

# LUČNI RIJEČNI PRAGOVI

**prof. dr. sc. Goran Gjetvaj**

Sveučilište u Zagrebu,  
Građevinski fakultet,  
Katedra za temeljnu hidrotehniku  
Kačićeva 26, 10000 Zagreb  
goran@grad.hr

**Antonija Cikojević, mag. ing. aedif.**

Sveučilište u Zagrebu,  
Građevinski fakultet,  
Katedra za vodno gospodarstvo  
Kačićeva 26, 10000 Zagreb

**Filip Ferenčak, mag. ing. aedif.**

Hidrokonzalt projektiranje, d.o.o.  
Hvarska 11, 10000 Zagreb

**Josip Husajina, mag. ing. aedif.**

Elektroprojekt, d.d.  
Alexandera von Humboldta 4,  
10000 Zagreb

U okviru uređenja prirodnih vodotoka, s ciljem smanjenja hidrauličke erozije koja uzrokuje produbljenje dna te time i sniženje razine površinskih i podzemnih voda, često se grade pragovi. Pragovi od kamenog nabačaja građeni okomito na smjer toka vode su iz estetskih razloga prihvatljivi, ali su u uvjetima velikih protoka podložni urušavanju. Iskustva s urušavanjem pragova na Savi kod Zagreba i Ljubljane su potakla istraživanja s ciljem iznalaženja tlocrtnog oblika pragova otpornijih na hidrauličku eroziju. U radu je prikazana usporedba stabilnosti ravnog i lučnog praga izvedenog od kamenog nabačaja. Na izgrađenim fizikalnim modelima su provedena mjerenja s osnovnim ciljem ocjene utjecaja tlocrtnog oblika praga na stabilnost. Prikazana je usporedba dvaju tipova pragova (ravnog i lučnog) gdje je pri jednakim hidrauličkim uvjetima za oba oblika mjeren broj odnesenih čestica i vrijeme u kojem dolazi do urušavanja konstrukcije. U radu su analizirane dominantne sile koje djeluju na čestice te je analiziran učinak uklještenosti kod lučnog oblika praga.

**Ključne riječi:** riječni prag, luk, vodotok

## 1. UVOD

Prilikom reguliranja korita vodotoka, a u svrhu smanjenja njegovog produbljenja uslijed nepovoljnog djelovanja hidrauličke erozije (Gilja et al. 2018.), se na vodotocima grade pragovi. Prag formira uspor uzvodno, prelijevanje preko krune i silovito tečenje na nizvodnom pokosu te vodni skok u slapištu iza praga. Na taj se način energija koja u prirodnom stanju erodira dionicu dna vodotoka disipira u vodnom skoku i među kamenim blokovima u tijelu praga. Pragovi se najčešće grade od betona ili kamena zalivenog u beton, ali su pragovi od kamenog nabačaja estetski najprihvatljiviji.

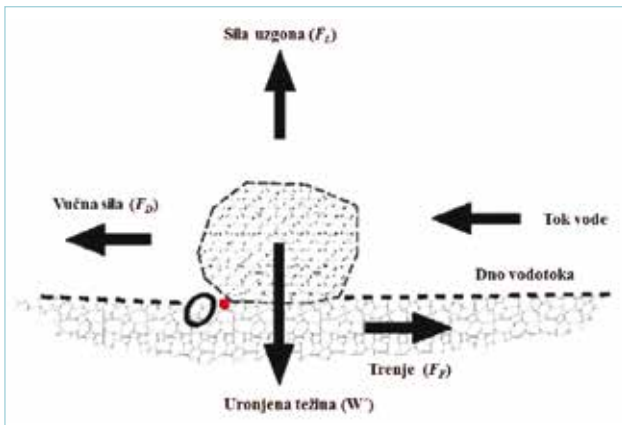
Jedna od mana pragova od kamenog nabačaja je potreba za velikim kamenim blokovima koji su u prirodi teško dostupni. Zbog svoje veličine i težine kameni blokovi zahtijevaju veliku i slabo dostupnu mehanizaciju za transport i ugradnju u specifičnim uvjetima izvođenja

u vodi koja se kreće, što uvelike utječe na troškove izgradnje.

