

Prethodno priopćenje | Preliminary Report | UDK 556.3(497.5Rječina)
 Primljeno (Received): 30.11.2016.; Prihvaćeno (Accepted): 28.4.2017.

PRILOG HIDROLOGIJI KRŠKOG IZVORA RJEČINE

prof. emeritus Ognjen Bonacci,
dipl. ing. građ.

Sveučilište u Splitu, Fakultet
građevinarstva, arhitekture i geodezije
Matice hrvatske 15, Split
obonacci@gradst.hr

dr. sc. Maja Oštrić, dipl. ing. geol.

Hrvatske vode, VGO Rijeka
Đure Šporera 3, Rijeka

prof. emerita Tanja Roje-Bonacci,
dipl. ing. građ.

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

U članku je izvršena hidrološka analiza preljevnih protoka mjenjenih na izvoru Rječine. Raspolagalo se s podacima srednjih dnevnih preljevnih protoka izmjenjenih u razdoblju od 1. siječnja 1948. do 31. prosinca 2015., uz napomenu da se tijekom razdoblja od 1. siječanj 1960. do 31. prosinca 1965. i tijekom cijele 2001. godine mjerenja na izvoru nisu vršila. Dakle, u razdoblju od 68 godina raspolagalo se s kompletnim podacima preljevnih protoka za 61 godinu. Prosječni višegodišnji protok u raspoloživom razdoblju iznosio je $6,85 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Najniža vrijednost srednjih godišnjih preljevnih protoka zabilježena je 2011. godine u iznosu od $3,53 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, dok je najviša opažena 1951., a iznosila je $11,21 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Utvrđeno je da se niz srednjih godišnjih preljevnih protoka može rastaviti u sljedeća dva vremenska podniza: (1) 1948.-1979.; (2) 1980.-2015. U prvom podnizu prosječni godišnji preljevni protok iznosio je $7,86 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, dok je u drugom niži za $1,76 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, te je iznosio $6,10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Analizirani su brojevi dana godišnje, N , kada izvor presuši. Na osnovi raspoloživih podataka u razdoblju od 1. siječnja 1997. do 31. prosinca 2015. izvršena je analiza zahvaćenih količina vode iz izvora Rječine. Ukazano je na snažnu prirodnu varijabilnost hidrološkog režima izvora. Iznesene su preporuke za vršenje detaljnijih interdisciplinarnih istraživanja voda izvora s ciljem osiguranja njihovog održivog korištenja i omogućavanja daljnjeg razvoja.

Ključne riječi: hidrologija krša, zahvaćanje vode, krški izvor Rječine, presušivanje izvora

1. UVOD

U Dinarskom kršu Hrvatske krški izvor Rječine po svojem značaju, ali i specifičnim svojstvima vezanim s hidrologijom i hidrogeologijom krša, pripada uz bok izvora Jadra i Omble. Njihova je uloga od egzistencijalnog značaja za održivi razvoj i budućnost tri hrvatska priobalna grada (Rijeke, Splita i Dubrovnika), ali i širih regija koje gravitiraju ovim gradovima.

Kao i uostalom u slučaju svih krških izvora u dubokom Dinarskom kršu, bez obzira na do sada izvršena brojna

istraživanja, ostalo je još uvijek mnogo otvorenih i neodgovorenih pitanja vezanih za njihovo hidrološko-hidrogeološko funkcioniranje. Osim složenih i nedovoljno izučenih prirodnih čimbenika treba voditi računa i o antropogenim pritiscima na vodne resurse, kako na samom izvoru, tako i u širem slivu. Činjenica je da su oni vrlo intenzivni i nedovoljno istraženi, a realno je očekivati da će u bliskoj budućnosti oni sve snažnije utjecati ne samo na njihove hidrološko-hidrogeološke karakteristike, već i na ekološke

pa i društvene procese u široj regiji. Stoga je neophodno nastaviti i intenzivirati interdisciplinarna istraživanja prateći detaljno promjene koje se u slivovima ova tri, ali i brojnih drugih krških izvora Hrvatske zbivaju. Poznata je činjenica da je kod izvora u kršu interakcija između podzemnih i površinskih voda, dakle između hidrogeoloških i hidroloških aspekata problematike, vrlo brza i izravna. To navodi na neophodnost izučavanja krških izvora u tijesnoj suradnji između ove dvije grane znanosti.

U ovom će radu biti izneseni rezultati isključivo hidroloških analiza izvora Rječine. Preduvjet za donošenje ispravnih strateških odluka, vezanih uz složenu problematiku održivog razvoja i korištenja vodnih resursa u analiziranoj regiji, je detaljno poznavanje današnjeg stanja i razvoja hidroloških procesa u prošlosti na osnovi postojećih hidroloških podloga. Za to su u ovom radu na raspolaganju stajali podatci mjerenja srednjih dnevnih, mjesečnih i godišnjih prelijevnih protoka izvora Rječine u razdoblju od 1. siječnja. 1948. do 31. prosinca. 2015., uz napomenu da nedostaju podatci za razdoblje 1960.–1965. te za 2001. godinu. Mjerenja nisu vršena tijekom 2001. godine zbog toga jer je odron stijene srušio limnigraf. Korišteni su podatci iz Banke hidroloških podataka Državnog hidrometeorološkog zavoda iz Zagreba. Aktualna kota nule vodomjerne postaje Izvor Rječine iznosi 325,214 metara nad morem (m n.m.).

