i bez njih. Izdvojeni su samo neke osnovni rezultati koji su dovoljni za preliminarnu procenu efekata prosecanja krivine.



Slika 10. Linije nivoa u preseku sa kaskadama, nizvodno od pregrade na ulazu (gore) i uzdužni profili srednje profilske brzine (dole) [12].



Slika 11. Podela protoka na staro (postojeće) korito i prosek u slučaju pregrade sa kotom kune preliva koja odgovara koti male vode ($Z_d=97,0$ mm); na apscisi je dotok definisan vrednostima Q_{mv} , Q_{sv} , Q_5 , Q_{10} , Q_{20} i Q_{100} , a na ordinati su protoci u preseku (donja linija) i u starom koritu (gornja linija) [12].

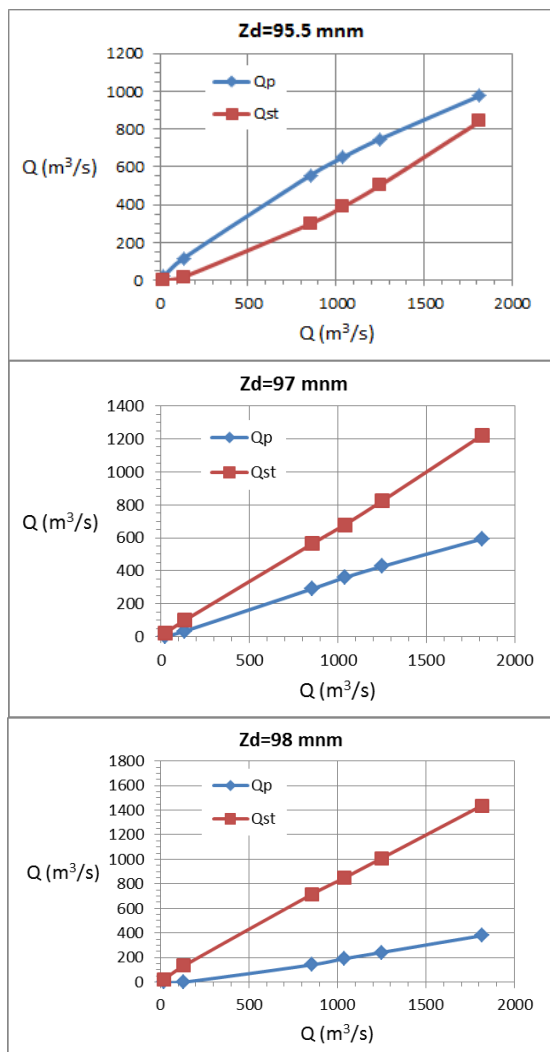
Rezultati hidrauličke analize. Ilustracije radi, ovde se navode samo rezultati za varijantu preseka sa kaskadama i pregradom na ulazu sa kotom krune koja odgovara maloju vodi, 97,0 mm (Slika 10). Može se primetiti da je pri velikim vodama povratnih perioda 5–100 godina, kod svih kaskada potopljen skok, a da se samo pri srednjoj vodi na uzvodnoj kaskadi javlja nepotopljeno prelivanje. Pri velikim vodama, najveće brzine se javljaju u prelivnom mlazu pregrade na ulazu 3,5-4,4 m/s, dok su brzine u samom preseku u prihvatljivim granicama za velike vode: 1,8-2,6 m/s.

Upoređenjem rezultata proračuna za prosek sa kaskadama i rezultata za prosek bez kaskada (Slika 11), dolazi se do zaključka da su te razlike neznatne, što se moglo i očekivati, jer podela protoka na staro korito i prosek ne zavisi od uzdužnog profila samog preseka (da li postoje kaskade ili ne), već samo od *dimenzija poprečnog profila preseka i kontrolnog preseka na njegovom ulazu* (širine i kote krune preliva).

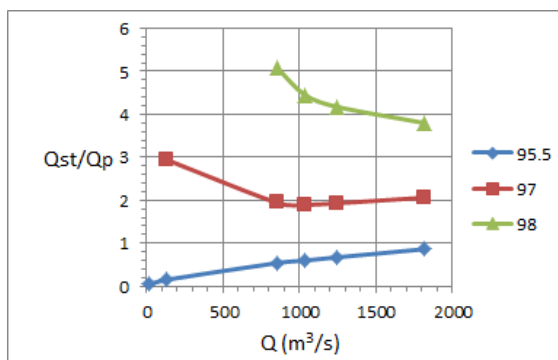
U analizi podele protoka na prosek i staro korito, na osnovu prethodnog zaključka, postaje irelevantno da li je prosek sa kaskadama ili bez njih. Na Slici 12 su dati dijagrami podele protoka na staro korito i prosek za sve tri varijante ulaza u prosek. (Objašnjenje veličina na apscisi i ordinati je isto kao na Slici 11.) Može se videti da prosek bez pregrade ($Z_d=95,5$ mm) “odvlači” vodu od starog korita, pa je protok u preseku veći od onog u starom koritu. Obrnut je slučaj kada se na ulazu u prosek postavi pregradna građevina. Što je veća njena visina, to je veći protok usmeren ka starom koritu, a manji kroz prosek. Pri koti krune preliva koja odgovara lokalnoj maloju vodi Vrbasa ($Z_d=97,0$ mm), protok kroz staro korito je približno dvostruko veći od protoka kroz prosek, dok je značajno veći pri koti krune preliva koja odgovara lokalnoj srednjoj vodi Vrbasa ($Z_d=98,0$ mm).

