

# HIDROLOŠKA ANALIZA NIZOVA VODOSTAJA I PROTOKA SAVE NA VODOMJERNOJ POSTAJI ZAGREB

**dr. sc. Ognjen Bonacci,**  
**prof. emerit.**

Sveučilište u Splitu, Fakultet  
građevinarstva, arhitekture i  
geodezije  
Matice hrvatske 15, Split, Hrvatska  
[obonacci@gradst.hr](mailto:obonacci@gradst.hr)

**dr. sc. Tanja Roje-Bonacci,**  
**prof. emerit.**

Sveučilište u Splitu, Fakultet  
građevinarstva, arhitekture  
i geodezije  
Matice hrvatske 15, Split, Hrvatska

U radu su analizirani nizovima vodostaja (1920. - 2021.) i protoka (1926. - 2021.) opaženi na vodomjernom profilu Zagreb na rijeci Savi. Ustanovljene su značajne varijacije nizova minimalnih i srednjih godišnjih vodostaja. U podrazdoblju 1920. - 1974. nije uočen trend. U podrazdoblju 1975. - 1993. uočen je značajni trend snižavanja koji je iznosio oko 2 m. Minimalni godišnji vodostaji indikator su snižavanja (erozije) dna korita. Tijekom 1983. godine izgrađen je potopljeni preliv, nazvan Te-To prag. Nalazi se oko 6400 m nizvodno od vodomjerne postaje Zagreb. Do zaustavljanja snižavanja dna korita Save na profilu Zagreb došlo je 1994. godine. U razdoblju 1994. - 2021. minimalni i srednji godišnji vodostaji porasli su za oko 70 cm. Niz maksimalnih godišnjih vodostaja u razdoblju 1920. - 2021. pokazao je statistički neznačajan porast. Na oko 11 km udaljenoj uzvodnoj vodomjernoj postaji Sava Podsused proces variranja minimalnih i srednjih godišnjih vodostaja odvija se slično, ali s blagim vremenskim pomakom, kao i na vodomjernoj postaji Sava Zagreb. Tu je opadanje minimalnih i srednjih vodostaja započelo istovremeno, a porast je započeo sedam godina kasnije 2001. godine. Na vodomjernoj postaji Sava Čatež, koja se nalazi u Sloveniji, do opadanja minimalnih godišnjih vodostaja je došlo 1967., osam godina prije nego na lokaciji Sava Zagreb. Kod niza minimalnih godišnjih protoka Save kod Zagreba uočen je statistički značajan pad prosječnih godišnjih protoka u podrazdoblju 1979. - 2021. ( $Q = 71,4 \text{ m}^3/\text{s}$ ) u odnosu na prethodno podrazdoblje 1926. - 1978. ( $Q = 88,3 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Kod niza srednjih godišnjih protoka Save kod Zagreba uočen je statistički značajan pad prosječnih godišnjih protoka u podrazdoblju 1981. - 2021. ( $Q = 287 \text{ m}^3/\text{s}$ ) u odnosu na prethodno podrazdoblje 1926. - 1980. ( $Q = 326 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Kod niza maksimalnih protoka u recentnom podrazdoblju 2004. - 2021. ( $Q = 2033 \text{ m}^3/\text{s}$ ) uočen je statistički značajan porast u odnosu na prethodno podrazdoblje 1926. - 2003. ( $Q = 1772 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Za niz srednjih godišnjih protoka u razdoblju 1926. - 2021. vrijednost Hurstovog eksponent je 0,691. Niz srednjih dnevnih protoka Save kod Zagreba analiziran je metodom dan za danom varijabilnosti protoka (DTDQ).

**Ključne riječi:** vodostaj, protok, Sava Zagreb, dan za danom varijabilnost protoka, Hurstov eksponent

## 1. UVOD

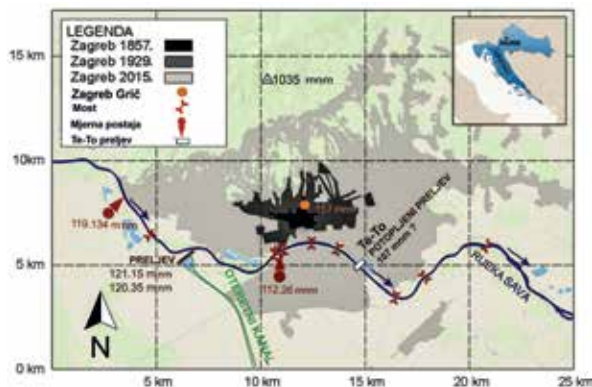
Dugi vremenski nizovi hidroloških parametara opaženi na nekoj vodomjernoj postaji pružaju mogućnost analize razvoja procesa koji su se tijekom raspoloživog vremena mjerenja odvijali ne samo na toj lokaciji već i na uzvodnom potezu otvorenog vodotoka. Idealnu mogućnost za tu vrstu analiza pružaju nizovi mjernih karakterističnih (minimalnih, srednjih i maksimalnih) vodostaja (1920. - 2021.) i protoka (1926. - 2021.) Save na vodomjernom profilu Zagreb. Ovaj vodomjerni profil ima osobitu važnost prvenstveno zbog činjenice što oko 100 godina prati promjene dva osnovna hidrološka parametra, vodostaja i protoka, na lokaciji koja je od bitnog značaja za glavni grad Hrvatske. U razdoblju od 1920. do danas na rijeci Savi oko Zagreba, a još više uzvodno dešavale su se brojne promjene. Neke od njih su bile prirodne, ali su u posljednjih sto godina većinom rezultat antropogenih djelatnosti. Područje grada se u razdoblju od početka 20. stoljeća do danas proširilo od oko 100 km<sup>2</sup> na više od 1700 km<sup>2</sup>. Broj stanovnika porastao je s oko 10.000 na 767.131 (popis stanovništva 2021. godine). Novi ili Južni Zagreb, područje je današnjeg Zagreba južno od rijeke Save. Urbanističko-arhitektonska cjelina planski je izgrađena u drugoj polovici XX. stoljeća. Razvoj područja Novog Zagreba započinje gradnjom Mosta slobode i Mosta mladosti koji su povezali dijelove grada razdvojene rijekom Savom.

Na [slici 1](#) prikazan je preklap situacija korita rijeke Save iz 19. stoljeća s današnjim stanjem na području grada Zagreba (Slukan Altić 2010; Kuspilić i sur. 2020). Radovi na regulaciji korita rijeke Save kod Zagreba otpočeli su 1899. godine. Glavnina zahvata je obavljena između 1900. i 1918. godine kada korito Sava kod Zagreba dobiva svoj današnji oblik (Slukan Altić 2010.).

Tijekom posljednjih sto godina kao posljedica brojnih, ali uglavnom nedovoljno analiziranih i kontroliranih radova koje je čovjek izvršio na slivu i u koritu rijeke Save došlo je hidroloških promjena na Savi do Zagreba (Kratofil 2000; Potočki i sur. 2021). Uslijed aktivnosti na vodotoku i riječnom slivu, režim voda i nanosa rijeke Save značajno je promijenjen. Na području grada Zagreba korito Save ima tendenciju produbljivanja (Biondić 2000; Gilja i sur. 2010). Produbljivanjem korita



**Slika 1:** Situacije korita rijeke Save krajem 19. stoljeća (prije početka regulacijskih radova) i današnjeg stanja na užem području grada Zagreba (Slukan Altić, 2010.; Kuspilić i sur. 2020)



**Slika 2:** Karta s ucrtanim vodomjernim postajama Podsused i Zagreb, preljevom Jankomir i oteretnim kanalom te položajem Te-To potopljenog preljeva (praga) i mostova na rijeci Savi u širem području Zagreba



**Slika 3:** Karta Save u Sloveniji s ucrtanim položajima hidroelektrana i vodomjerne postaje Čatež (Tootle i sur. 2023)

na utjecajnom području zaobalja dolazi do snižavanja razina podzemnih voda (Kuspilić i Gilja, 2016.; Vujević i Posavec, 2018.). Takvi trendovi predstavljaju višestruki problem za vodoopskrbu grada Zagreba, osobito u sušnim razdobljima. S namjerom da se zaustavi ili barem ublaže uzvodni procesi erozije korita 1983. godine izgrađen je tzv. Te-To potopljeni preljev (praga) 6400 m nizvodno od vodomjernog profila Zagreb. Položaj mu je ucrtan na [slikama 1 i 2](#). Do 1993. bio je više puta rekonstruiran i nadograđivan. Sanacijom praga 1989. godine kota krune praga bila je postavljena na kotu 106,75 metara nad morem (mnm). Rekonstrukcijom praga 1993. godine kota krune je postavljena na 107,00 mnm. Nizvodno od praga javlja se značajna erozija dna korita koja ugrožava stabilnost praga i kontinuirano zahtijeva sanaciju (Kalinić i sur. 2019).