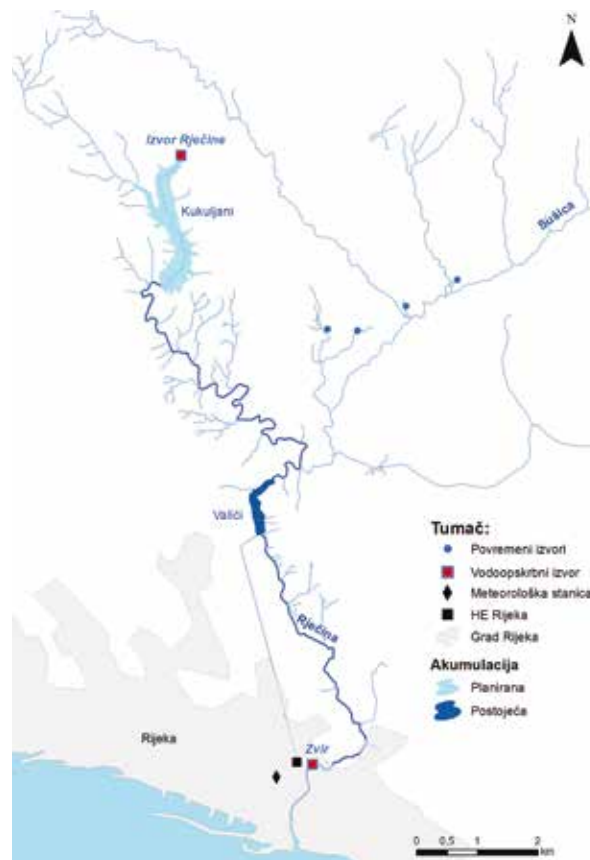
Voda krškog izvora Rječine danas izbija na površinu iz krške špilje prelijevanjem preko umjetne betonske pregrade visoke oko 5 m (fotografija na slici 1) čija se kruna prelijeva nalazi na koti 325,24 m n.m. (Božičević, 1974.; Kuhta, 1998.–1999.). Prema tome, u prirodnom je stanju voda izbijala na površinu na koti od oko 320 m n.m.. Iz ovog se izvora formira vodotok Rječina dužine 18,63 km (Ožanić i Rubinić, 1996.). Najveći prtok Rječine je povremeni vodotok Sušica duljine 8,7 km koji prikuplja vode sa sjeverozapadnog ruba Grobničkog polja. Na slici 2 prikazana je karta šireg sliva vodotoka Rječine i značajnijih pritoka s ucrtanim položajem vodoopskrbnih izvora Rječine i Zvira, nekoliko značajnijih povremenih krških izvora, postojeće akumulacije Valiči i hidroelektrane Rijeka, projektirane akumulacije Kukuljani, meteorološke postaje Rijeka i grada Rijeke.



Slika1: Fotografija izvora Rječine

Sustavno i kontinuirano mjerenje temperature vode izvora Rječine vrši se od 2003. godine u sklopu monitoringa kakvoće koji provode Hrvatske vode. Prema dostupnim podatcima utvrđeno je da je minimalno izmjerena temperatura na izvoru Rječine iznosila 6,6 °C, maksimalno 10 °C s prosječnom vrijednosti od 7,8 °C. Navedene vrijednosti jasno ukazuju da se radi o vodi koja se relativno dugo vremena nalazi u dubokom krškom vodonosniku na koji temperatura zraka koja u toj regiji sliva izvora varira u vrlo širokim granicama nema značajnijeg utjecaja.

Granice i površina sliva izvora Rječine, kao i cijelog vodotoka koji se iz njega formira, do danas nisu u potpunosti i pouzdano definirane. U literaturi se mogu pronaći podatci o veličini topografskog sliva koji su relativno ujednačeni. Uglavnom se navodi podatak o veličini sliva od 53,8 km² (Rubinić i Ožanić, 1999.; Knežević, 1999.) i odnosi se na sliv Rječine i Sušice te njihovih pritoka. Međutim, podatci koji se u literaturi navode za veličinu hidrogeološkog sliva prilično se razlikuju i kreću od 163,9 km² (Knežević, 1999.) do 217,7 km² (Ožanić i Rubinić, 1999.) pa do 465 km² (Biondić et al., 2004.) Hidrogeološka granica sliva definirana je u sklopu brojnih istraživanja koja su se provodila za potrebe određivanja zona sanitarne zaštite. U tu svrhu provedena su i brojna regionalna trasiranja tokova



Slika2: Karta šireg sliva vodotoka Rječine i značajnijih pritoka s ucrtanim položajem vodoopskrbnih izvora Rječine i Zvira, nekoliko značajnijih povremenih krških izvora, postojeće akumulacije Valiči i hidroelektrane Rijeka, projektirane akumulacije Kukuljani, meteorološke postaje Rijeka i grada Rijeke

podzemne vode. Prilikom trasiranja jame na području Črne Drage smještene na nadmorskoj visini od 1400 m n.m. na Snežniku u Sloveniji, utvrđena je veza podzemnih voda s izvorom Rječine i izvorom Zvir u Rijeci (Biondić et al., 2004.). Ovo trasiranje, kao i neka izvršena prije, potvrdila su da se nezanemarljiv dio (otprilike 20 %) (Biondić et al., 2004.) sliva izvora Rječine nalazi na području Slovenije (Božičević, 1973.; Biondić et al., 1979.; Biondić et al., 1997., Biondić et al., 2004.). Posljednje izvedeno trasiranje za potrebe novelacije zona sanitarne zaštite riječkih izvora potvrdilo je podzemne veze SZ ruba Grobničkog polja sa izvorom Zvir i ostalim izvorištima u gradu Rijeci te podzemne veze istočnog dijela Grobničkog polja sa izvorima u Bakru (Munda et al., 2009.). Prema tim istim istraživanjima, granica sliva izvora u gradu Rijeci iznosi 381 km² (Munda et al., 2009.), od čega se 27 % nalazi na teritoriju Slovenije.

U dubokom Dinarskom kršu izrazito je teško definirati položaje vododijelnica, pa prema tome i odrediti površinu sliva. Interakcija između podzemnih i površinskih voda utječe na to da se topografska površina sliva značajno razlikuje od one hidrogeološke ili hidrološke. Stvarno područje prihranjivanja krškog izvora mijenja se tijekom vremena kao posljedica naglih i čestih promjena razina podzemnih voda. Intenziteti porasta razina podzemnih voda u Dinarskom kršu nerijetko prelaze vrijednost od 10 m na sat, dok razina podzemne vode varira i više stotina metara (Bonacci, 1995.; Bonacci i Roje-Bonacci, 2012.).