Ovi odnosi se još bolje sagladavaju pomoću dijagrama na Slici 13. Kod preseka bez pregrade na ulazu, odnos protoka je: $Q_{st}/Q_p < 1$. U slučaju pregrade sa kotom krune preliva na 97,0 mm, taj odnos se kreće između 2 i 3 (za velike vode je praktično konstantan, $Q_{st}/Q_p = 2$), dok je u slučaju preliva sa kotom krune 98,0 mm, $Q_{st}/Q_p = 4-5$ (za velike vode približno $Q_{st}/Q_p = 4$).

Može se konstatovati da prosek bez pregrade na ulazu nije poželjan, jer bi u njemu bio koncentrisan preveliki deo protoka, sa potencijalno neprihvatljivim deformacijama korita, dok bi staro korito u periodima malih i srednjih voda bilo osiromašeno vodom i bespotrebno prepušteno degradaciji i zasipanju.

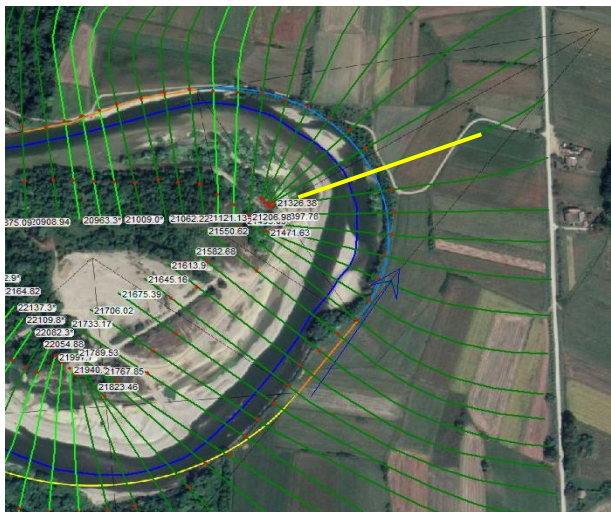


Slika 12. Podela protoka na staro korito (Q_{st}) i prosek (Q_p) za tri slučaja ulaza u prosek [12].



Slika 13. Odnos protoka (Q_{st}/Q_p) za tri ulaza u prosek.

Da bi se sagladali efekti podele protoka u temenu krivine starog korita, izabran je jedan profil (km 21326.38) kao reprezentativan (Slika 14).



Slika 14. Referentni profil (obežen žutom bojom)

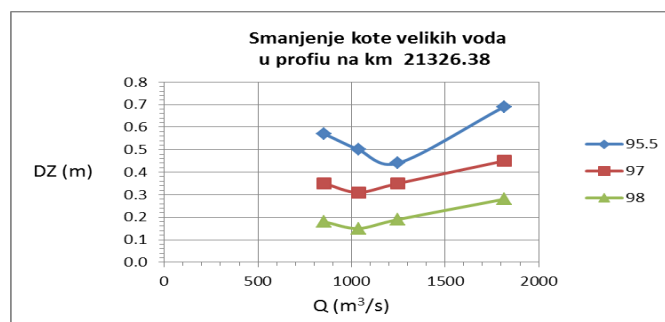
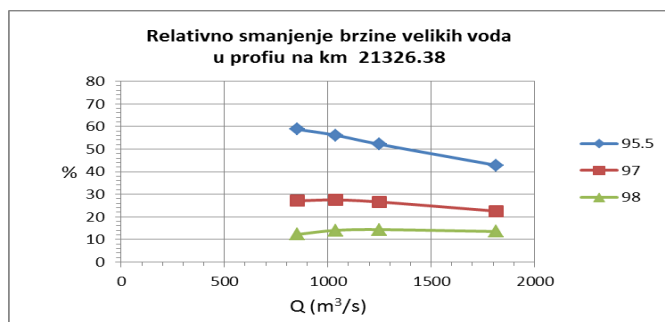
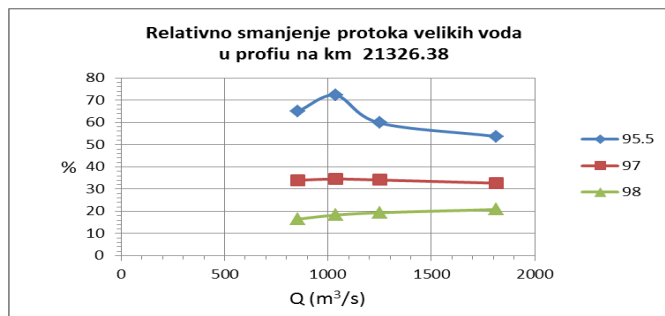
Na Slici 15 dati su dijagrami koji mogu da posluže za ocenu uticaja preseka na režim velikih voda u starom koritu.

Ako je osnovni cilj prosecanja krivine da se u periodu velikih voda smanji protok i erozioni potencijal toka u krivini, onda dijagram na ovoj slici pokazuje da je relativno smanjenje protoka najveće u slučaju preseka bez pregradne građevine na ulazu (kota dna 95,5 mm), kada iznosi između 50 i 70%. Tako veliki procenat nije iznenađujući, jer prosek odvlači veći deo protoka, što je već pokazano na Slikama 12 i 13.

U slučaju preseka sa pregradom na ulazu, relativno smanjenje protoka iznosi oko 30% kada je kota krune preliva na nivou male vode (97,0 mm), odnosno oko 20%, kada je ta kota na nivou srednje vode (98,0 mm).

Relativno smanjenje srednje profilne brzine u referentnom profilu iznosi 40–60% u slučaju preseka bez pregrade, oko 20-30% u slučaju preseka sa pregradom i kotom krune preliva 97,0 mm, odnosno oko 14% ako je kota krune preliva 98,0 mm.

Sniženje kota velikih voda u referentnom profilu je relativno veliko, 0,45-0,70 m samo kada je prosek bez pregradne građevine. Kod preseka sa kotama krune preliva 97,0 mm, odnosno 98,0 mm, sniženje nivoa u referentnom profilu iznosi 0,30-0,45 m, odnosno 0,15-0,27 m.