Prilikom prelijevanja preko praga dolazi do znatnog povećanja brzine vode na kruni i na nizvodnom pokosu, što često uzrokuje oštećenja konstrukcije praga, čime se ugrožava njegova stabilnost. Zbog te je činjenice bitno prag izgraditi od materijala koji je otporan na hidrauličku eroziju te ga oblikovati na način da se postigne što veća uklještenost kamenih blokova. U radu je uspoređivana stabilnost ravnog poprečnog i lučnog praga. Prilikom provedbe pokusa, u oba slučaja je korišten isti materijal te ista geometrija praga i slapišta. Na taj se način promatrao samo utjecaj tlocrtno dispoziције praga bez analize utjecaja granulometrije, oblika zrna i slapišta. Usvojen je prag trapeznog poprečnog presjeka.

## 2. SILE MJERODAVNE ZA STABILNOST PRAGA

Na slici 1 je prikazan izdvojeni kameni blok u vodotoku te pripadne sile koje na njega djeluju. Stabilnost kamenog bloka se može promatrati u odnosu na klizanje i u odnosu na prevrtanje. Pod pretpostavkom da je dno horizontalno, klizanje počinje u uvjetima kad je hidrodinamička vučna sila  $F_D$  veća od sile trenja  $F_F$ . Uvjet prevrtanja kamenog bloka je da moment sila koje uzrokuju prevrtanje oko točke  $O$  bude veći od momenta sila koji se suprotstavljaju prevrtanju. Iako su izrazi za računanje navedenih sila i momenata poznati (Breusers, H.N.C., 1984., USDA, 2013., Schlichting, H., 1979.) koeficijenti koji ulaze u jednadžbe ovise o obliku bloka te se mogu bitno razlikovati za pojedine kamene blokove pa je praktični proračun slabo pouzdan. U inženjerskoj su praksi poznati slučajevi povećane hidrauličke erozije na mjestima izgradnje građevinskih objekata kao što su mostovi (Gilja et al. 2010.).

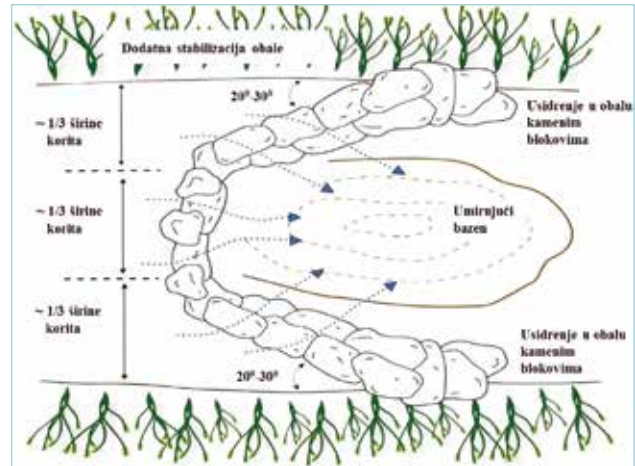


Slika 1: Raspored djelujućih sila na izdvojeni kameni blok (preuzeto iz: USDA, 2013)

U inženjerskoj se praksi najčešće grade ravni poprečni pragovi koji su jednostavniji za izgradnju i zahtijevaju minimalnu količinu građevnog materijala. Da bi se povećala ukliještenost pojedinih kamenih blokova u pragu, smanjila erozija obala vodotoka te povećala disipacija energije u slapištu, razmatra se mogućnost izgradnje lučnih pragova (slika 2).

Prilikom projektiranja i izgradnje lučnog praga potrebno je obratiti pažnju na spoj praga i obale (sidrenje praga). Sidreni blokovi su obično većih dimenzija od ostatka konstrukcije. Dodatna stabilizacija obala postiže se sadnjom biljaka snažnog korijenja te primjenom tkanina koje sprječavaju eroziju.