Na [slici 3](#) se nalazi karta Slovenije na kojoj su ucrtani tok rijeke Save i položaji osam hidroelektrana do sada izgrađenih na njoj (Tootle i sur. 2023). U [tablici 1](#) navedene su njihove osnovne karakteristike. Za potrebe analiza vršenih u ovom radu posebno je interesantan podatak o početku rada pojedine od njih. Uočava se da je prva veća hidroelektrana Vrholovo puštena u rad 1993. te da su preostale četiri nizvodno od nje započele s radom između 2006. (HE Boštanj) i 2017. (HE Brežice).

Cilj ovog rada je da se pokuša utvrditi koliko su pojedini od poznatih nam radova utjecali na promjene režima karakterističnih (minimalnih, srednjih i maksimalnih)

Tablica 1: Osnovne karakteristike hidroelektrana na Savi u Sloveniji

hidroelektrana	$Q_{inst}$ ( $m^3/s$ )	Početak rada (godina)	Volumen ( $hm^3$ )	Povr. sliva ( $km^2$ )
Moste	$2 \times 13$	1952.	2,94	325
Mavčiče	$2 \times 130$	1986.	1,68	1480
Medvode	$2 \times 75$	1953.	1,12	1513
Vrhovo	$3 \times 166,7$	1993.	8,60	7198
Boštanj	$3 \times 166,7$	2006.	8,00	7228
Blanca	$3 \times 166,7$	2009.	9,95	7614
Krško	$3 \times 166,7$	2013.	6,31	7777
Brežice	$3 \times 166,7$	2017.	19,3	7869*

\*površina sliva vodomjerne postaje Brežice

vodostaja i protoka Save kod Zagreba.

## 2. MATERIJALI I METODE

### 2.1. Korišteni materijali

U radu su korišteni podaci karakterističnih godišnjih minimalnih, srednjih i maksimalnih vodostaja i protoka Save na vodomjernom profilu Zagreb. Za nizove vodostaja raspolagalo se s razdobljem 1920. - 2021. (102 godine), dok se za nizove protoka raspolagalo s podacima iz razdoblja 1926.-2021. (96 godina). U radu su korišteni i nizovi vodostaja i protoka Save na vodomjernoj postaji Podsused. Za tu postaju za nizove vodostaja raspolagalo se s razdobljem 1923. - 2021. (99 godina), dok se za nizove protoka raspolagalo s podacima iz razdoblja 1949. - 2021. (73 godine). Korišteni su službenim podacima Državnog hidrometeorološkog zavoda iz Zagreba.

Podaci za postaju Čatež dobiveni su iz baze podataka ARSO (Agencija Republike Slovenije za Okolje) ([www.arso.gov.si](http://www.arso.gov.si)). U razdoblju 1926. - 1975. radila je vodomjerna postaja Čatež. U razdoblju od 1976. do 2021. funkcionira postaja Čatež I, locirana 675 m nizvodno od postaje Čatež. Za ove dvije postaje za nizove vodostaja raspolagalo se s razdobljem 1955. - 2021. (67 godina), dok se za nizove protoka raspolagalo s podacima iz

razdoblja 1926. - 2021. (96 godina).

U tablici 2 navedeni su osnovni podaci o ove tri postaje te o položaju Te-To potopljenog preljeva (praga).

### 2.2. Korištene metode

U članku je korištena metoda dan za danom varijacije srednjih dnevnih protoka (u daljnjem tekstu DTDQ). Ova se metoda do sada upotrebljavala za analize varijacija karakterističnih (minimalnih, srednjih i maksimalnih) dnevnih temperatura (Gough 2008; Gough i Hu 2016; Bonacci i Roje-Bonacci 2020) Koliko nam je poznato metoda se prvi put koristi za analize varijacija srednjih dnevnih protoka. Izraz za proračun DTDQ glasi:

$$DTDQ = \sum_n |Q_i - Q_{i-1}| / (n-1) \quad (1)$$

gdje  $Q_i$  predstavlja srednji dnevni protok u danu i  $Q_{i-1}$  predstavlja srednji dnevni protok u prethodnom danu, i-1, dok n označava broj uključenih dnevnih podataka.

Metodom *Rescaled Adjusted Partial Summs* (RAPS) analizirani su vremenski nizovi srednjih godišnjih protoka (Garbrecht i Fernandez 1984). Izraz za proračun glasi:

$$RAPS_k = \sum_k ((Q_k - Q_{pr}) / \sigma Q) \quad (2)$$

Tablica 2 Osnovni podaci o vodomjernim postajama čiji su podaci korišteni u radu i Te-To pragu

postaja	Kota „0“	Riječni kilometar	Površina sliva	Geografske koordinate	
	(mnm)			(km)	( $km^2$ )
ČATEŽ (1926.-1975.)	138,383	737,37	10.231,72	45°53'35"	15°36'07"
ČATEŽ I (1976.-2021.)	137,28* 137,32**	736,695	10.232,42	45°53'36"	15°36'53"
PODSUSED	119,134	713,886	12.314	45°48'27"	15°50'19"
ZAGREB	112,260	702,80	12.450	45°47'04"	15°57'12"
Te-To prag	107,00	696,40			

\*važi od 1. 1. 1976. do 19. 1. 2016.

\*\*važi od 20. 1. 2016. do 31. 12. 2021.

JESENICE 728,900 rKM slovenske Jesenice 728,4

kod čega je  $Q_{pr}$  prosječna vrijednost analiziranog vremenskog niza koji se sastoji od  $n$  članova,  $\sigma_Q$  standardna devijacija istog niza,  $k=1,2,\dots, n$ , predstavlja brojač tijekom sumiranja.

Računati su linearni trendovi vremenskih nizova, a u nekim slučajevima i parabolni trendovi. Za linearne trendove definirani su koeficijenti determinacije  $R^2$ , dok su za parabolne trendove izračunati indeksi korelacije,  $IR^2$ . Statistička značajnost linearnih trendova ocjenjivana je Mann Kendallovim testom (Mann 1945; Kendall 1975; Husain Shourov i Mahmud 2019).

F-test i t-test su korišteni za računanje statističke značajnosti razlika između prosječnih vrijednosti susjednih vremenskih podrazdoblja. F-test se koristio za određivanje statističke značajnosti razlika varijanci, dok se t-testom vršila procjena statističke značajnosti razlika prosječne vrijednosti dva susjedna vremenska podrazdoblja (Pavlić 1965). Za sva tri prethodno spomenuta testa kao nivo statističke značajnosti razlika korištena je vrijednost vjerojatnost,  $p < 0,05$ .