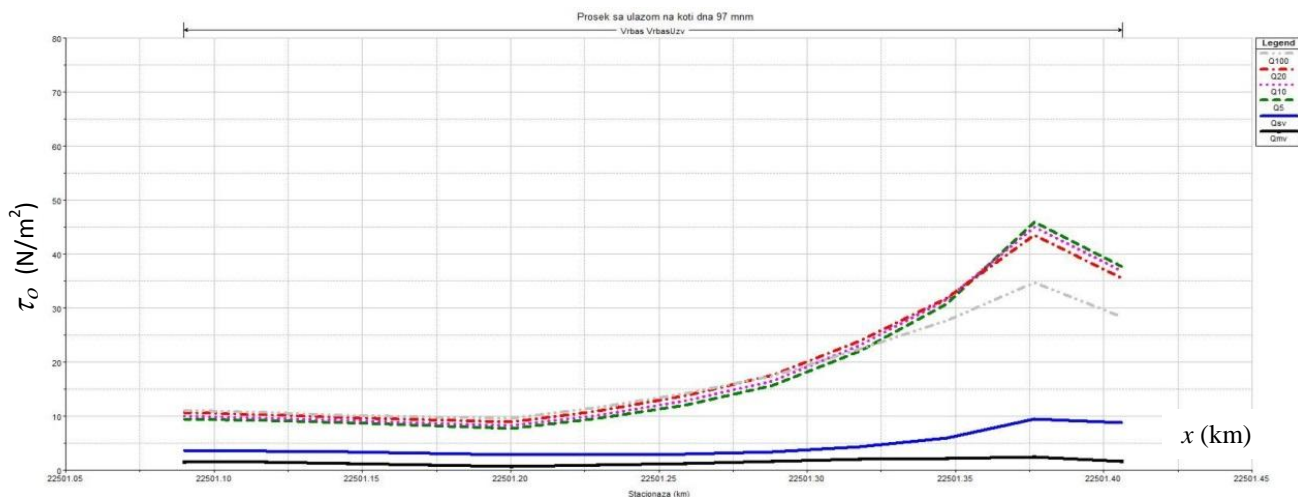
Slika 15. Dijagrami za ocenu uticaja preseka na režim velikih voda u starom koritu [12].

Dobijeni rezultati upućuju na zaključak da u periodima velikih voda, prosek sa pregradom na ulazu ne izaziva dovoljno ubedljivo smanjenje nivoa i brzine toka u starom koritu, da bi to bitno uticalo na troškove zaštite konkavne obale starog korita.

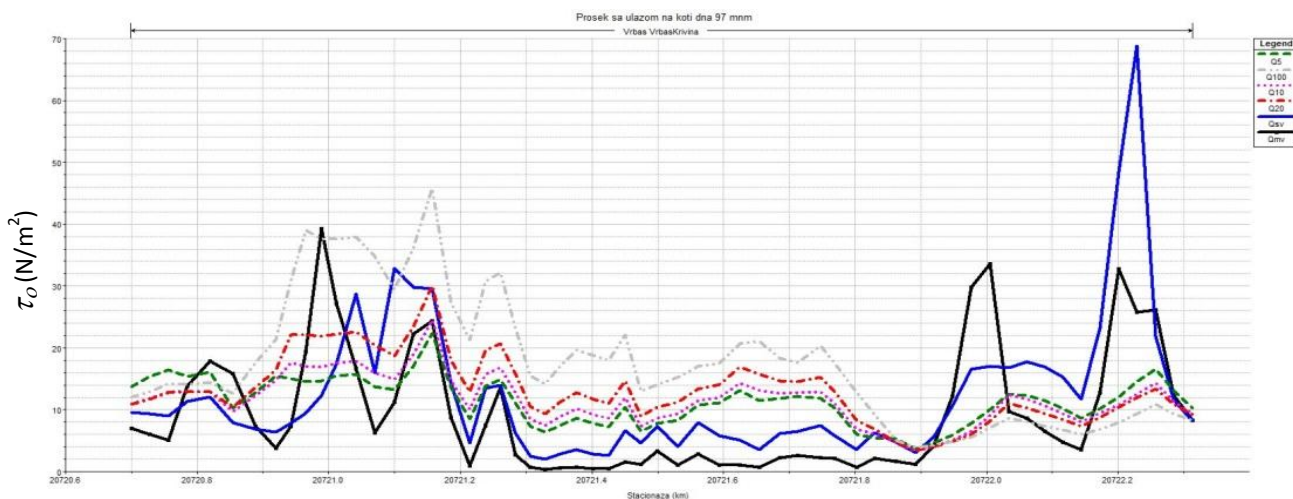
Analiza stabilnosti korita. Tangencijalni napon je ključni faktor u analizi kretanja vučenog nanosa i koncentracije suspendovanog nanosa. U neravnotežnim uslovima transporta nanosa dolazi do deformacije korita (erozije ili zasipanja), pa se tangencijalni napon na dnu istovremeno može smatrati i indikatorom potencijalne deformacije korita. Kako prosecanje krivine po pravilu izaziva regresivnu eroziju korita, od naročito je interesa razmatranje stabilnosti korita na deonici uzvodno od preseka. S druge strane, bitno je i razmatranje dugoročne stabilnosti krivine starog korita zbog njenog potencijalnog

zasipanja. Ovde se razmatra samo potencijalna erozija na deonici uzvodno od preseka (Slika 16) i u krivini starog korita (Slika 17), dok se zasipanje na deonici nizvodno od preseka neće razmatrati.