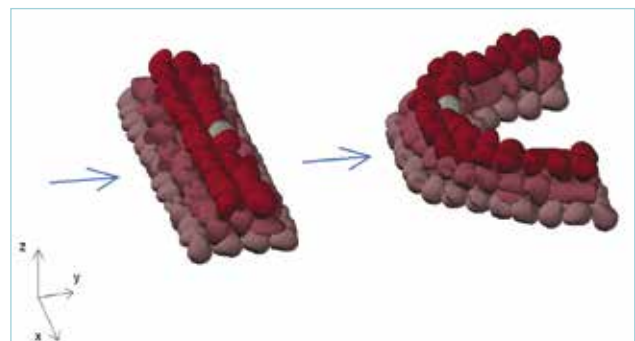
Udaljavanjem maticе i turbulentnog toka od obala povećava se stabilnost obala (Odgaard, J., 1987.), a lučni prag, svojim oblikom usmjerava prelijevanje (protok) prema sredini slapišta, čime se vodni skok formira u matici vodotoka, smanjuju se brzine toka blizu obale, a sudaranje mlazova s lijeve i desne obale pospješuje disipaciju energije i skraćuju slapište.



Slika 2: Tipični lučni prag od kamenog nabačaja (prema Rosgen, 2017.)

Prednost lučnog praga očituje se u položaju kamenih blokova koji formiraju luk, čime se postiže bolja ukliještenost te samim time i otpornost hidrodinamičkoj sili vode, što za posljedicu ima povećanje stabilnosti. Da bi se ocijenio učinak ukliještenja pojedinih kamenih čestica u lučnom pragu, izrađena je analiza sila i fizikalni model u hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Zagrebu. Mjerenja su provedena u kanalu pravokutnog poprečnog presjeka pri stacionarnim uvjetima tečenja. Uspoređivani su pragovi ravnog i lučnog oblika, pri čemu je jedini promjenjiv parametar bila tlocrtna geometrija, dok su svi ostali uvjeti ispitivanja jednaki za oba slučaja.

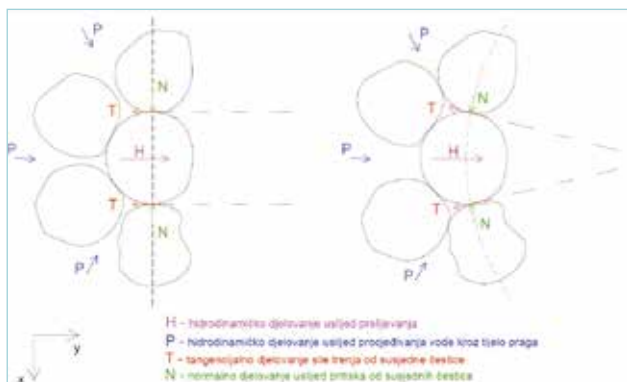
Na slici 3 je prikazan model lučnog praga sagrađen od čestica približno jednakih dimenzija. Sivo obojena čestica na slici 3 se usvaja kao najizloženija (mjerodavna) čestica i u nastavku će se analizirati opterećenja na nju.



Slika 3: Trodimenzionalni prikaz ravnog i lučnog praga sačinjenog od kamenog nabačaja

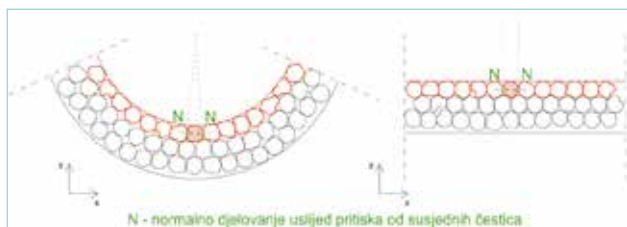
Promatrajući vanjske sile koje leže u horizontalnoj ( $x$ - $y$ ) ravnini (slika 4), mogu se navesti destabilizirajuće sile koje potiskuju česticu u smjeru toka vode i pokušavaju ju pomaknuti i odnijeti iz praga; hidrodinamičko djelovanje uslijed prelijevanja ( $H$ ) i hidrodinamičko djelovanje uslijed procjeđivanja vode kroz tijelo praga ( $P$ ). Normalne komponente sile uslijed pritiska od susjednih čestica ( $N$ ) mogu djelovati i stabilizirajuće (ukliještenje) i

destabilizirajuće. Jedina stabilizirajuća sila koja djeluje u xy-ravnini je sila trenja na kontaktu dviju susjednih čestica i sila uklještenja kod lučnog praga.