Hidrološki vremenske procese pokreću složeni fizički zakoni i mehanizmi koje je često teško uočiti. Zavisnost među promatranjima, može trajati duži period, tj. prošlost u nekim procesima može imati dugoročan utjecaj u budućnosti. Radi se o fenomenu dugoročnog pamćenja na čije je postojanje ukazao hidrolog Hurst (1951., 1956.). Zaključio je da u mnogim inženjerskim problemima podaci raspoloživih vremenskih nizova nisu pouzdani izvor za buduće ponašanje već predstavljaju samo različiti stupanj vjerojatnosti. Ustanovio je da neke pojave pokazuju karakteristično jaku zavisnost tako da je čak i njihova daleka prošlost značajno povezana s budućnosti. Hurstov eksponent je statistička mjera dugotrajne memorije neke vremenske serije.

U ovom radu je analizirano ponašanje vremenskog niza srednjih godišnjih protoka Save kod Zagreba,  $Q_t$ , gdje je,  $i \in (1, 2, \dots, n)$  u razdoblju 1926. - 2021. Računati su rasponi kumulativnih odstupanja dotoka u pripadnom trenutku od prosječnog dotoka. Hurst (1951., 1956.) te Hurst i sur. (1965.) su zaključili da se skalirani raspon  $R/\sigma$  ( $\sigma$  predstavlja standardnu devijaciju niza) povećava s duljinom serije  $n$ . Razlika protoka  $Q_t$  i prosječnog protoka cijelog niza  $Q_{pr}$  u trenutku,  $i$ ,  $\Delta Q_t$ , na kraju svakog razdoblja  $i$  iznosi:

$$S_i = \Delta Q_i = Q_i - Q_{pr} \quad (3)$$

Izraz, ovisno o predznaku, opisuje punjenje ili pražnjenje sustava (akumulacije). Nakon razdoblja,  $i = n$ , sukcesivna suma kumulativnih odstupanja se računa izrazom:

$$\sum_n S_i = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \dots + \Delta Q_n \quad (4)$$

Maksimalna se vrijednost naziva maksimalni suvišak ili maksimalna parcijalna suma odstupanja te je označena kao  $S_n^+$ . Minimalna se naziva minimalni deficit ili minimalna parcijalna suma odstupanja, a označava

se kao,  $S_n^-$ . Raspon,  $R$ , računa se kao zbroj ovih dviju vrijednosti:

$$R = S_n^+ + |S_n^-| \quad (5)$$

Raspon  $R$  predstavlja veličinu sustava (akumulacije) potrebnu da se održava istjecanje  $Q_{pr}$  (prosječna vrijednost svih dotoka), ukoliko su dotoci jednaki  $Q_t$ .

Prirodni fenomen i duljina serije prema tom istraživanju dani su empirijskom relacijom:

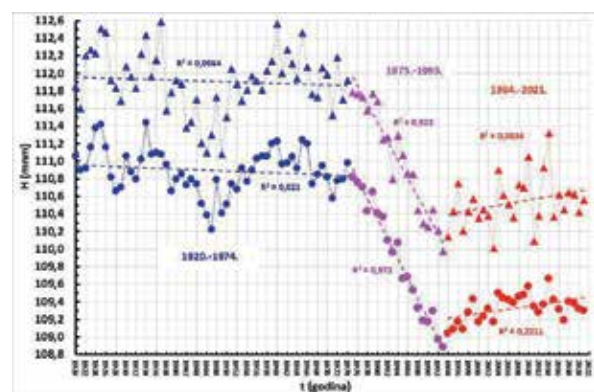
$$R/\sigma = (n/2)^H \quad (6)$$

kod čega je  $H$  Hurstov eksponent s prosječnom vrijednošću od 0,73 sa standardnom devijacijom 0,09. Ove su vrijednosti izračunate na osnovu analize 75 fenomena i 690 skupova podataka. Fenomen Hursta, tj. perzistentnost u analiziranom vremenskom nizu se javlja kad je vrijednost  $H$  veća od 0,5.

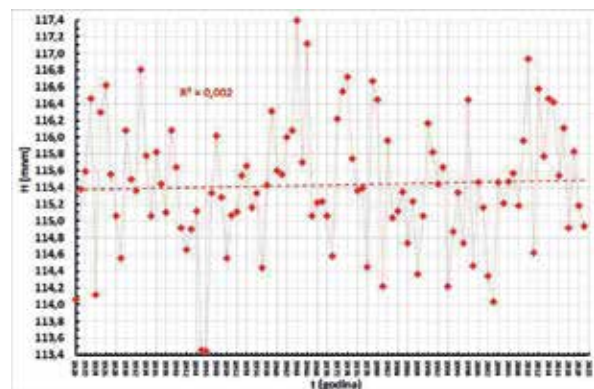
### 3. REZULTATI I RASPRAVA

#### 3.1. Analiza vodostaja

Na slici 4 ucrtani su nizovi minimalnih (označeno punim krugovima) i srednjih (označeno punim trokutima) godišnjih vodostaja Save na vodomjernoj



Slika 4: Nizovi minimalnih (označeno punim krugovima) i srednjih (označeno punim trokutima) godišnjih vodostaja Save na vodomjernoj postaji Zagreb u razdoblju 1920. - 2021. Upisane su i vrijednosti koeficijenta determinacije  $R^2$  za svako pojedino podrazdoblje.



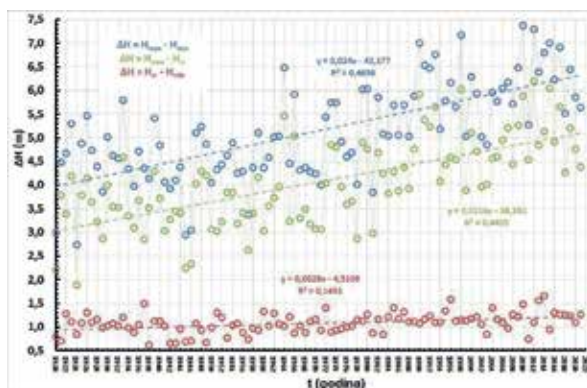
Slika 5: Niz maksimalnih godišnjih vodostaja Save na vodomjernoj postaji Zagreb u razdoblju 1920. - 2021.

postaji Zagreb u razdoblju 1920. - 2021. Na oba niza se uočava da u podrazdoblju 1920. - 1974. postoji vrlo blagi (statistički neznačajni) trend opadanja. Naglo opadanje je započelo 1975. godine i trajalo je do 1993. godine. U tom podrazdoblju oba su se vodostaj snizila za oko 2 m. Razina minimalnih vodostaja prati razinu dna korita pa se taj pad vrlo vjerojatno odnosi i na eroziju dna korita Save na profilu vodomjerne postaje Zagreb. Od 1994. do 2021. uočava se blagi porast minimalnih i srednjih godišnjih vodostaja Save kod Zagreba.

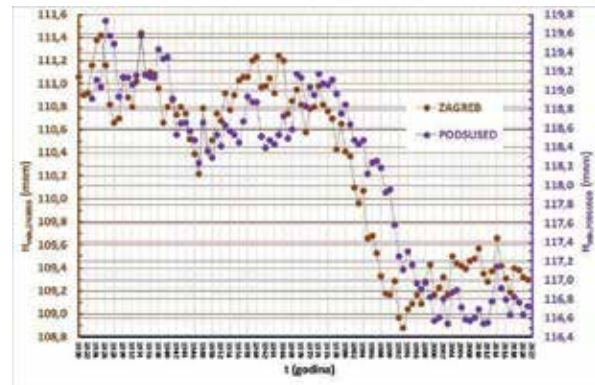
Na slici 5 je prikazan niz maksimalnih godišnjih vodostaja Save na vodomjernoj postaji Zagreb u razdoblju 1920. - 2021. Uočava se postojanje vrlo blagog, statistički neznačajnog trenda porasta što je potvrđeno niskom vrijednosti koeficijenta determinacije,  $R^2=0,002$  i činjenicom da je vjerojatnost M-K testa,  $p > 0,05$ .