Ilustracije radi, na Slikama 16 i 17 su dati neki rezultati koji se odnose na slučaj preseka sa pregradom na ulazu, čija kota krune preliva odgovara koti male vode (Zd = 97,0 mm).



Slika 16. Raspored tangencijalnog napona na dnu deonice uzvodno od preseka u zavisnosti od protoka [12].



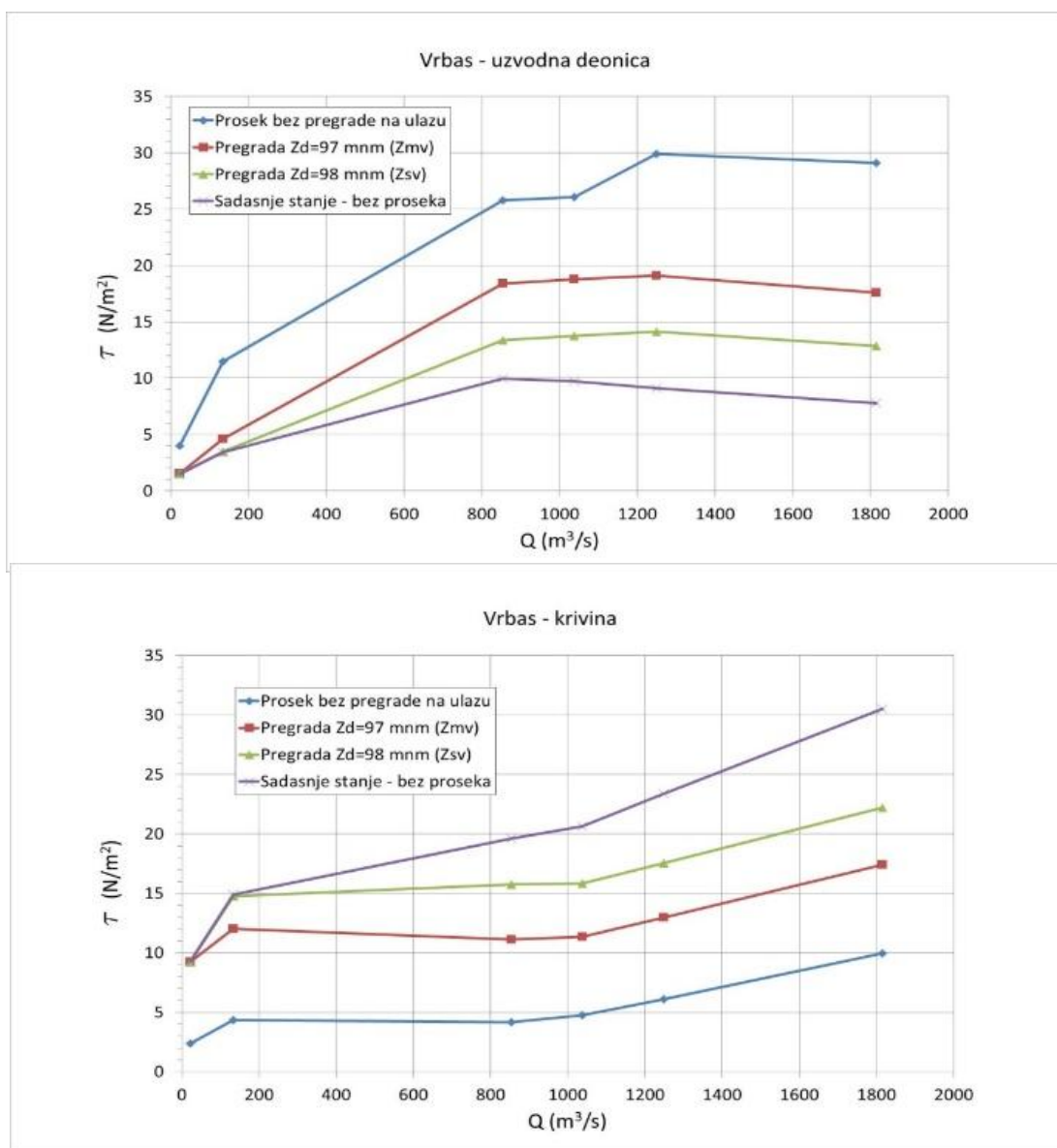
Slika 17. Raspored tangencijalnog napona na dnu starog korita u zavisnosti od protoka [12].

Tabela 3. Promena tangencijalnog napona osrednjenog po deonicama [12].

Varijanta ulaza u prosek	Deonica			
	Uzvodna		Krivina (staro korito)	
	Opseg promene	Karakter promene	Opseg promene	Karakter promene
Zd=95,5 mm	159-273 %	povećanje	67-79 %	smanjenje
Zd=97,0 mm	85-126 %	povećanje	43-45 %	smanjenje
Zd=98,0 mm	34-65 %	povećanje	20-27 %	smanjenje

Očekivano je da tangencijalni napon mora biti najveći u slučaju preseka bez pregrade, a da opada se povećanom visine pregrade. Ovaj trend je izražen u koritu preseka, dok je nešto manje izražen u krivini starog korita. Da bi se lakše mogli izvući opšti zaključci, pribeglo se *osrednjavanju tangencijalnog napona po deonicama*. Dijagrami osrednjenog tangencijalnog napona na uzvodnoj deonici i na deonici u krivini prikazani su na Slici 18. U Tabeli 3 sumirane su promene osrednjenog tangencijalnog napona na odnosu na sadašnje stanje (bez preseka), pri velikim vodama povratnih perioda $T=5-100$ godina (protoci Q5, Q10, Q20 i Q100).