Slika 4: Vanjske sile na čestici u kruni

U ravnom poprečnom pragu su čestice posložene u redu jedna pokraj druge. Promatrat će se čestica koju vanjsko djelovanje „pokušava izgurati iz reda“ (na slici 5 je ta čestica šrafirana).



Slika 5: Prikaz krune ravnog i lučnog praga u tlocrtu

Kod ravnog praga sila trenja je jedina stabilizirajuća sila koja se protivi klizanju jedne čestice o drugu. Trenje djeluje u dodirnim točkama dviju susjednih čestica, a ovisi o hrapavosti materijala od kojeg su čestice izgrađene i o normalnoj sili koja se javlja između čestica. Kada se povuku pravci u smjeru djelovanja sile trenja dobiju se dvije paralelne tangente čija je udaljenost jednaka promjeru promatrane čestice.

U lučnom pragu najgornji red čestica ugrađen je na način kao što je prikazano na slikama 4 i 5. Kada se u kontaktnim točkama promatrane čestice sa susjednim česticama povuku tangente, one se sijeku. Time se formira uklještenost koja onemogućava čestici slobodan hod između dvije susjedne čestice, tj. ispiranje.

Zaključuje se da je u ravnom poprečnom pragu jedina stabilizirajuća sila koja ne dozvoljava da promatrana čestica ispadne iz reda, sila trenja, te kad bi čestice bile idealno glatke kugle, promatrana čestica bi lagano iskliznula iz reda.

U lučnom pragu, osim sile trenja, u kontaktnim točkama postoji i sila uklještenja koja nastaje zbog

oslanjanja promatrane čestice na njoj susjedne. Na taj se način sile prenose u petu luka.

Kada prva čestica bude odnesena snagom toka vode, na njenom mjestu ostaje šupljina. Zbog nastale šupljine susjedne čestice gube oslonac, dolazi do ispiranja sitnijih čestica te se mijenja strujna slika i hidrodinamičko opterećenje na ostale čestice. U takovim uvjetima i Karmanovi vrtlozi mogu ugroziti stabilnost ostalih čestica u pragu.

### 3. FIZIKALNI MODEL

#### 3.1. Opis modela

Fizikalni model pragova od kamenog nabačaja je izrađen u Hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Ispitivanje je provedeno u kanalu pravokutnog poprečnog presjeka širine 1.0 [m]. Crpka kapaciteta 25 [l/s] kontrolirano tlači vodu u kanal u kojem su sagrađeni modeli lučnog i ravnog poprečnog praga. Bočne stranice kanala su staklene, kako bi se omogućilo nesmetano opažanje pokusa (slika 6).

Provedena su ispitivanja prelijevanja za ravni poprečni i lučni prag u kojima je mjerena brzina koja konstrukcija praga može podnijeti do sloma, brzine koje se razvijaju pri nizvodnoj nožici praga, preljevne visine i dubine vode nizvodno od praga te odnošenje čestica praga pri određenim protocima. Ispitivanja su provedena na temelju zadovoljavanja uvjeta Froudeove sličnosti koji definira odnos inercije i gravitacije. Za modelsko ispitivanje je u kanalu izgrađen prag dužine  $L = 122$  [cm], širine  $B = 100$  [cm], visine u kruni  $H = 14$  [cm], dok je radijus krune i nožice praga (kod lučnog praga)  $R = 100$  [cm]. Prag je sagrađen od oblutaka granulacije  $\Phi = 1.6 - 3.2$  [cm]. Oba modela su rađena od istog materijala pa je utjecaj granulometrije na rezultat usporedbe ravnog i lučnog praga zanemariv. U modelu je odabran nagib pokosa 1:4. Ako se usvoji da je model napravljen u mjerilu 1:100, odnosi pojedinih fizikalnih veličina na modelu i u prirodi su prikazani u tablici 1.