Nizovi razlika između srednjih i minimalnih godišnjih vodostaja (smeđa boja), maksimalnih i srednjih vodostaja (zeleno boja) i maksimalnih i minimalnih vodostaja (plava boja) na vodomjernoj postaji Zagreb u razdoblju 1920. - 2021. prikazani su na slici 6. Bitno je uočiti da u sva tri slučaja postoji statistički značajan trend porasta analiziranih razlika. Visoke vrijednosti koeficijenta determinacije,  $R^2$ , kao i rezultati M-K testova u sva tri slučaja potvrđuju statističku značajnost trendova jer su vrijednosti vjerojatnosti,  $p < 0,01$ .

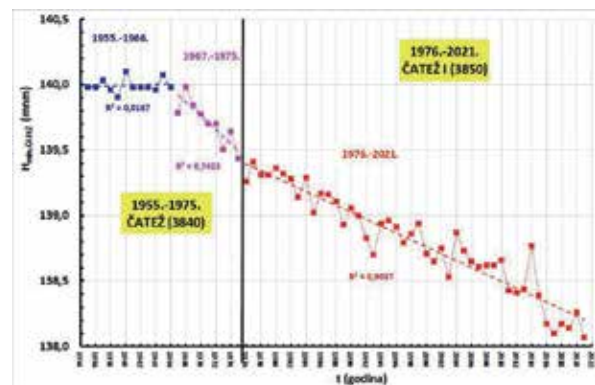
S ciljem da se ustanovi radi li se isključivo o lokalnim promjenama u koritu Save oko vodomjerne postaje Zagreb ili se radi o procesu koji se odvija na dužem potezu rijeke uzvodno nastavno su analizirani nizovi minimalnih godišnjih vodostaja Save izmjereni na uzvodnim postajama Podsused i Čatež (Čatež I). Na slici 7 ucrtani su nizovi minimalnih godišnjih vodostaja Save na vodomjeru Podsused (1923. - 2021.) i Save na vodomjeru Zagreb (1920. - 2021.). Ponašanje vodostaja je vrlo slično što potvrđuje visoka vrijednost koeficijenta determinacije među njima koja iznosi,  $R^2=0,786$ . Uočava se da su procesi opadanja minimalnih vodostaja, dakle i erozije dna korita, na ove dvije lokacije međusobno udaljene 11,09 km započeli otprilike u isto vrijeme 1975. godine. Važno je uočiti da je 2001. godine došlo



Slika 6: Nizovi razlika između srednjih i minimalnih godišnjih vodostaja (smeđa boja), maksimalnih i srednjih vodostaja (zeleno boja) i maksimalnih i minimalnih vodostaja (plava boja) na vodomjernoj postaji Zagreb u razdoblju 1920. - 2021.



Slika 7: Nizovi minimalnih godišnjih vodostaja Save na vodomjeru Podsused (1923. - 2021.) i Save na vodomjeru Zagreb (1920. - 2021.)



Slika 8: Niz minimalnih godišnjih vodostaja Save na vodomjernoj postaji Čatež (1955. - 1975.) i vodomjernoj postaji Čatež I (1976. - 2021.)

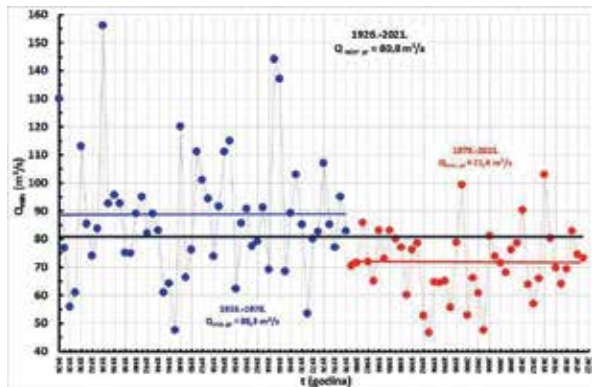
do stabilizacije (naglašava se ne porasta) minimalnih godišnjih vodostaja na vodomjernoj postaji Podsused. Moguće je da se radi o zakašnjelom utjecaju Te-To potopljenog preljeva (praga), ali je tu pretpostavku teško pouzdano potvrditi.

Na slici 8 su prikazani nizovi minimalnih godišnjih vodostaja Save na vodomjernoj postaji Čatež (1955. - 1975.) i vodomjernoj postaji Čatež I (1976. - 2021.). Podaci su tretirani kao da su uzeti na jednoj postaji budući da su one udaljene samo 685 m. Naglo opadanje minimalnih vodostaja na postaji udaljenoj od postaje Zagreb 33,895 km, započelo je osam godina ranije nego u Zagrebu, tj. 1967. godine. Rezultati analiza minimalnih godišnjih vodostaja na postajama Podsused i Čatež (Čatež I) jasno ukazuju da se u slučaju Save kod Zagreba ne radi o lokalnom procesu već da se proces erozije dna korita Save odvija duže vremena na dugom potezu Save kroz Sloveniju. Čini se ujedno da na ublažavanje procesa nije utjecala izgradnja Te-To potopljenog preljeva.

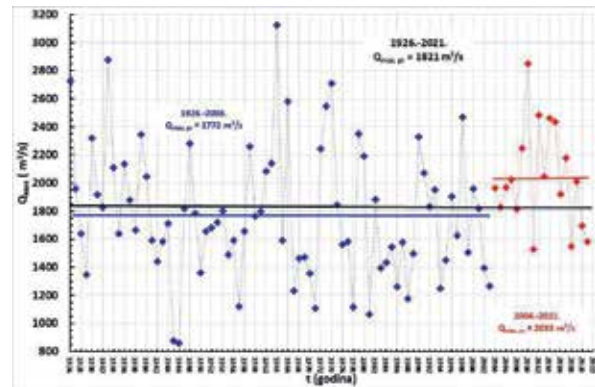
Pažljivim pregledom literature ustanovljeno je da je o eventualnim razlozima ovih procesa objavljen samo jedan rad (Mikoš 2000). Autor tog rada procese erozije korita Save u Sloveniji objašnjava manjom produkcijom nanosa u slivu od Jesenica do Mokrica, ali se ne navode detaljniji razlozi toga smanjenja.

### 3.2. Analiza protoka

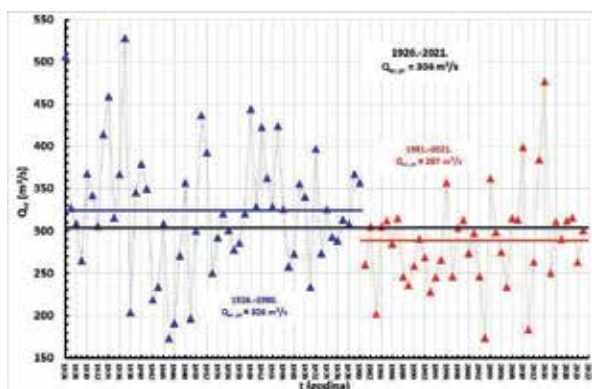
Niz minimalnih godišnjih protoka Save na vodomjernoj



Slika 9: Niz minimalnih godišnjih protoka Save na vodomjernoj postaji Zagreb u razdoblju 1926. - 2021.



Slika 11: Niz maksimalnih godišnjih protoka Save na vodomjernoj postaji Zagreb u razdoblju 1926. - 2021.



Slika 10: Niz srednjih godišnjih protoka Save na vodomjernoj postaji Zagreb u razdoblju 1926. - 2021.

postaji Zagreb u razdoblju 1926. - 2021. prikazan je na slici 9. Primjenom RAPS metode ustanovljeno je da postoje dva podniza sa statistički značajnim razlikama između njihovih prosječnih vrijednosti. U prvom podnizu koji je trajao od 1926. do 1978. iznosila je  $66,3 \text{ m}^3/\text{s}$ . U drugom podnizu koji traje od 1979. do 2021. prosječna je vrijednost pala za  $16,9 \text{ m}^3/\text{s}$  te sada iznosi  $71,4 \text{ m}^3/\text{s}$ . Testiranje F-testom pokazalo je da je došlo do statistički značajnih razlika između varijanci dva podniza ( $p < 0,01$ ). Testiranjem t-testom je pokazalo statistički značajnu razliku između prosječnih vrijednosti dva podniza ( $p < 0,01$ ).