Kuhta et al. (2014.) navode da u slivu vodotoka Rječine na sjeverozapadnom rubu Grobničkog polja postoje povremeni izvori smješteni na nadmorskim visinama od 295 m n.m. do 320 m n.m.. Istjecanje vode iz njih javlja se samo nakon obilnih kiša i tijekom pojave velikih voda na vodotoku Rječini, a daleko je kraćeg trajanja od istjecanja vode iz izvora Rječine. Njihovo aktiviranje rezultat je podizanja razine podzemne vode krškog vodonosnika. Tijekom sušnih razdoblja razina podzemne vode značajno je niža od razine Grobničkog polja.

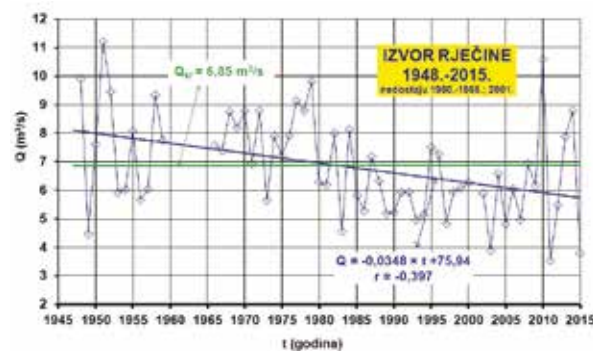
Za potrebe interpretacije ovdje izvršenih hidroloških analiza izvora Rječine neophodno je naglasiti da se iz njega voda zahvaća za vodoopskrbu grada Rijeke. Od 1915. izvor Rječine uključen je gravitacijskim cjevovodom od 110 l/s u vodoopskrbni sustav, u početku za vodoopskrbu Sušaka (danas sastavni dio Rijeke). Veliki problemi javljaju se već 1921. godine jer je izvor Rječine presušio na 5 mjeseci, iako se do tada pretpostavljalo da je minimalna izdašnost izvora 4,5 l/s (Državni arhiv u Rijeci, 1999.; Linić, 2005.). Zbog toga su inicirana istraživanja novih raspoloživih količina podzemnih voda u Martinšćici, koja su rezultirala izgradnjom vodocrpilišta i njegovim uključenjem u vodoopskrbni sustav Sušaka 1923. (Stražičić, 1999.; Rubinić i Sarić, 2005.). Danas je izvor Rječine spojen u vodoopskrbni sustav gravitacijskim cjevovodom kapaciteta 2.000 l/s.

U ovom će radu biti izneseni dostupni službeni podaci o zahvaćanju vode iz izvora Rječine u razdoblju 1. siječnja

1997. do 31. prosinca 2015. Izdanom vodopravnom dozvolom korisniku KD Vodovod i kanalizacija Rijeka, omogućen je zahvat voda u količini od najviše 1.800 l/s, odnosno 20,5 × 10⁶ m³ vode godišnje.

2. ANALIZA GODIŠNJIH PRELJEVNIH PROTOKA

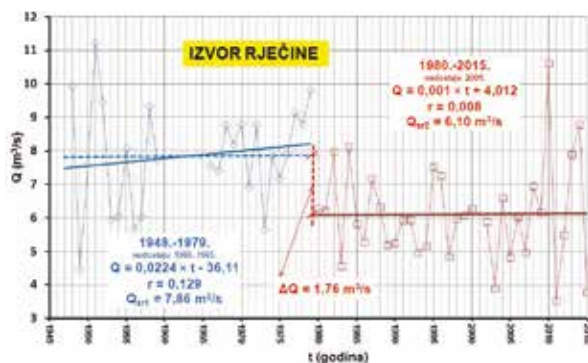
Na slici 3 ucrtane su vrijednosti srednjih godišnjih preljevnih protoka izvora Rječine u razdoblju od 68 godina, od 1948.-2015. Uočava se da nedostaju podatci za sedam godina i to za podrazdoblje 1960.-1965. te za 2011. godinu. Prema tome raspolagalo se efektivno s 61 potpunom godinom mjerenja preljevnih protoka izvora. Na slici 3 je ucrtan i pravac linearne regresije te je upisana vrijednost koeficijenta linearne korelacije koji je relativno nizak te iznosi $r = -0,397$. Negativna vrijednost koeficijenta linearne korelacije ukazuje na nezanemarljiv trend opadanja srednjih godišnjih preljevnih protoka izvora Rječine. Prosječna vrijednost srednjeg godišnjeg preljevnog protoka izvora za analizirano razdoblje iznosi 6,85 m³ s⁻¹. Najniža vrijednost srednjeg godišnjeg preljevnog protoka zabilježena je 2011. godine u iznosu od 3,53 m³ s⁻¹, dok je najviša opažena 1951. te je iznosila 11,21 m³ s⁻¹. Trend opadanja zasigurno je većim dijelom, iako ne i u cijelosti, uzrokovan zahvaćanjem vode iz izvora. Međutim, dijelom se može objasniti i učinkom klimatskih promjena kao i antropogenim promjenama u slivu krškog vodonosnika koji prihranjuje ovaj ekstremno složeni krški sustav. Ovu vrlo značajnu problematiku moglo bi se i svakako trebalo razriješiti što žurnije. Problem predstavlja činjenica da se ne raspolaze s preciznim podacima o zahvaćanju vode iz izvora prije 1997. godine.



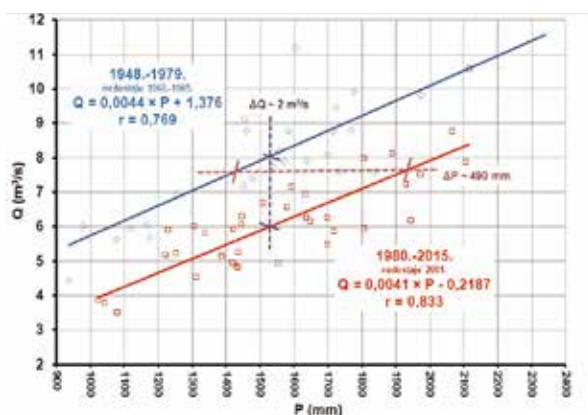
Slika3: Grafički prikaz niza srednjih godišnjih preljevnih protoka izvora Rječine u razdoblju od 68 godina od 1948.-2015. (nedostaju podatci za 1960.-1965. i 2011.)