Tablica 1: Odnosi pojedinih fizikalnih veličina

| Usvojene veličine na modelu                                      |               |       |                     |
|--|---------------|-------|---------------------|
| Širina fizikalnog modela   | $B_M$         | 1.00  | [m]                 |
| Protok na modelu   | $Q_M$         | 0.005 | [m <sup>3</sup> /s] |
| Izračunate veličine za prirodu uz usvojeno mjerilo $\lambda=100$ |               |       |                     |
| Širina korita u prirodi  | $B_p$         | 100   | [m]                 |
| Protok u prirodi   | $Q_p$         | 500   | [m <sup>3</sup> /s] |
| Froudov broj na modelu i u prirodi                               | $Fr_M = Fr_p$ | 2.35  | [1]                 |

Prilikom izgradnje modela, granulat se slagao na način da su manja zrna ugrađivana u podpovršinskim slojevima kao tijelo praga, a krupnija na površini kao

obloga čija je uloga sprječavanje odnošenja čestica nizvodnog pokosa. Pri konstruiranju se također kontrolira i zbijenost materijala.

### 3.2. Rezultati ispitivanja

Nakon što je izgrađen prag, u kanal je upuštena voda te je postepeno povećavan protok. Obzirom da je model praga porozan, pri malim protocima se voda procjeđivala kroz tijelo praga. Protok na modelu je povećavan intenzitetom od 0.5 – 1.0 [l/s] svakih 5 minuta, a kad je započelo prelijevanje promatrana je stabilnosti praga. Protok pri kojem počinje prelijevanje je nazvan nultim protokom.

Paralelno s početkom prelijevanja vode preko krune započelo se s mjerenjem brzine vode hidrometrijskim krilom u neposrednoj blizini nizvodne nožice praga. Brzina je mjerena na tri lokacije pomoću hidrometrijskog krila, na lijevoj i desnoj strani kanala te u njegovoj sredini. Ove tri lokacije su odabrane s ciljem sagledavanja brzina u području slapišta.

Obzirom da se želi pokazati doprinos uklještenja na izdržljivost i trajnost lučnog u odnosu na ravni poprečni prag, uz nizvodne brzine mjeri se i broj odnesenih čestica sve do urušavanja krune preljeva koja će se proglasiti slomom konstrukcije.

#### 3.2.1. Ravni poprečni prag

Ravni prag je složen na način da su sitnije čestice stavljane u tijelo praga, a krupnije na površinu tako da svojom većom težinom odolijevaju hidrodinamičkoj destabilizirajućoj sili vode. Konstrukcija je zbijana kako bi se postigla bolja uklještenost i čvrstoća praga.

Kod postepenog povećanja protoka došlo je najprije do procjeđivanja kroz tijelo praga te potom i do prelijevanja. Uslijed prelijevanja je došlo do pomaka pojedinih čestica, a s povećanjem protoka se pokazalo da slom konstrukcije nastupa kod protoka od 21.0 [l/s]. Tijekom ispitivanja su mjerene brzine na nizvodnoj strani praga i odnošenje čestica u funkciji protoka. Broj ispranih čestica u funkciji protoka je prikazan na slici 7.

#### 3.2.2. Lučni prag

Prilikom izgradnje lučnog praga, koristila se ista metoda slaganja kao i kod ravnog poprečnog praga. Brojenjem ispranih čestica prilikom prelijevanja preko lučnog praga su dobiveni bolji rezultati u pogledu protoka, pri kojem nastupa lom i broja ukupnih odnesenih čestica.

U prvim se ispitivanjima pokazalo da se voda prelijeva koncentrirajući se ka središtu korita, izazivajući time puno veće brzine vode po srednjem dijelu nizvodnog pokosa u odnosu na bočne dijelove (slika 6).

Optimizacija oblika krune je napravljena na način da srednji dio krune praga (u osi kanala) bude viši u odnosu na lijevi i desni bok praga koji su uz obale. Na taj se način povećavaju protoci s lijeve i desne strane praga pa se bočni mlazovi sudaraju i troše energiju te se time povećava disipacija energije u slapištu.