Može se konstatovati da je povećanje tangencijalnog napona na uzvodnoj deonici usled prosecanja krivine, izuzetno veliko. U varijanti preseka bez pregradne građevine, to povećanje je skoro 300%, što ovu varijantu odmah diskvalifikuje kao ekstremno rizičnu po stabilnost rečnog korita. Sa druge strane, u varijantama preseka sa pregradnom građevinom, podela protoka utiče da tangencijalni napon opadne u krivini starog korita za 20–45%. (Naravno, navedeni podaci ne govore ništa o dinamici procesa erozije uzvodne deonice, niti zasipanja starog korita.)



Slika 18. Tangencijalni napon na dnu osrednjen po deonicama ($\tau = \tau_{osr}$) [12].

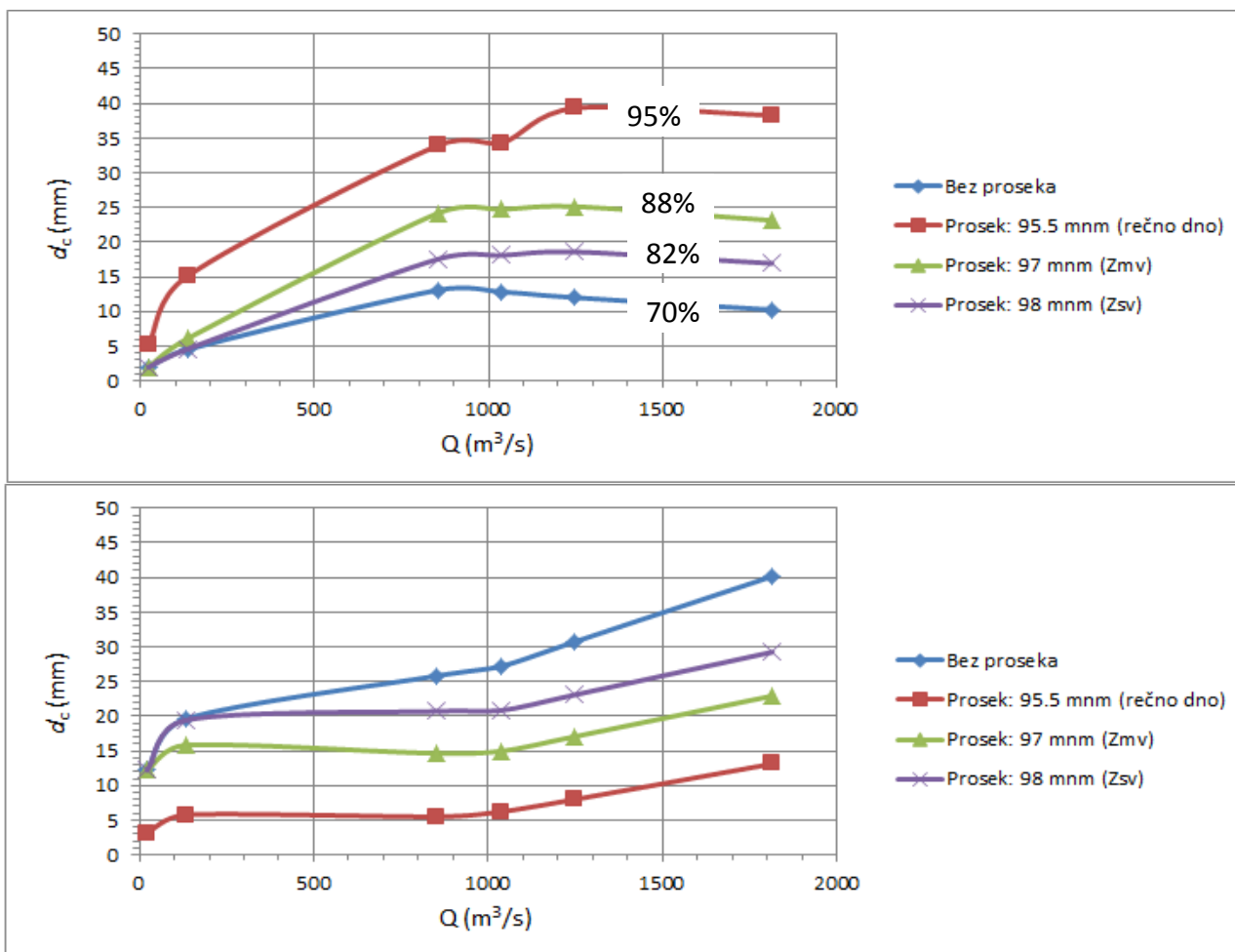
Kao logičan nastavak analize tangencijalnih napona, nameće se razmatranje *pokretljivosti materijala na dnu korita u različitim hidrauličkim uslovima*. Polazeći od poznatog izraza Mayer-Peter i Müller-a (MPM) za kritični tangencijalni napon (τ_{oc}) za pokretanje zrna prečnika (d) [5]:

$$\tau_{oc} = 0,047 g (\rho_s - \rho) d \tag{2}$$

gde je: ρ_s – gustina nanosa, ρ – gustina vode, a g – gravitaciono ubrzanje, može se definisati *gornja granica krupnoće svih pokrenutih zrna (d_c)* pri prosečnom tangencijalnom naponu na deonici (τ_{osr}):

$$d_c = \tau_{osr} / [0,047 g (\rho_s - \rho)] \tag{3}$$

Rezultati su prikazani na Slici 19.



Slika 19. Pokretljivosti zrna vučenog nanosa pri datom tangencijalnom naponu, odnosno protoku; dijagram pokazuje najveću krupnoću pokrenutih zrna na deonici uzvodno od preseka (gore) i u krivini starog korita (dole) [12].