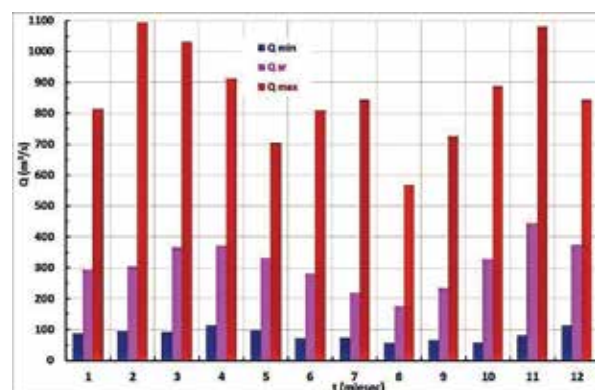
Na slici 10 se nalazi niz srednjih godišnjih protoka Save na vodomjernoj postaji Zagreb u razdoblju 1926.-2021. Primjenom RAPS metode ustanovljeno je postojanje dva podniza sa statistički značajnim razlikama između njihovih prosječnih vrijednosti. U prvom podnizu koji je trajao od 1926. do 1980. iznosila je  $326 \text{ m}^3/\text{s}$ . U drugom podnizu koji traje od 1981. do 2021. prosječna je vrijednost pala za  $39 \text{ m}^3/\text{s}$  te sada iznosi  $287 \text{ m}^3/\text{s}$ . Testiranje F-testom pokazalo je da nije došlo do statistički značajnih razlika između varijanci dva podniza ( $p > 0,05$ ), ali je t-test pokazao statistički značajnu razliku između prosječnih vrijednosti dva podniza ( $p < 0,01$ ).

Čini se da je počevši od kraja sedamdesetih godina prošlog stoljeća došlo do značajnog snižavanja minimalnih i srednjih godišnjih protoka na Savi kod

Zagreba. Vrlo vjerojatno je taj zabrinjavajući proces posljedica kako prirodnih (globalno zagrijavanje) tako i antropogenih utjecaja (rad hidroelektrana, crpljenje podzemnih voda itd.). Izučavanju ovog procesa definitivno i vrlo žurno treba posvetiti dužnu pažnju.

Kod niza maksimalnih godišnjih protoka proces je obrnut. Od 2004. godine došlo je do porasta. Na slici 11 je prikazan niz maksimalnih godišnjih protoka Save na vodomjernoj postaji Zagreb u razdoblju 1926. - 2021. Primjenom RAPS metode ustanovljeno je postojanje dva podniza sa statistički značajnim razlikama između njihovih prosječnih vrijednosti. U prvom podnizu koji je trajao od 1926. do 2003. iznosila je  $1772 \text{ m}^3/\text{s}$ . U drugom podnizu koji traje od 2004. do 2021. prosječna je vrijednost narasla za  $49 \text{ m}^3/\text{s}$  te sada iznosi  $1821 \text{ m}^3/\text{s}$ . Testiranje F-testom pokazalo je da nije došlo do statistički značajnih razlika između varijanci dva podniza ( $p > 0,05$ ), ali je t-test pokazao statistički značajnu razliku između prosječnih vrijednosti dva podniza ( $p < 0,05$ ).

U tablici 3 su navedene vrijednosti koeficijenta determinacije  $R^2$  za parove vrijednosti karakterističnih (minimalnih, srednjih i maksimalnih) godišnjih protoka između tri analizirane vodomjerne postaje. Najveća sličnost se uočava kod srednjih godišnjih protoka gdje je uvijek nešto viša od 0,9. Najmanja je kod nizova minimalnih godišnjih protoka.



Slika 12: Histogrami minimalnih (modra boja), prosječnih (ljubičasta boja) i maksimalnih (crvena boja) srednjih mjesečnih protoka Save na vodomjernoj postaji Zagreb u razdoblju 1926. - 2021.

Tablica 3: Matrica vrijednosti koeficijenta determinacije  $R^2$  između nizova karakterističnih godišnjih protoka na tri analizirane postaje

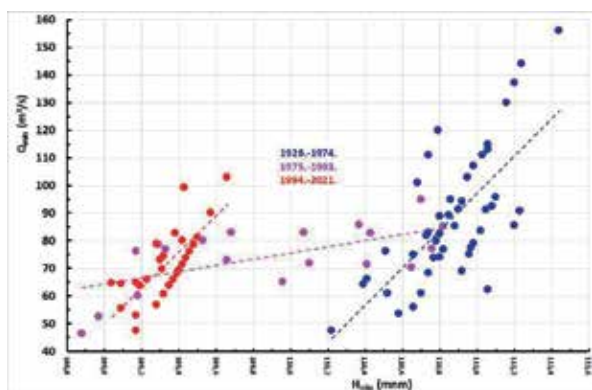
postaja	ČATEŽ	PODSUSED	ZAGREB
<b>Minimalni godišnji Q</b>			
ČATEŽ	1	0,465	0,548
PODSUSED		1	0,387
ZAGREB			1
<b>Srednji godišnji Q</b>			
ČATEŽ	1	0,904	0,916
PODSUSED		1	0,906
ZAGREB			1
<b>Maksimalni godišnji Q</b>			
ČATEŽ	1	0,771	0,647
PODSUSED		1	0,788
ZAGREB			1

Na slici 12 su prikazani histogrami minimalnih (modra boja), prosječnih (ljubičasta boja) i maksimalnih (crvena boja) srednjih mjesečnih protoka Save na vodomjernoj postaji Zagreb u razdoblju 1926. - 2021.

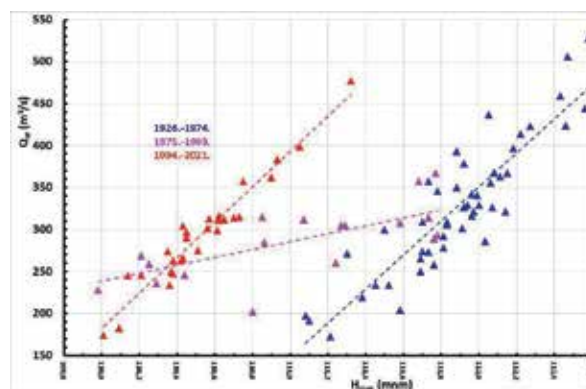
Koristeći u prethodnom tekstu izraze navedene pod brojevima (3), (4), (5) i (6) nad nizom srednjih dnevnih protoka Save kod Zagreba u razdoblju od 1. siječnja 1926. do 31. prosinca 2021. izračunat je Hurstov eksponent za godinu kao vremensku jedinicu. Njegova vrijednost iznosi 0,698. Ova je vrijednost znatno veća od 0,5 i praktično identična Hurstovom eksponentu koji iznosi 0,7 što ukazuje da godišnji nizovi protoka Save kod Zagreba nose u sebi dugotrajnu memoriju.

### 3.3. Analiza odnosa protoka i vodostaja

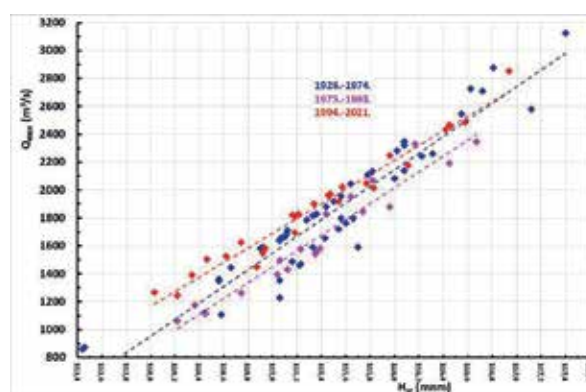
Na slici 13 ucrtani su odnosi između minimalnih godišnjih protoka i minimalnih godišnjih vodostaja Save na vodomjernoj postaji Zagreb prikazani u tri podrazdoblja definirana na slici 4: (1) 1926. - 1974.; (2) 1975. - 1993.; (3) 1994. - 2021. U drugom podrazdoblju (1975.-1993.) u kojem je postojao izražen trend opadanja minimalnih godišnjih protoka odnos je bitno drugačiji nego u prvom (1926. - 1974.) i trećem (1994. - 2021.)