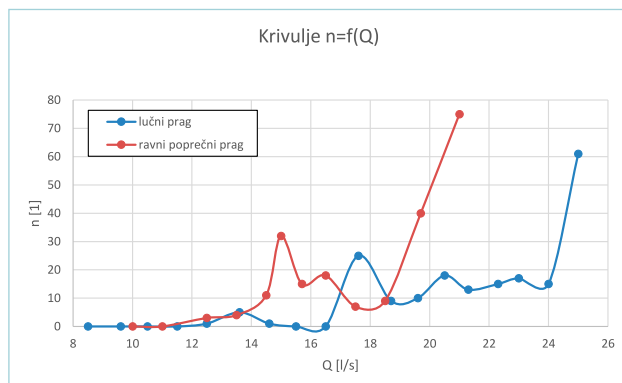
Slika 6: Rušenje lučnog praga

Prilikom prelijevanja preko lučnog praga, do odvajanja pojedinih, slabije učvršćenih čestica, dolazi neposredno nakon početka prelijevanja, a slom konstrukcije dogodio se pri protoku od 25 [l/s] (slika 6).

## 4. USPOREDBA RAVNOG POPREČNOG I LUČNOG PRAGA

Ravni poprečni i lučni prag se značajno razlikuju po načinu uklještenja kamenih čestica kao i po strujnoj slici u slapištu.

Prema grafu pronosa čestica u funkciji povećanja protoka (slika 7), vidljivo je da ispiranje slabije uglavljenih čestica na nizvodnom pokosu oba praga počinje praktički istovremeno sa početkom prelijevanja. S povećanjem protoka ravni poprečni prag prije doživi lom konstrukcije

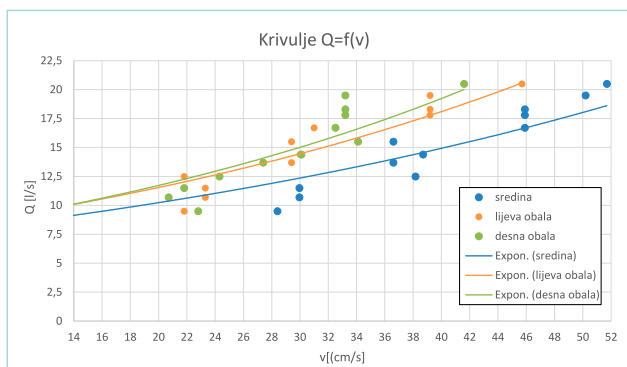


Slika 7: Ovisnost odnošenja čestica o promjeni protoka

(naglo povećanje ispiranja kamenih čestica) u odnosu na lučni prag.

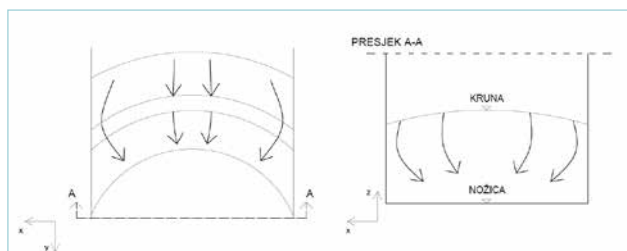
Ovime je pokazano da se lučnim pragom dobiva postojanija struktura. Do loma konstrukcije će pod utjecajem uklještenja doći nakon dužeg vremena i pri većim protocima nego kod ravnog poprečnog praga.

Kod ravnog poprečnog praga brzine su ujednačene cijelom širinom praga (slika 8). To je posljedica horizontalne krune ravnog praga.

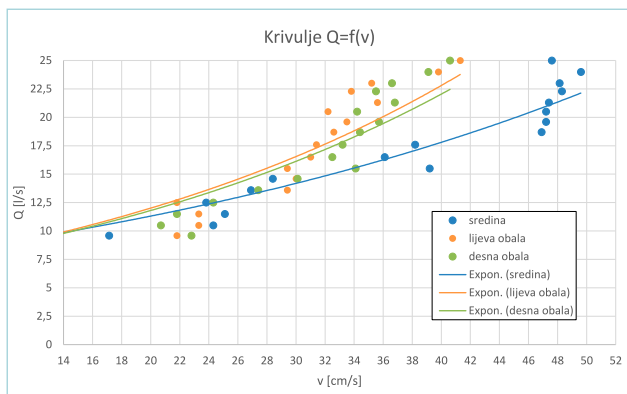


Slika 8: Brzina pri dnu nizvodnog pokosa za ravni prag

Lučni prag u tlocrtu ima zadanu zakrivljenost, a kruna praga nije horizontalna, već se spušta prema krajevima (obalama). Iz rezultata ispitivanja lučnog praga se uočava da se preljeveni mlazovi koncentriraju u središtu zakrivljenosti praga (slike 6 i 9).