Primjenom RAPS (Rescaled Adjusted Partial Sums) metode (Garbrecht i Fernandez, 1994.) ustanovljeno je da se niz srednjih godišnjih preljevnih protoka izvora Rječine može rastaviti u sljedeća dva vremenska podniza: (1) 1948.-1979.; (2) 1980.-2015. U prvom podnizu prosječni godišnji preljevni protok iznosi 7,86 m³ s⁻¹, dok je u drugom niži za 1,76 m³ s⁻¹ (vrijednost je manja za 22 %)

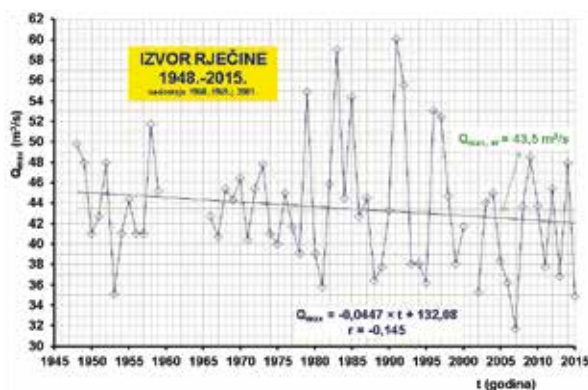
te iznosi $6,10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Na slici 4 ucrtana su dva prethodno spomenuta podniza, a za svaki od njih je određen i ucrtan pravac regresije te je upisana vrijednost koeficijenta linearne korelacije. Bitno je uočiti da u spomenutim podnizovima ne postoje nikakvi statistički značajni trendovi. Prema tome, trend opadanja koji je uočen na slici 3 u stvari ne postoji, već se radi o dva podniza podataka.



Slika 4: Grafički prikaz dva podniza srednjih godišnjih preljevnih protoka izvora Rječine u sljedeća dva razdoblja: (1) 1948.-1979. (nedostaju podatci za 1960.-1965.); (2) 1980.-2015. (nedostaju podatci za 2001.)



Slika 5: Odnosi između srednjih godišnjih preljevnih protoka izvora Rječine, Q, i godišnjih oborina, P, izraženih u mm te opaženih na meteorološkoj postaji Rijeka u dva vremenska podniza



Slika 6: Grafički prikaz niza vrijednosti maksimalnih godišnjih preljevnih protoka izvora Rječine u razdoblju od 68 godina od 1948.-2015. (nedostaju podatci za 1960.-1965. i 2001.)

Prethodno iznesene razlike ponašanja srednjih godišnjih preljevnih protoka u dva analizirana podniza potvrđene su i analizama prikazanim na slici 5. Na njoj su ucrtani odnosi između srednjih godišnjih preljevnih

protoka izvora Rječine, Q, i godišnjih oborina, P, izraženih u mm te opaženih na meteorološkoj postaji Rijeka u dva prethodno definirana vremenska podniza. Pravci regresije za oba podniza praktično su paralelni s tim da su vrijednosti preljevnih protoka u prvom vremenskom podnizu (1948.-1979.) ucrtanom plavom bojom više za oko $\Delta Q \sim 2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, a vrijednosti oborina niže za oko $\Delta P \sim 490 \text{ mm}$ od onih u drugom podnizu (1980.-2015.) ucrtanom crvenom bojom. To znači da su iste oborine u prvom podrazdoblju (1948.-1979.) rezultirale preljevnim protocima izvora većim za oko $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ od onog u drugom podrazdoblju (1980.-2015.), ili da su oborine niže za oko 490 mm u prvom podrazdoblju uzrokovale iste preljevne protoke kao u drugom podrazdoblju. Važno je uočiti da su koeficijenti linearne korelacije u oba slučaja statistički značajni i vrlo visoki, što zaključcima vezanim s ovom analizom daje snažnu vjerodostojnost. Treba naglasiti da je vrijednost razlike preljevnih protoka u dva podniza od $\Delta Q \sim 2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ bliska razlici prosječnih godišnjih preljevnih protoka u istim podnizovima ucrtanim na slici 3, a koja iznosi $1,76 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Ovdje je važno istaći činjenicu da je „stari cjevovod“ kapaciteta 110 l s^{-1} , tijekom 70-ih godina pojačan izgradnjom novog gravitacijskog cjevovoda koji je 1979. godine pušten u trajnu upotrebu, čime je stari cjevovod profila $\varnothing 300 \text{ mm}$, zamijenjen cjevovodom profila $\varnothing 1200 \text{ mm}$ (od Kukuljanova do Streljane, s tim da je od izvora Rječine do Kukuljanova bio profila $\varnothing 800 \text{ mm}$, ali je i on je zamijenjen profilom $\varnothing 1200$ prije desetak godina). Na slici 6 ucrtane su vrijednosti maksimalnih godišnjih preljevnih protoka izvora Rječine u razdoblju od 68 godina od 1948.-2015. (nedostaju 1960.-1965. i 2001.). Na slici je ucrtan i pravac linearne regresije te je upisana vrijednost koeficijenta linearne korelacije koji je u ovom slučaju relativno nizak te iznosi $r = -0,145$. Negativna vrijednost koeficijenta linearne korelacije ukazuje na trend opadanja maksimalnih godišnjih preljevnih protoka izvora Rječine. Prosječna vrijednost maksimalnog godišnjeg preljevnog protoka izvora iznosi $43,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Kreće se u rasponu od najniže vrijednosti u iznosu od $31,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, zabilježene 2007. godine, i najviše opažene 1991. koja je iznosila $60,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Treba naglasiti da su maksimalne vrijednosti preljevnih protoka relativno niske kad se u obzir uzmu ekstremno intenzivne oborine koje padaju na slivu izvora. Tu činjenicu lako je objasniti ograničenim maksimalnim izlaznim kapacitetom brojnih krških izvora u Dinarskom kršu, ali i u drugim krškim regijama svijeta (Bonacci, 2001.). Treba napomenuti da u slučaju niza maksimalnih godišnjih preljevnih protoka nije bilo moguće primjenom RAPS metode definirati postojanje statistički značajno različitih podnizova. U podrazdoblju 1948.-1979. prosječni maksimalni godišnji preljevni protok iznosio je $44,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, dok je u podrazdoblju 1980.-2015. bio neznatno niži te je iznosio $43,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Radi povoljnog visinskog položaja (kota istjecanja 325 m n. m.) izvor Rječine omogućava vodoopskrbu najvećeg