Slika 13: Odnosi između minimalnih godišnjih protoka i minimalnih godišnjih vodostaja Save na vodomjernoj postaji Zagreb u sljedeća tri podrazdoblja: (1) 1926. - 1974.; (2) 1975. - 1993.; (3) 1994. - 2021.



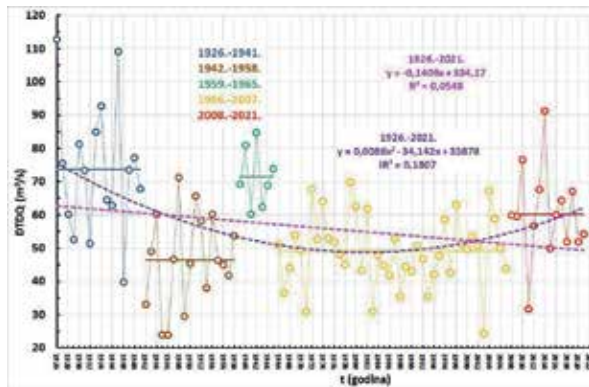
Slika 14: Odnosi između srednjih godišnjih protoka i srednjih godišnjih vodostaja Save na vodomjernoj postaji Zagreb u sljedeća tri podrazdoblja: (1) 1926. - 1974.; (2) 1975. - 1993.; (3) 1994. - 2021.



Slika 15: Odnosi između maksimalnih godišnjih protoka i maksimalnih godišnjih vodostaja Save na vodomjernoj postaji Zagreb u sljedeća tri podrazdoblja: (1) 1926. - 1974.; (2) 1975. - 1993.; (3) 1994. - 2021.

podrazdoblju. Vrlo su slični odnosi između srednjih godišnjih protoka i srednjih godišnjih vodostaja Save na vodomjernoj postaji Zagreb prikazani na slici 14.

U slučaju odnosa između maksimalnih godišnjih protoka i maksimalnih godišnjih vodostaja Save na vodomjernoj postaji Zagreb u ista tri podrazdoblja situacija je bitno drugačija. Iz grafičkog prikaza koji se nalazi na slici 15 može se uočiti da značajnih razlika u tri

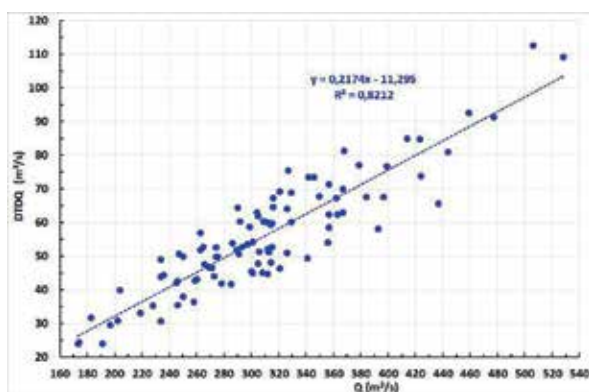


Slika 16: Niz vrijednosti varijacija dan za danom protoka Save izračunat na vodomjernoj postaji Zagreb u razdoblju 1926. - 2021.

vremenska podrazdoblja nije bilo.

#### 4. DAN ZA DANOM VARIJABILNOST PROTOKA (DTDQ)

Metodom DTDQ pokušalo se utvrditi kako se tijekom razdoblja od 1. siječnja 1926. do 31. prosinca 2021. ponašala varijabilnost srednjih dnevnih protoka na vodomjernoj postaji Sava Zagreb. Na varijabilnost srednjih dnevnih protoka nekog vodotoka mogu utjecati brojni čimbenici, ali se definitivno očekuje da bi najsnažniji utjecaj mogli imati pogoni hidroelektrana. Koristeći izraz (1) izračunate su godišnje vrijednosti DTDQ u razdoblju 1926.-2021. Njihov prikaz se nalazi na slici 16. Korištenje RAPS metode definirano je pet podrazdoblja sa statistički značajno različitim prosječnim vrijednostima DTDQ. Općenito se može zaključiti da su u prva četiri podrazdoblja od 1926. do 2007. postoji značajan pad vrijednosti DTDQ. U posljednjem, petom podrazdoblju od 2008. do 2021. opaža se nagli porast vrijednosti DTDQ. Objašnjenje ovog skoka moglo bi se eventualno tražiti u početku rada HE Boštanj tijekom 2006. godine. Poslije te godine do 2017. su u rad puštene još tri hidroelektrane. Volumeni njihovih retencija nisu značajni, ali je pogon hidroelektrana mogao utjecati na



Slika 17: Odnos između vrijednosti varijacija dan za danom protoka Save, DTDQ i srednjih godišnjih protoka Save, Q na vodomjernoj postaji Zagreb u razdoblju 1926. - 2021.

režim varijacija srednjih dnevnih protoka nizvodno.

Na slici 17 prikazan je odnos između vrijednosti varijacija dan za danom protoka Save DTDQ i srednjih godišnjih protoka Save, Q, na vodomjernoj postaji Zagreb u razdoblju 1926. - 2021. Radi se o snažnoj međuzavisnosti pošto koeficijent determinacije iznosi  $R^2 = 0,8212$ .

Bit će zanimljivo pratiti daljnji razvoj godišnjih vrijednosti DTDQ te ga pokušati povezati s radom hidroelektrana.

#### 5. ZAKLJUČCI I PREPORUKE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA

Trend naglog opadanja minimalnih i srednjih godišnjih vodostaja Save kod Zagreba započeo je 1975. godine. Na 11,07 km udaljenoj uzvodnoj postaji Podsused proces je započeo u isto vrijeme. Na vodomjernoj postaji Čatež, udaljenoj 33,81 km od postaje Zagreb, proces snižavanja korita Save započeo je osam godina ranije, 1967. godine.

Prethodno izneseno ukazuje na to da snižavanje dna korita Save na profilu vodomjerne postaje Zagreb ne predstavlja lokalni proces, već se radi o fenomenu koji se odvija na dugom uzvodnom potezu Save koji se proteže i unutar Slovenije. Proces erozije korita započeli su pred 57 godina na profilu Čatež, a na profilu Zagreb pred 47 godina.

Tijekom 1993. puštena je u rad HE Vrhovo, a potom nizvodno od nje u razdoblju od 2006. do 2017. još četiri hidroelektrane. Postoje planovi za izgradnju HE Krško. Zbog svega navedenog vrlo je važno pouzdano procijeniti kako se proces erozije korita Save nizvodno odvijao tijekom vremena kao posljedica njihovog funkcioniranja te kakve se promjene nizvodno mogu očekivati u budućnosti. Za ispunjavanje tog ključnog zadatka, bitnog za razumijevanje, ali i kontroliranje te održivo upravljanje morfoloških, hidroloških i ekoloških procesa duž toka Save od granice sa Slovenijom do par desetaka kilometara (to tek treba pouzdano utvrditi) nizvodno od vodomjernog profila Zagreb bit će potrebno detaljnije studirati ponašanje vodostaja i protoka na vodomjernim postajama duž Save u Sloveniji i Hrvatskoj. Od značajne koristi bi bilo instalirati najsuvremeniju tehnologiju za kontinuirano mjerenje suspendiranog nanosa na najmanje dva mjerna profila. Prvi bi trebao biti na samom ulazu Save u Hrvatsku, a drugi negdje na širem području grada Zagreba.