Slika 9: Prieljevanje pri promijenjenoj geometriji krune lučnog praga (lijevo-tlocrt, desno-presjek)



Slika 10: Brzina pri dnu nizvodnog pokosa za lučni prag

Snižavanjem krune od sredine prema obalama praga (slika 9 desno) se na nizvodnom pokosu mlazovi uslijed lučnog oblika praga navlače prema središtu zakrivljenosti. U tom procesu dolazi do sudaranja mlazova s lijevog i s desnog boka prelijeva te se međusobnim sudaranjem dodatno disipira njihova energija. Kod ravnog poprečnog praga mlaz vode prilikom prelijevanja nema ovakvu mogućnost disipacije energije, jer se sva uzvodno akumulirana energija prelijeva jednoliko po cijeloj širini praga. Ovom pojavom dobiva se na skraćenju slapišta, što može imati za posljedicu i uštede prilikom izgradnje.

Iz rezultata mjerenja brzina iza nizvodnog pokosa (slika 8 i 10) vidljivo je kako su brzine na rubovima praga – uz obale manje kod lučnog praga u odnosu na ravni poprečni prag, čime se manje ugrožava stabilnost obala.

Kod ravnog poprečnog praga voda se jednoliko prelijeva preko cijele širine praga. Brzine su cijelom širinom ujednačene, odnosno obale nisu zaštićene od erozije kao kod lučnog praga.

## 5. ZAKLJUČAK

Za potrebe regulacije vodotoka je uobičajeno graditi ravne poprečne pragove. Iskustvo je pokazalo da su ravni poprečni pragovi izgrađeni od kamenog nabačaja u uvjetima velikih protoka podložni značajnim oštećenjima i urušavanjima. U radu je analizirana mogućnost povećanja stabilnosti poprečnih pragova pod pretpostavkom da se uzdužna os umjesto u pravcu izgradi u luku.

Na fizikalnom modelu su ispitivana dva praga: ravni poprečni prag sa horizontalnom krunom i lučni prag sa krunom blago spušenom prema obalama. Nakon provedenog laboratorijskog istraživanja ustanovljeno je nekoliko prednosti lučnog oblika praga.

Lučni prag je zbog uklještenosti kamenih blokova otporniji na hidrauličku eroziju te do urušavanja dolazi pri značajno većem hidrodinamičkom opterećenju (protoku).

Kod lučnog praga, čija je kruna oblikovana tako da joj visina blago opada od središta praga simetrično prema obalama, se preljeveni mlazovi usmjeravaju prema sredini vodotoka gdje se mlaz sa lijeve i desne strane prelijeva sudaraju. Time se postiže disipacija energije i smanjuje potrebna duljina slapišta.

Kod prelijevanja preko ravnog poprečnog praga voda teče uzduž obale i ispire ju. Lučni prag preusmjerava dio vode prema sredini vodotoka, stoga su obale izložene manjem hidrodinamičkom opterećenju.