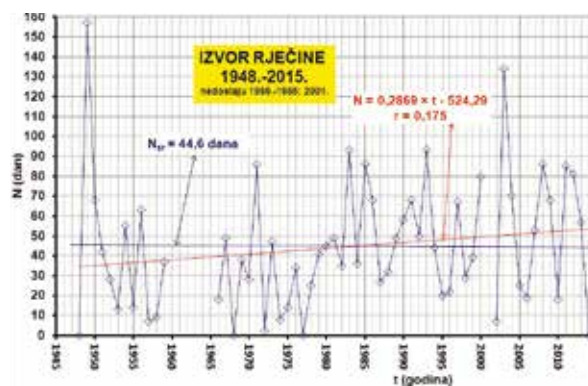
dijela korisnika gravitacijskim sustavom. Međutim, osnovni nedostatak njegovog korištenja u vodoopskrbi leži u činjenici što ovaj izvor gotovo redovito svake godine presuši. Fenomen presušivanja izvora Rječine neophodno je detaljnije istražiti, što će biti načinjeno u nastavku ovog rada. Na slici 7 ucrtane su vrijednosti broja dana, N , presušivanja izvora Rječine tijekom svake pojedine godine u razdoblju od 68 godina od 1948.-2015. (nedostaju 1960.-1965. i 2001.). Prosječni broj dana presušivanja godišnje u razmatranom razdoblju iznosi 44,6 dana. Tijekom četiri godine (1948.; 1968.; 1977. i 2014.) izvor nije presušio, dok je 1949. godina razdoblje neaktivnosti izvora bilo najdulje te je trajalo 157 dana, što iznosi 43 % godine. Sa slike 7 se uočava da postoji statistički neznačajan trend porasta broja dana, N , presušivanja izvora Rječine. Na slici 8 ucrtan je odnos broja dana godišnje s protokom višom od $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, N_5 , (na osi ordinate) i srednjih godišnjih protoka izvora Rječine, Q , (na osi apscise) u cjelokupnom analiziranom razdoblju. Vrijednost koeficijenta linearne korelacije vrlo je visoka te iznosi $r=0,940$, što jasno ukazuje na činjenicu da glavninu godišnjih protoka izvora čine one protoke koje su više od $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Taj se broj dana kreće od najmanje vrijednosti koja iznosi 69 dana (1949. godine) do najveće vrijednosti koja iznosi 221 dana (1951. godine).

3. ANALIZA MJESEČNIH PRELJEVNIH PROTOKA

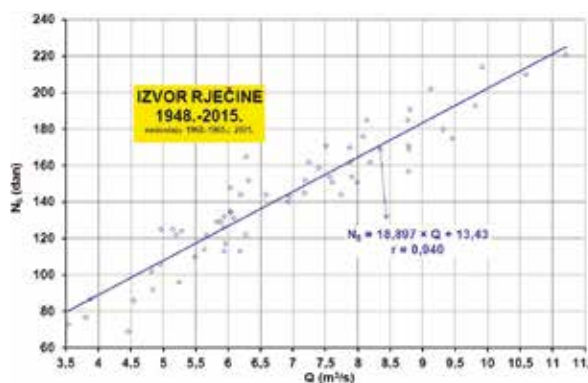
U prethodnom poglavlju analizirano je hidrološko ponašanje protoka izvora Rječine koristeći godinu kao vremensku jedinicu. U ovom poglavlju analiza će biti vršena s mjesecom kao vremenskim inkrementom, što će omogućiti istraživanje i razumijevanje ponašanja hidroloških procesa tijekom godine.

Na slici 9 prikazane su karakteristične vrijednosti srednjih mjesečnih preljevni protoka (minimalnih, prosječnih i maksimalnih) u razdoblju od 68 godina od siječnja 1948. do prosinca 2015. (nedostaju 1960.-1965. i 2001.). Važno je uočiti da su travanj i studeni mjeseci u kojima su prosječni višegodišnji preljevni protoci izvora Rječine najizdašniji, dok su srpanj i kolovoz najsušniji. Maksimalni srednji mjesečni preljevni protoci izvora pojavili su se u veljači i studenom. U razmatranom razdoblju od 61 efektivno raspoložive godine potpuno presušivanje pojavilo se u mjesecima od lipnja do listopada. Minimalni srednji mjesečni preljevni protok veći od $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pojavio se samo u travnju te je iznosio $1,76 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. U svim preostalim mjesecima srednji minimalni preljevni protoci bili su niži od $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

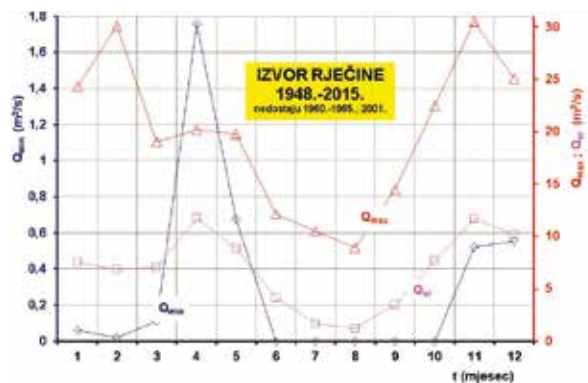
Na slici 10 prikazana su dva vremenska niza prosječnih višegodišnjih mjesečnih preljevni protoka za dva prethodno definirana podrazdoblja: (1) siječanj 1948. – prosinac 1979. (nedostaju podatci za 1960.-1965.); (2) siječanj 1980. – prosinac 2015. (nedostaju podatci za 2001.). Prosječni mjesečni preljevni protoci u



Slika 7: Grafički prikaz niza broja dana, N , presušivanja izvora Rječine tijekom svake pojedine godine u razdoblju od 68 godina od 1948.-2015. (nedostaju podatci za 1960.-1965. i 2001.)