Može se videti da se pri velikim vodama, na uzvodnoj deonici, kada nema preseka, kreću sva zrna sitnija od 10 - 15 mm, ili oko 70% svih zrna (Slika 5-19 gore). Kada se izgradi prosek sa pregradom na ulazu, gornja granica svih pokrenutih zrna raste do krupnoća 18-25 mm, što čini 82-88 % svih zrna. U slučaju preseka bez pregrade na ulazu, gornja granica pokrenutih zrna dostiže 40 mm, što znači da je 95 % zrna u pokretu, odnosno da je praktično celo dno u

procesu intenzivne erozije. Ovim je dodatno potvrđen zaključak da prosek bez pregrade na ulazu nije dobro rešenje. Sa donjeg dijagrama na Slici 19, vidi se da trend pokretljivosti nanosa u krivini starog korita ima suprotan karakter od onog na uzvodnoj deonici. U starom koritu ostvaruje se manja pokretljivost nanosa, što je očekivano, jer u zbiru, reka teži da održi prvobitni režim pronosa nanosa (koji je vladao pre prosecanja krivine).

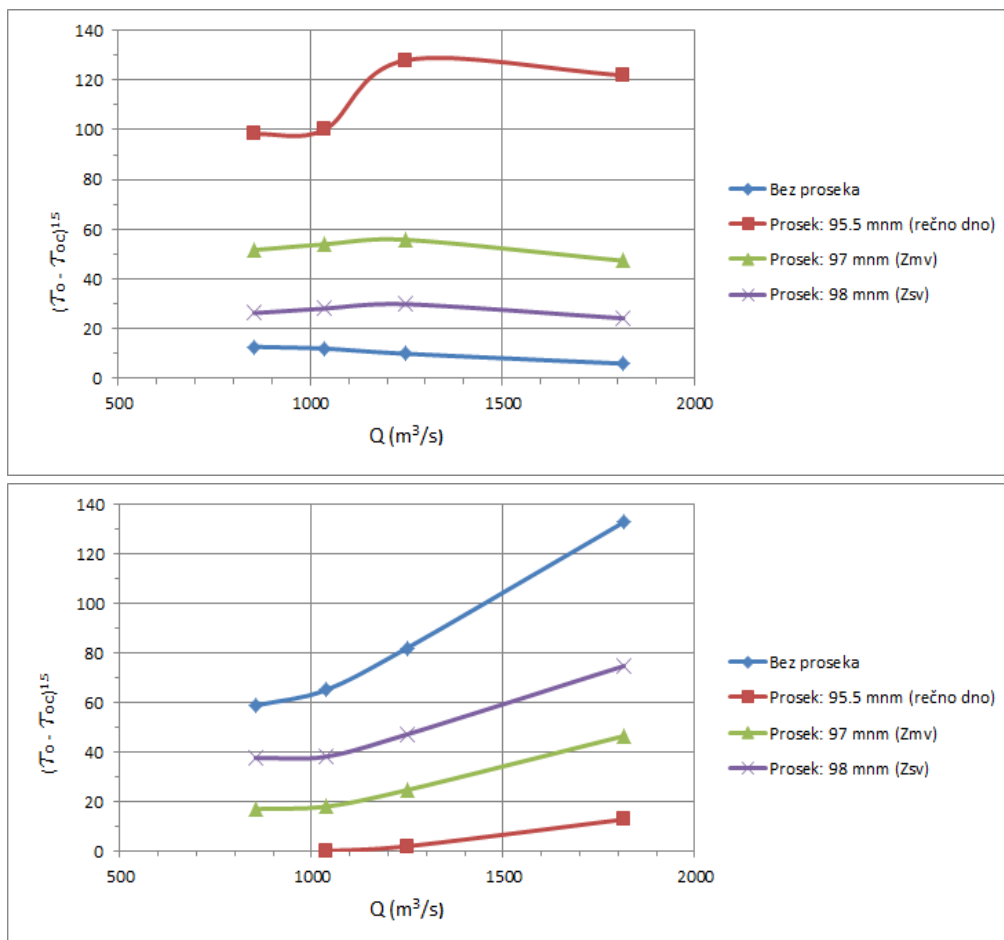
Prethodno navedena pokretljivost zrna u procentima, zasnovana je na podacima o granulometrijskom sastavu aluvijalnog materijala (Slika 6).

Da bi se dodatno potvrdili izneti nalazi, razmatran je *transportni kapacitet* za vučeni nanos. Smatrajući da je srednji prečnik zrna (d_{50}) reprezentativan za dati granulometrijski sastav, primenom izraza (2) sledi da odgovarajući kritični tangencijalni napon iznosi: $4,5 \text{ N/m}^2$. Transportni kapacitet vodotoka za vučeni nanos, osrednjen na posmatranoj deonici, proporcionalan je “višku” stvarnog tangencijalnog napona u odnosu na kritični napon [5]:

$$q_{vm} \propto (\tau_{osr} - \tau_{oc})^{3/2} \quad (4)$$

gde je: q_{vm} - jedinični maseni pronos vučenog nanosa ($\text{kg}/(\text{sm})$), a τ_{osr} - stvarni tangencijalni napon osrednjen na deonici (Pa).

Član na desnoj strani proporcionalnosti (4) može se shvatiti kao *indikator osrednjenog transportnog kapaciteta* po MPM. Vrednost ovog indikatora se menja sa protokom u reci, kao što pokazuju dijagrami na Slici 20. Opet se može konstatovati da na uzvodnoj deonici najveći poremećaj u transportu vučenog nanosa nastaje sa prosekom bez pregrade. Pri velikim vodama, u ovom slučaju će pronos vučenog nanosa na uzvodnoj deonici biti za čitav *red veličine* veći od pronosa u sadašnjem stanju, bez preseka! To ponovo upućuje na zaključak da se, zbog očekivane veoma velike eroziona opasnosti uzvodno od preseka, ovaj ne sme graditi bez pregradne građevine. U slučaju preseka sa pregradnom građevinom, gornji dijagram na Slici 20 pokazuje da se transportni kapacitet na uzvodnoj deonici povećava 2,5–5 puta, što takođe ubedljivo ukazuje na opasnost od regresivne erozije. Donji dijagram na Slici 20 govori o odgovarajućem smanjenju transportnog kapaciteta u starom koritu.