Provedena preliminarna ispitivanja ukazuju na prednosti lučnih pragova te se predlaže provođenje daljnjih istraživanja u manjem mjerilu i sa granulatom drugačijeg oblika. ■

## LITERATURA

- Breusers, H. N. C. (1984): Lecture notes on sediment transport. Delft, Waterloopkundig Laboratorium.
- Gilja, G., Oskoruš, D., Kuspilić, N. (2010): Erosion of the Sava riverbed in Croatia and its foreseeable consequences. *Zbornik radova BALWOIS: Conference on Water observation and information system for decision support* (ur. M. Morell, C. Popovska, O. Morell, V. Stojov), Ohrid, Makedonija.
- Gilja, G., Varga, I., Kuspilić, N. (2018): Uređenje obala u svrhu zaštite od erozije. *Hrvatska vodoprivreda*, 26 (222), 41–43.
- Odgaard, J., Mosconi, C. E. (1987): Streambank Protection by Submerget Vanes, *Journal of Hydraulic Engineering*, 113 (4), 520–536.
- Rosgen, D. L. (1997): A Geomorphological Approach to Restoration of Incised Rivers. *Proceedings of the Conference on Management of Landscapes Distributed by Channel Incision* (ur. S. S. Y. Wang, E. J. Langendoen, F. D. Shields, Jr.), Oxford Campus, The University of Mississippi, Center for Computational Hydroscience and Engineering.
- Rosgen, D. L. (2017): The Cross-Vane, W-Weir and J-Hook Vane Structures... Their Description, Design and Application for Stream Stabilization and River Restoration. ([http://www.hydrology.bee.cornell.edu/BEE4730Handouts/Rosgen\\_Vanes.pdf](http://www.hydrology.bee.cornell.edu/BEE4730Handouts/Rosgen_Vanes.pdf); posjećeno [21.4.2017.])
- Schlichting, H. (1979): *Boundary-layer theory*. New York, McGraw-Hill.
- USDA (2013): Design of Stream Barbs. Kansas Engineering Technical Note No. KS-1, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Salina, Kansas.

### Arch-shaped sills

**Abstract.** Sills are often constructed as part of the regulation of natural watercourses to reduce hydraulic erosion that causes riverbed deepening and thus also the lowering of surface and ground water levels. Riprap sills constructed vertically in relation to the direction of the water flow are aesthetically acceptable; however, they tend to collapse in high discharge conditions. The experiences with sill collapses on the Sava River at Zagreb and Ljubljana initiated research geared at finding a layout sill shape that is more resilient to hydraulic erosion. The paper presents a stability-related comparison between straight and arch-shaped riprap sills. The measurements were conducted on the constructed physical models with a primary goal to assess the impact of a layout sill shape on the stability. During the comparison between the two sill types (straight and arch-shaped), in the same hydraulic conditions, the number of particles washed away and the time needed for structure collapse were measured. The paper analyses the dominant forces affecting the particles and the impact of particle adhesion for arch-shaped sills.

**Key words:** bed sill, arch-shaped, watercourse

### Bogenförmige Flussschwellen

**Zusammenfassung.** Im Rahmen der Wiederherstellung von natürlichen Wasserläufen werden oft Schwellen mit dem Ziel gebaut, die Wirkung der Wassererosion zu vermindern, die die Vertiefung des Flussbettes sowie die Erniedrigung der Oberflächen- und Grundwasserspiegel verursacht. Die Schwellen, die senkrecht zum Flusslauf aus Steinen gebaut werden, sind aus **ästhetischen Gründen** annehmbar, werden aber im Falle hoher Abflüsse bruchanfällig. Diese Untersuchungen sind durch die Fälle von Flussschwelleneinsturz auf der Save bei Zagreb und Ljubljana angeregt worden, und zwar mit dem Ziel, einen Schwellengrundriss herzustellen, der gegen die Wassererosion beständiger wäre. In diesem Beitrag wird die Stabilität von geraden und bogenförmigen Steinschwellen verglichen. Die Messungen wurden auf gebauten physikalischen Modellen durchgeführt, mit dem Hauptziel den Einfluss des Schwellengrundrisses auf die Stabilität zu bewerten. Der Vergleich von zwei Schwellentypen (gerade und bogenförmige Schwellen) wird hier dargestellt, wobei unter gleichen hydraulischen Bedingungen an beiden Formen die Anzahl von gebrochenen Partikeln und die Zeit bis zum Einsturz der Struktur gemessen wurden. In der Arbeit werden auch dominante, auf die Partikeln wirkende Kräfte sowie die Wirkung der Verteilung von bogenförmigen Schwellen analysiert.

**Schlüsselwörter:** Flussschwelle, Bogen, Wasserlauf