Slika 8: Grafički prikaz odnosa broja dana godišnje s preljevnim protokom višom od $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, N_5 , (na osi ordinate) i srednjih godišnjih protoka izvora Rječine, Q , (na osi apscise) u razdoblju od 68 godina od siječnja 1948. do prosinca 2015. (nedostaju podatci za 1960.-1965. i 2001.)



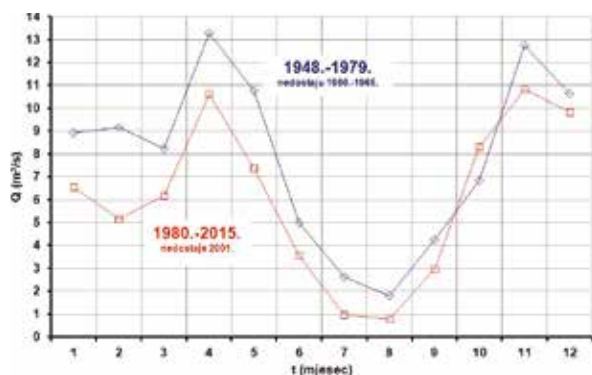
Slika 9: Grafički prikaz karakterističnih srednjih mjesečnih preljevni protoka (minimalnih, prosječnih i maksimalnih) u razdoblju od 68 godina od siječnja 1948. do prosinca 2015. (nedostaju podatci za 1960.-1965. i 2001.)

jedanaest mjeseci viši su u prvom podrazdoblju nego u drugom. Jedino su niži u mjesecu listopadu.

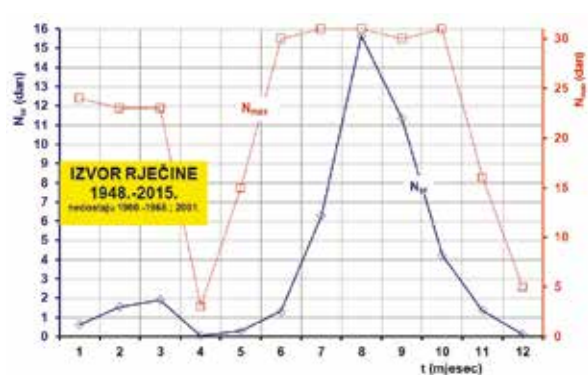
Na slici 11 je dat grafički prikaz maksimalnog, N_{max} , i prosječnog, N_{sr} , broja dana presušivanja izvora u cjelokupnom razdoblju analize. Kolovoz predstavlja mjesec u kojem izvor Rječine najčešće presuši.

4. ANALIZA DNEVNIH PRELJEVNIH PROTOKA

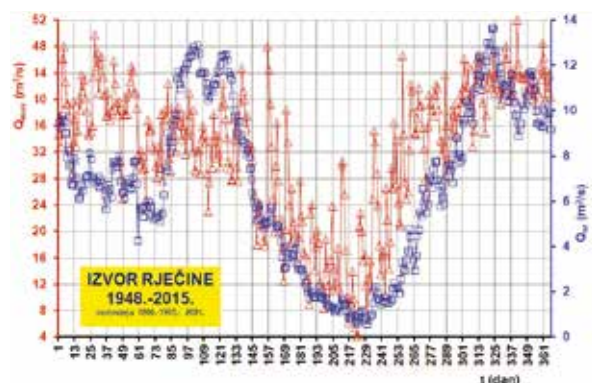
Na slici 12 ucrtani su nizovi maksimalnih srednjih dnevni preljevni protoka, Q_{max} , (crvena boja) i



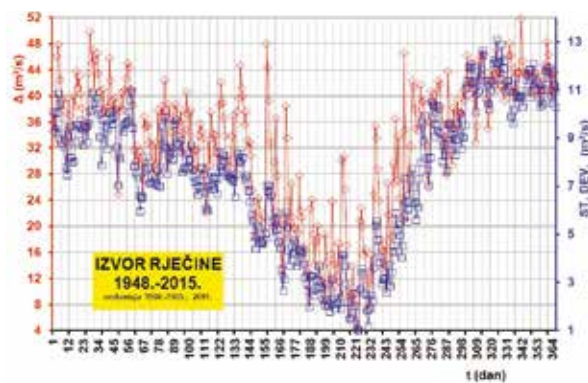
Slika 10: Grafički prikaz dva vremenska niza prosječnih višegodišnjih mjesečnih prelivnih protoka za dva podrazdoblja: (1) siječanj 1948. - prosinac 1979. (nedostaju podatci za 1960.-1965.); (2) siječanj 1980. - prosinac 2015. (nedostaju podatci za 2001.)



Slika 11: Grafički prikaz maksimalnog, N_{max} , i prosječnog, N_{sr} , broja dana presušivanja izvora u cjelokupnom raspoloživom razdoblju analize



Slika 12: Grafički prikaz nizova maksimalnih srednjih dnevnih prelivnih protoka, Q_{max} (crvena boja) i prosječnih srednjih dnevnih prelivnih protoka, Q_{sr} (modra boja) izvora Rječine u cjelokupnom raspoloživom analiziranom razdoblju



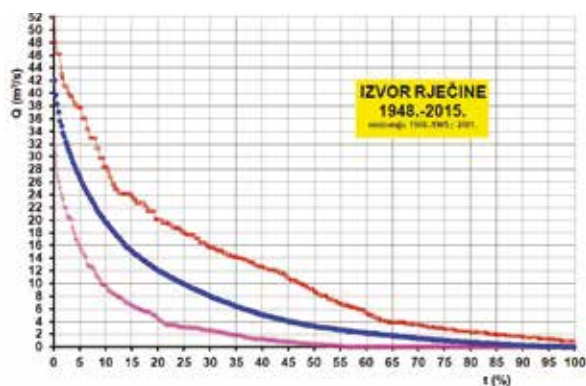
Slika 13: Grafički prikaz vrijednosti raspona, Δ , (crvena boja) između najveće i najmanje opažene vrijednosti te standardne devijacije, ST. DEV., (modra boja) srednjih dnevnih prelivnih protoka za svaki pojedini dan tijekom godine izračunate na osnovi podataka izmjerenih u 61 godini za koje se raspolagalo s mjerenjima