Izgradnja potopljenog preljeva (praga) Te-To 1983. godine, 6,4 km nizvodno od vodomjernog profila Zagreb, utjecala je na zaustavljanje procesa erozije korita na toj lokaciji (Beraković 2009). Međutim treba uočiti da se proces laganog trenda porasta minimalnih godišnjih vodostaja na profilu Save u Zagrebu pojavio tek jedanaest godina kasnije, 1994. godine. Na lokaciji postaje Podsused pojavio se još sedam godina kasnije, 2001. godine, te je znatno blaži nego na lokaciji postaje Zagreb. Na postaji Čatež čini se da proces erozije korita



nije zaustavljen. Ove činjenice ukazuju na ograničeni domet utjecaja postojećeg praga, kao i drugih pragova koje se predviđa graditi na procese erozije korita uzvodno od njih. Pri tome se ne smije zanemariti činjenica da će oni utjecati na eroziju korita nizvodno.

Što se minimalnih godišnjih protoka tiče pokazalo se da postoji statistički značajan pad u razdoblju 1979. - 2021. u odnosu na prethodno razdoblje 1926. - 1978. Slično ponašanje pokazao je i niz srednjih godišnjih protoka. Kod njega je statistički značajan pad uočen nešto kasnije u razdoblju 1981. - 2021. u odnosu na prethodno razdoblje 1926. - 1980. Na osnovi raspoloživih informacija nije bilo moguće pouzdano utvrditi uzrok ovakvom, upozoravajućem ponašanju. Najlakše bi ga bilo pripisati globalnim klimatskim promjenama, ali bi bilo potrebno ipak ovaj opasan proces detaljnije objasniti.

Nizovi maksimalni godišnjih vodostaji na sve tri analizirane postaje na Savi ne pokazuju trend sniženja. Što više na profilu Save u Zagrebu uočen je porast u razdoblju od 2004. do 2021. Ta činjenica jasno ukazuje na postojanje potencijalne opasnosti od poplava na potezu Save kroz Zagreb unatoč činjenice funkcioniranja preljeva Jankomir. Razlog se možda treba tražiti u smanjivanju plavljenih površina. Ova problematika tretirana je detaljnije u radovima Bonacci i Ljubenkova (2008.) i Bonacci i Oskoruš (2011., 2014.), te nije bila predmet razmatranja u ovom radu. Međutim, neophodno je naglasiti da je nužno detaljnije analizirati utjecaj rada hidroelektrana na formiranje valova velikih

voda Save na području Republike Hrvatske. To nije moguće izvršiti na osnovu samo hidroloških informacija i analiza. Radi se o značajno složenijoj problematici kojoj žurno treba posvetiti dužnu pažnju.

Ovaj rad je bio fokusiran na analizu nizova karakterističnih vodostaja i protoka Save na vodomjernom profilu Zagreb, isključivo s hidrološkog stanovišta. Pokazalo se da se ne radi o lokalnim poremećajima već o promjenama koje se javljaju na dužem potezu rijeke Save. U radu su stoga korišteni i podaci uzvodnih postaja Podsused i Čatež. Da bi se procesi koji se zbivaju duž toka Save bolje shvatili potrebno je u analize uključiti veći broj postaja iz Slovenije. Međutim, ne smiju se zanemariti promjene koje se zasigurno dešavaju na djelu toka Save nizvodno od postaje Zagreb. Očito je da je neophodno pristupiti mnogo detaljnijim analizama ove složene i za grad Zagreb ekstremno važne problematike. Autori se nadaju da bi ovaj rad mogao potaknuti nova i intenzivnija istraživanja ovih vrlo složenih, interaktivnih dinamičkih procesa koji potencijalno mogu biti opasni za održivi razvoj grada Zagreba.

## ZAHVALA

Ovo istraživanje je djelomično sufinancirano kroz projekt KK.01.1.1.02.0027, koji je sufinanciran od strane Hrvatske Vlade i Europske Unije kroz "European Regional Development Fund - the Competitiveness and Cohesion Operational Programme." ■

## LITERATURA

Beraković, M. 2009. Radovi na rijeci Savi i njihov utjecaj na vodni režim šireg područja grada Zagreba. *Hrvatska vodoprivreda*, XVIII(90-191), 16-20.

Biondić, D. 2000. Erozijski proces u savskom koritu kod Zagreba. *Zbornik radova okruglog stola "Hidrologija i vodni resursi Save u novim uvjetima"*. (Ur. D. Trninić). Hrvatsko hidrološko društvo.

Bonacci, O.; Roje-Bonacci, T. 2020. Primjena metode dan za danom (day to day) varijabilnosti temperature zraka na podacima opaženim na opservatoriju Zagreb-Grič (1887.-2018.). *Hrvatske vode*, 28(112), 125-134.

Bonacci, O.; Ljubenkova, I. 2008. Changes in flow conveyance and implication for flood protection, Sava River, Zagreb. *Hydrological Processes*, 22(8), 1189-1196. DOI: 10.1002/hyp.6688.

Bonacci, O.; Oskoruš, D. 2011. Hidrološka analiza sigurnosti Zagreba od poplava vodama rijeke Save u novim uvjetima. *Hrvatske vode*, 19(75), 13-24.

Bonacci, O.; Oskoruš, D. 2014. Analiza nekih hidroloških vidova evakuacije velikih voda na području grada Zagreba. *Hrvatske vode*, 22(87), 409-416.

Garbrecht, J.; Fernandez, G.P. 1994. Visualization of trends and fluctuations in climatic records.

*Water Resources Bulletin*, 30(2), 297-306. DOI:10.1111/j.1752-1688.1994.tb03292.x.

Gilja, G.; Oskoruš, D.; Kuspilić, N. 2010. Erosion of the Sava riverbed in Croatia and its foreseeable consequences. *Proceedings of the 12th Conference on Water Observation and Information System for Decision Support. Ohrid*. (ur. M. Morell) 1-9. BALWOIS.

Gough, W. A. 2008. Theoretical considerations of day-to-day temperature variability applied to Toronto and Calgary, Canada data. *Theoretical and Applied Climatology*, 94(1-2), 97-105. DOI:10.1007/s00704-007-0346-9.

Gough, W. A.; Hu, Y. 2016. Day-to-day temperature variability for four urban areas in China. *Urban Climate*, 17, 80-88. DOI:10.1016/j.uclim.2016.06.002.

Hurst, H. E. 1951. Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 116(1), 770-799. DOI:10.1061/TACEAT.0006518.

Hurst, H. E. 1956. The problem of long-term storage in reservoirs. *Hydrological Sciences Journal*, 1(3), 13-27. DOI:10.1080/02626665609493644.

Hurst, H. E.; Black, R. P.; Simaika, Y. M. 1965. *Long-term storage: an experimental study*. Constable, London.