Slika 20. MPM indikator osrednjenog transportnog kapaciteta za vučeni nanos; gore: uzvodna deonica; dole: krivina starog korita [12].

Drugi način prikazivanja istih rezultata je odnos indikatora transportnog kapaciteta za slučaj korita sa prosekom i slučaj korita bez proseka:

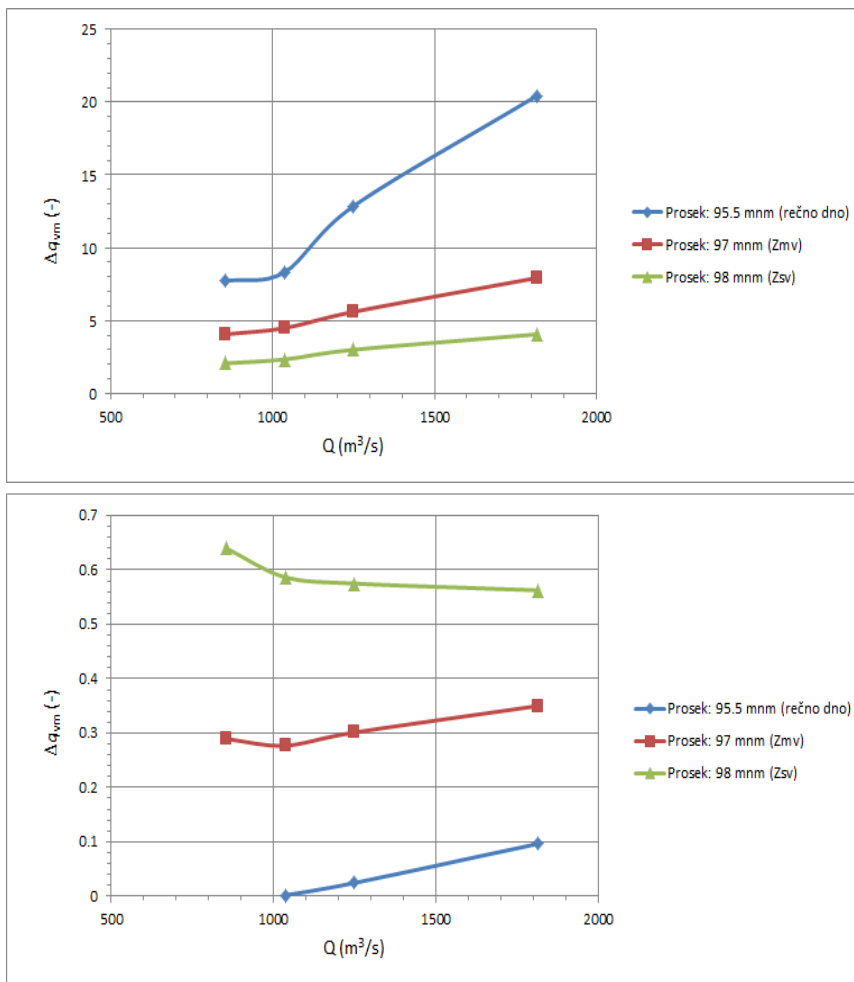
$$\Delta q_{vm} = [(\tau_{osr} - \tau_{oc})^{3/2}]_{sa\ prosekom} / [(\tau_{osr} - \tau_{oc})^{3/2}]_{bez\ proseka} \quad (5)$$

Dijagrami na Slici 21 pomažu da se bolje razume i oceni povećanje pronosa vučenog nanosa na uzvodnoj deonici, odnosno smanjenje pronosa na deonici u krivini starog korita. Ovim dijagramima su samo potvrđeni ranije izneti zaključci.

* * *

Na kraju, da se ponovi. Na konkretnom primeru je pokazano da se uticaj proseka na stabilnost rečnog korita može analizirati na krajnje uprošćen način, razmatranjem rasporeda osnovnih hidrauličko-psamoloških parametara (tangencijal-

nog napona, pokretljivosti zrna i indikatora transportnog kapaciteta). *Rezultati ovakvog pristupa samo ukazuju na trendove i služe za upoređenje u relativnom smilu: "stanje pre izgradnje proseka - stanje posle njegove izgradnje".* Složeniji proračuni stvarnog pronosa nanosa i deformacije korita zahtevaju mnogo veću bazu ulaznih podataka, uključujući i merenje pronosa vučenog i suspendovanog nanosa. Bez tih merenja se ne može pouzdano razmatrati kretanje nanosa u *neravnotežnim uslovima* (koji dovode do deformacije korita), niti se mogu definisati granični uslovi za numeričko modeliranje deformacije (erozije i zasipanja). Međutim, specifičnost merenja rečnog nanosa (kao i potrebno vreme i novac za njihovu realizaciju) su takvi da obično izlaze iz okvira standardnih projekata koji se sreću u inženjerskoj praksi.



Slika 21. Odnos očekivanog osrednjenog transportnog kapaciteta za vučeni nanos za korito sa prosekom i korito bez proseka; gore: uzvodna deonica; dole: krivina starog korita [12].