prosječnih srednjih dnevnih prelivnih protoka, Q_{sr} (modra boja) izvora Rječine u cjelokupnom analiziranom razdoblju. Minimalni srednji dnevni prelivni protoci nisu ucrtani jer je izvor presušio u 284 kalendarska dana tijekom raspoložive 61 godine opažanja. Do presušivanja nije došlo isključivo u kalendarskom razdoblju od 1. prosinca do 7. siječnja i kalendarskom razdoblju od 4. travnja do 16. svibnja, dakle tijekom 81 kalendarska dana. Međutim, tada je minimalni srednji dnevni prelivni protok samo tijekom 33 dana bio viši od $0,20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Iz prikaza na slici 12 moguće je uočiti postojanje dva kalendarska podrazdoblja tijekom godine u kojima su srednji dnevni prelivni protoci u prosjeku viši od $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Radi se o sljedeća dva kalendarska podrazdoblja: (1) od kraja ožujka do početka svibnja; (2) od kraja listopada do početka siječnja. Srednji dnevni prelivni protoci niži od $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ javljaju se od početka lipnja do kraja rujna. Preljevni protoci niži od $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ javljaju se tijekom kolovoza. Maksimalni srednji dnevni prelivni protoci viši od $30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pojavili su se tijekom gotovo cijele godine, osim u srpnju i početku kolovoza.

Iz interpretacije podataka prikazanih na prethodnoj slici bilo je moguće uočiti da se na izvoru Rječine tijekom svakog kalendarskog dana godine mogu pojaviti vrlo različiti srednji dnevni prelivni protoci. Kako bi se što

bolje uočilo o kakvom se procesu radi, na slici 13 ucrtane su vrijednosti raspona, Δ , izražene u $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ (crvena boja) između najveće i najmanje opažene vrijednosti srednje dnevne prelivne protoke u svih 61 godinu za koje se raspolagalo s mjerenjima. Uočava se da su rasponi vrlo veliki te da gotovo tijekom cijele godine prelaze vrijednost od $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, što jasno ukazuje na snažnu promjenjivost hidrološkog režima izvora Rječine i njegovu zavisnost od kratkotrajnih intenzivnih oborina i stanja razine podzemnih voda u krškom vodonosniku. Činjenicu da se svaki dan tijekom godine na izvoru Rječine mogu pojaviti srednji dnevni prelivni protoci u velikom rasponu vrijednosti potvrđuju i vrijednosti standardnih devijacija, ST. DEV., (modra boja) izračunate za svaki pojedini dan tijekom godine te prikazane na istoj slici 13.

O mogućoj vrlo velikoj varijabilnosti srednjih dnevnih prelivnih protoka izvora Rječine jasno svjedoče i tri krivulje trajanja, definirane za raspoloživo razdoblje mjerenja od 1. siječnja 1948. do 31. prosinca 2015. (nedostaju podatci za 1960.-1965. i 2001.) prikazane na slici 14. Crvenom bojom je označena anvelopa maksimalnih srednjih dnevnih prelivnih protoka, modrom je označena prosječna krivulja trajanja, a ljubičastom anvelopa minimalnih srednjih dnevnih prelivnih protoka.



Slika 14: Tri krivulje trajanja srednjih dnevnih prelivnih protoka izvora Rječine definirane za razdoblje 1. siječanj 1948. - 31. prosinac 2015. (nedostaju podatci za 1960.-1965. i 2001.)

5. ANALIZA ZAHVAĆANJA VODE IZ IZVORA

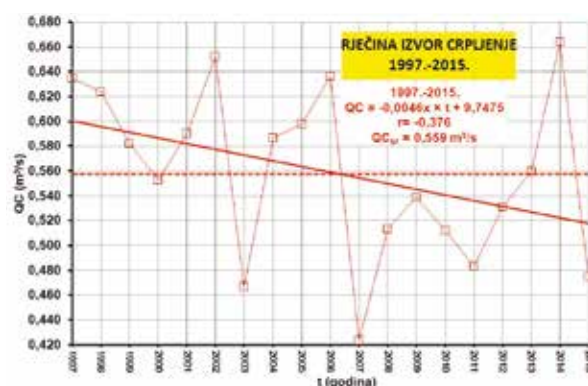
U okviru ovog poglavlja bit će analizirani podatci zahvaćanja vode iz izvora Rječine koje su nam na raspolaganje stavili stručnjaci iz Komunalnog društva Vodovod i kanalizacija d.o.o. Rijeka. Na raspolaganje smo dobili vrijednosti dnevnih količina zahvaćanja iz izvora u razdoblju od 1. siječnja 1997. do 31. prosinca 2015., dakle za posljednjih 19 godina.

Na slici 15 ucrtane su vrijednosti prosječnih godišnjih zahvaćanja, QC, izraženih u $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$. Na slici je ucrtan i pravac linearne regresije iz kojeg se vidi da postoji blagi trend opadanja zahvaćanja iz izvora. U analiziranom razdoblju prosječno se zahvaćalo $0,559 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Maksimalno se zahvaćalo 2014. godine u iznosu od $0,664 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, dok se najmanje zahvaćalo tijekom 2007. godine u iznosu od $0,423 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