- Husain Shourov, M. M.; Mahmud, I. (2019): pyMannKendall: a python package for non-parametric Mann Kendall family of trend tests. *Journal of Open-Source Software*, 4 (9), 1556. DOI:10.21105/joss.01556.
- Kalinić, F.; Bartolić, I.; Petrićec, M. 2019. Utjecaj praga kod Te-To Zagreb na vodostaje rijeke Save i podzemne vode zaobalja. *Zbornik radova 7. hrvatske konferencije o vodama*. (Ur. D. Biondić, D. Holjević, M. Vizner), 261-268, Hrvatske vode.
- Kendall, M. G. 1975. *Rank Correlation Methods. 4th edition*. Charles Griffin, London.
- Kratofil, L. 2000. Promjene vodnog režima Save uzrokovane ljudskom djelatnošću. *Zbornik radova okruglog stola "Hidrologija i vodni resursi Save u novim uvjetima"* (Ur. D. Trninić). 335–352, Hrvatsko Hidrološko Društvo.
- Kuspilić, G.; Gilja, G. 2016. Potencijalan učinak morfoloških promjena rijeke Save na zagrebački vodonosnik. *Znanstveno-stručni skup: Strategija razvoja vodoopskrbe i odvodnje Grada Zagreba*. (Ur. V. Andročec). 13-22, Društvo građevinskih inženjera Zagreb.
- Kuspilić, N.; Ocvirk, E.; Gilja, G.; Cikojević, A. (2020.): *Analiza zaštite, uređenja i korištenja rijeke Save i zaobalja od granice s Republikom Slovenijom do Siska*, Građevinski Fakultet, Zagreb.
- Mann, H. B. 1945. Non-parametric test of randomness against trend. *Econometrica*, 13(3), 245-259.
- Mikoš, M. 2000. Prodna bilanca reke Save od Jesenica do Mokric. *Gradbeni Vestnik*, 49(9), 208-219.
- Pavlić, I. 1965. *Statistička teorija i primjena*, Panorama, Zagreb.
- Potočki, K.; Bekić, D.; Bonacci, O.; Kulić, T. 2021. Hydrological aspects of nature-based solutions in flood mitigation in the Danube River Basin in Croatia: Green vs. Grey approach. In: *Nature-based solutions for flood mitigation*. Springer, 263-288. DOI:10.1007/698\_2021\_770.
- Slukan Altić, M. 2010. Povijest regulacije rijeke Save kod Zagreba i njezine posljedice na izgradnju grada. *Hrvatske Vode*, 18(73), 205-212.
- Tootle, G.; Oubeidillah, A.; Elliott, E.; Formetta, G.; Bezak, N. 2023. Streamflow reconstructions using tree-ring-based paleo proxies for the Sava River Basin (Slovenia). *Hydrology*, 10, 138. DOI:10.3390/hydrology10070138.
- Vujević, M.; Posavec, K. 2018. Identification of groundwater level decline in the Zagreb and Samobor-Zaprešić aquifers since the sixties of the twentieth century. *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin*, 33(4), 55-64. DOI: 10.17794/rgn.2018.4.5.

## HYDROLOGICAL ANALYSIS OF THE SAVA RIVER WATER LEVEL AND FLOW SERIES AT THE ZAGREB HYDROLOGICAL STATION

**ABSTRACT:** The paper analyses the series of water levels (1920–2021) and discharges (1926–2021) observed at the Zagreb hydrological station on the Sava River. Significant variations between the series of minimum and average annual levels were determined. In the 1920–1974 sub-period, no trends were observed. In the 1975–1993 sub-period, a more significant downward trend (about 2 m) was observed. Minimal annual water levels are an indicator of the lowering (erosion) of the riverbed bottom. In 1983, a submerged weir, named Te-To sill, was constructed. It is located about 6400 m downstream of the Zagreb hydrological station. The lowering of the Sava riverbed bottom on the Zagreb profile stopped in 1994. In the 1994–2021 period, the minimum and average annual water levels rose by about 70 cm. A series of maximum annual water levels in the 1920–2021 period showed a statistically insignificant increase. At the Sava Podsused hydrological station, about 11 km away, the process of varying minimum and average annual water levels occurs similarly, but with a slight time shift, as it does at the Sava Zagreb hydrological station. The minimum and average water levels there began to decline simultaneously, while the increase began seven years later (in 2001). At the Sava Čatež hydrological station, which is located in Slovenia, the minimum annual water levels decreased in 1967, eight years earlier than at the Sava Zagreb location.

For the series of minimum annual flows of the Sava near Zagreb, a statistically significant drop in average annual flows was observed in the 1979–2021 sub-period ( $Q=71.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ) compared to the previous 1926–1978 sub-period ( $Q=88.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ). A statistically significant drop in average annual flows was observed in the 1981–2021 sub-period ( $Q=287 \text{ m}^3/\text{s}$ ) for a series of average annual flows of the Sava near Zagreb compared to the previous 1926–1980 sub-period ( $Q=326 \text{ m}^3/\text{s}$ ). For a series of maximum flows in the recent 2004–2021 sub-period ( $Q=2033 \text{ m}^3/\text{s}$ ), a statistically significant increase was observed compared to the previous 1926–2003 sub-period ( $Q=1772 \text{ m}^3/\text{s}$ ). For a series of average annual flows in the 1926–2021 period, the value of the Hurst exponent was 0.691. A series of average daily flows of the Sava near Zagreb was analysed using the day-to-day flow variability (DTDQ) method.

**KEYWORDS:** water level, flow, Sava Zagreb, day-to-day flow variability, Hurst exponent

## HYDROLOGISCHE ANALYSE VON WASSERSTÄNDEN UND STRÖMUNGEN DES FLUSSES SAVA AN DER WASSERMESSTATION ZAGREB

**ABSTRAKT:** In der Arbeit wurden Wasserstände (1920–2021) und Strömungen (1926–2021) analysiert, die auf dem Hydrometerprofil in Zagreb am Fluss Sava beobachtet wurden. Es wurden erhebliche Unterschiede in den minimalen und durchschnittlichen einzelnen jährlichen Wasserständen festgestellt. Im Zeitraum 1920–1974 konnte kein solcher Trend beobachtet werden. Im Zeitraum 1975–1993 wurde ein deutlicher Absenkungstrend beobachtet, der etwa 2 m betrug. Die minimalen jährlichen Wasserstände sind ein Indikator für die Absenkung (Erosion) des Flussbettes. Im Jahr 1983 wurde ein überfluteter Überlauf mit der Bezeichnung "Te-To-Schwelle" gebaut. Die Schwelle befindet sich etwa 6400 m flussabwärts der Wassermessstation Zagreb. Die Absenkung des Sava-Flussbettes auf dem Zagreber Profil wurde 1994 gestoppt. Im Zeitraum 1994–2021 stiegen die minimalen und durchschnittlichen jährlichen Wasserstände um etwa 70 cm. Die maximalen jährlichen Wasserstände im Zeitraum 1920–2021 zeigten einen statistisch unbedeutenden Anstieg. An der etwa 11 km entfernten Wassermessstation Sava Podsused verhält sich der Prozess der Variation der minimalen und durchschnittlichen Jahreswasserstände ähnlich, jedoch mit einer leichten Zeitverschiebung, wie an der Wassermessstation Sava Zagreb. Dort begann gleichzeitig der Rückgang des Mindest- und Durchschnittswasserstandes, wobei der Anstieg sieben Jahre später begann - im Jahr 2001. An der Wassermessstation Sava Čatež in Slowenien, sanken die minimalen Jahreswasserstände im Jahr 1967 ab, acht Jahre früher als am Standort Sava Zagreb. Für eine Reihe minimaler jährlicher Durchflüsse der Sava bei Zagreb wurde im Zeitraum 1979–2021 ein statistisch signifikanter Rückgang der durchschnittlichen jährlichen Durchflüsse beobachtet ( $Q=71,4 \text{ m}^3/\text{s}$ ), im Vergleich zum vorherigen Zeitraum 1926–1978 ( $Q=88,3 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Bei den durchschnittlichen jährlichen Abflüssen der Sava bei Zagreb wurde im Zeitraum 1981–2021 ein statistisch signifikanter Rückgang der durchschnittlichen jährlichen Durchflüsse beobachtet ( $Q=287 \text{ m}^3/\text{s}$ ) im Vergleich zum vorherigen Zeitraum 1926–1980 ( $Q=326 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Bei einer Reihe maximaler Durchflüsse im jüngsten Zeitraum 2004–2021 ( $Q=2033 \text{ m}^3/\text{s}$ ) wurde ein statistisch signifikanter Anstieg im Vergleich zum vorherigen Zeitraum 1926–2003 beobachtet ( $Q=1772 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Bei den durchschnittlichen jährlichen Durchflüssen im Zeitraum 1926–2021 betrug der Wert des Hurst-Exponenten 0,691. Die mittleren täglichen Durchflüsse des Flusses Sava bei Zagreb wurde mit der Methode der täglichen Abflussvariabilität (DTDQ) analysiert.

**SCHLÜSSELWÖRTER:** Wasserstand, Durchfluss, Sava bei Zagreb, tägliche Durchflussvariabilität, Hurst-Exponent