4. ZAKLJUČCI

1. Cilj prosecanja krivine je da se poveća transportni kapacitet korita za protok vode, pronos nanosa i leda, ili da se na plovnim rekama poboljšaju navigacioni uslovi. Pri tome, preporučljivo je da se evakuacija velikih voda obavlja istovremeno kroz prosek i kroz staro korito.
2. Prosecanje krivine je veoma radikalna regulaciona mera sa neizvesnim posledicama u pogledu stabilnosti rečnog korita uzvodno i nizvodno od proseka. Rizik ove mere raste sa skraćanjem trase.
3. Ako nisu u pitanju plovne reke, proseci bez pregradne građevine na ulazu nisu pogodni zbog prevelikog poremećaja prirodnog režima protoka vode i pronosa nanosa. Ovakvi proseci drastično povećavaju lokalni transportni kapacitet za vučeni i suspendovani nanos, što ima za posledicu nekontrolisanu regresivnu eroziju uzvodno od proseka i prekomerno istaložavanje nanosa (pojavu sprudova) na deonicama nizvodno od proseka.
4. Ilustrativnim primerom iz prakse je pokazano da se pri drastičnom skraćanju trase (u ovom slučaju preko 9 puta), usmeravanjem celog protoka kroz prosek, osrednjeni tangencijalni napon na uzvodnom sektoru može povećati 300% u odnosu na prirodno stanje bez proseka, a transportni kapacitet za vučeni nanos, do 20 puta!
5. Prosek sa pregradnom građevinom na ulazu je rešenje koje doprinosi boljoj kontroli podele protoka, uravnoteženijem pronosu nanosa, manjoj deformaciji korita uzvodno i nizvodno od proseka i ekološkoj održivosti starog korita. Čak i tada, može se pokazati (kao u prikazanom primeru) da je prosecanje rizično i da se ne može preporučiti.
6. Projektovanje proseka je nezamislivo bez primene numeričkih i hidrauličkih - fizičkih modela (najbolje u kombinaciji). Međutim, ovi modeli imaju svoja ograničenja i ne mogu da otklone sve neizvesnosti.
7. U praksi najčešće nedostaje neophodan fond ulaznih podataka za primenu numeričkih/fizičkih modela. Prikupljanje tih podataka zahteva specifična znanja, vreme i novac. Dok se ne steknu uslovi za primenu navedenih modela, mogu se, odmah i relativno brzo, pomoću elementarnih hidrauličkih i psamoloških pokazatelja proceniti uticaji prosecanja na stabilnost korita. Tek na osnovu te procene, može se doneti

zaključak o realnom riziku prosecanja neke krivine i opravdanosti takve regulacione mere u celini.

LITERATURA

- [1] Geodetski elaborat za potrebe Glavnog projekta za zaštitu od poplava severnog dela Republike Srpske, IWA Consult d.o.o., Beograd, 2018.
- [2] Idejno rešenje uređenja vodnog režima donjeg toka rijeke Vrbas od ušća u rijeku Savu pa uzvodno do mosta u Klačnicama na dužini od 52 km, Zavod za vodoprivredu, d.o.o., Bijeljina, 2009.
- [3] Izvještaj o geomehaničkim karakteristikama obala rijeke Vrbas, projektna mjera 1 PM 934 i 934.1, WA119, PM 929 i 929.1, PM 935, opština Srbac, IBIS – INŽENJERING, Banja Luka, 2018.
- [4] Jansen et al. Principles of River Engineering, Pitman, London, 1979.
- [5] Jovanović, M., Regulacija reka – rečna hidraulika i morfologija, Građevinski fakultet, Beograd, 2008.
- [6] Jovanović, M., Jedan primer korišćenja savremenih numeričkih alata u projektovanju i održavanju rečnih regulacionih građevina, Vodoprivreda 0350-0519, Vol. 48 (2016), No. 279-281
- [7] Jovanović, M. i dr. Studija efekata praga kod Markova-čkog mosta na rad TE „Morava“, morfologiju korita Velike Morave i režim površinskih i podzemnih voda u periodu 2008-2012, Građevinski fakultet, Beograd, 2012.
- [8] Press, H., Seewasserstraßen und Seehäfen, Verlag Von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1962.
- [9] River Analysis System HEC-RAS, US Army Corps of Engineers, V5.06, 2018.
- [10] Uredjenje reke Tise kod Adorjana, Elaborat br. 894.1, Insitut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", 1986.
- [11] Ven Te Chow, Open-Channel Hydraulics, McGraw Hill, 1959.
- [12] Zaštita od poplava Republike Srpske - Program hitne sanacije i sprečavanje poplava (EIB NO: 2010-0479), TG23 - Glavni projekti za zaštitu od poplava severnog dela Republike Srpske, Zaštita obala reke Vrbas na različitim lokacijama, IWA Consult, Beograd, 2019.

WHY ARE RIVER BEND CUTOFFS A RISKY RIVER TRAINING MEASURE?

by

Miodrag B. JOVANOVIĆ, PhD
mjovanov@grf.bg.ac.rs

Summary

Cutting off sharp river bends is a very radical river training measure with uncertain consequences regarding the stability of the river bed upstream and downstream of the cutoff. Particularly risky is to cut off just one river bend in a meandering channel. Cutoffs drastically disrupt the hydraulic and psamological regimes of the river. A cutoff leads to regressive erosion of the river channel upstream of the cutoff and its backfilling, downstream of the cutoff. Therefore, such interventions require great care and serious hydraulic and psamological analyzes using mathematical and hydraulic models.

However, application of such models requires measurements, expertise, time, and money. In this paper, it is shown by a concrete example how with the help of elementary hydraulic and psamological indicators, cutoff impact on the stability of the channel can be relatively quickly assessed. This simplified approach is useful for preliminary evaluating the risk of undertaking a cutoff, and deciding whether such a river training measure is justifiable at all.

Keywords: river training, artificial cutoffs, river sediments

Redigovano 19.10.2019.