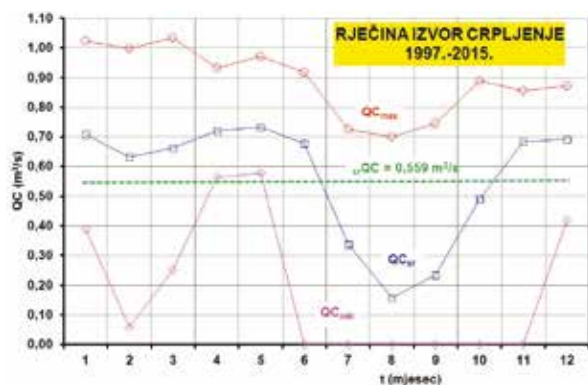
Na slici 16 prikazane su vrijednosti karakterističnih srednjih mjesečnih količina zahvaćanja vode, QC, iz izvora Rječine (minimalnih-QC_{min}, prosječnih-QC_{sr} i maksimalnih-QC_{max}) u razdoblju siječanj 1997. - prosinac 2015. Vidljivo je da količine zahvaćanja variraju od godine do godine u širokim rasponima, najvjerojatnije u zavisnosti od hidrološkog režima izvora. Od listopada do lipnja prosječne mjesečne količine zahvaćanja kreću se oko vrijednosti od $0,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, dok u toplom i sušnom razdoblju padaju ispod $0,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, a minimum dostižu u kolovozu kada padnu ispod $0,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Na slici 17 se nalazi prikaz nizova maksimalnih srednjih dnevnih količina zahvaćanja, QC_{max} (crvena boja), prosječnih srednjih dnevnih količina zahvaćanja, QC_{sr} (modra boja) te minimalnih srednjih dnevnih količina zahvaćanja, QC_{min} (ljubičasta boja) vode iz izvora Rječine u razdoblju od 1. siječnja 1997. do 31. prosinca 2015.

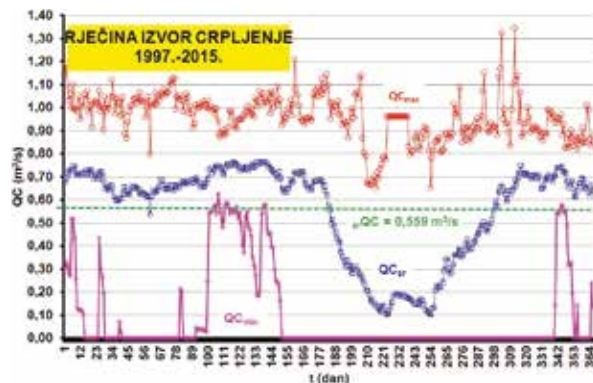
Uspoređujući srednje dnevne protoke izvora, Q, sa srednjim dnevnim protocima zahvaćanja, QC, u razdoblju od 1. siječnja 1997. do 31. prosinca 2015. (isključujući podatke za cijelu 2001. godinu kada nije bilo mjerenja protoka izvora) uočeno je da se voda zahvaćala i u slučajevima kada je izvor Rječine presušio. To je moguće stoga jer su usisne košare zahvata vode niže od prelivne kote izvora. U Tablici 1 napravljena je analiza broja dana



Slika 15: Grafički prikaz prosječnih godišnjih crpljenja vode, QC, iz izvora Rječine u razdoblju 1997.-2015.



Slika 16: Grafički prikaz karakterističnih srednjih mjesečnih količina crpljenja vode, QC, iz izvora Rječine (minimalnih-QC_{min}, prosječnih-QC_{sr} i maksimalnih-QC_{max}) u razdoblju siječanj 1997. - prosinac 2015.



Slika 17: Grafički prikaz nizova maksimalnih srednjih dnevnih količina crpljenja, QC_{max} (crvena boja), prosječnih srednjih dnevnih količina crpljenja, QC_{sr} (modra boja) te minimalnih srednjih dnevnih količina crpljenja, QC_{min} (ljubičasta boja) vode iz izvora Rječine u razdoblju od 1. siječnja 1997. do 31. prosinca 2015.

presušivanja izvora, $N_{Q=0}$, i broja dana kad se iz izvora nije zahvaćala voda, $N_{QC=0}$, te broja dana s razlikom protoka, ΔQ , jednakim nuli ili nižom od 0, gdje je ΔQ definiran sljedećim izrazom:

$$\Delta Q = Q - QC \quad (1)$$

pri čemu, Q, označava srednji dnevni protok preljeva izvora, a, QC, srednju dnevnu količinu zahvaćanja oba izražena u $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$. U stupcu [2] unesene su vrijednosti

iz njega. Pri tome se posebno treba voditi računa o činjenici da se radi o dubokom krškom terenu u kojem su podzemne i površinske vode vrlo suptilno i danas nedovoljno istraženo interaktivno povezane.

Utjecaj zahvaćanja vode na samom izvoru Rječine na promjene njegovih hidroloških (ali zasigurno i drugih) karakteristika moguće je relativno pouzdano kontrolirati. Taj je zadatak tek dijelom obavljen u ovom radu.

Provedenim hidrološkim analizama utvrđeno je da se niz srednjih godišnjih preljevnih protoka može rastaviti u dva vremenska podniza: (1) 1948.-1979.; (2) 1980.-2015. Prosječna vrijednost godišnjih preljevnih protoka drugog podniza niža je za $1,76 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, te je iznosila $6,10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Ova razlika pripisana je povećanju kapaciteta cjevovoda, koji je 1979. pušten u trajnu upotrebu. Analizom srednjih mjesečnih preljevnih protoka (minimalnih, prosječnih i maksimalnih) ustanovljeno je da su travanj i studeni mjeseci u kojima su prosječni višegodišnji preljevni protoci izvora Rječine najizdašniji, dok su srpanj i kolovoz najsušniji. Analiza dnevnih preljevnih protoka jasno je ukazala da se na izvoru Rječine tijekom svakog kalendarskog dana godine mogu pojaviti srednji dnevni preljevni protoci u velikom rasponu vrijednosti (gotovo tijekom cijele godine prelaze vrijednost od $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), što jasno ukazuje na snažnu promjenjivost hidrološkog režima izvora Rječine i njegovu zavisnost od kratkotrajnih intenzivnih oborina i stanja razine podzemnih voda u krškom vodonosniku.

U radu je i detaljnije analiziran fenomen presušivanja izvora Rječine. Prosječni broj dana presušivanja godišnje u razmatranom razdoblju iznosi 44,6 dana, a uočen je statistički neznajčan trend porasta broja dana, N, presušivanja izvora Rječine. Analizom prosječnih mjesečnih podataka utvrđeno je da se potpuno presušivanje pojavilo u mjesecima od lipnja do listopada. Analizom dnevnih preljevnih protoka utvrđeno je da je izvor presušio u 284 kalendarska dana tijekom raspoložive 61 godine opažanja.

Sve navedeno ukazuje na neophodnost stvaranja pouzdanog i vrlo detaljnog monitoringa brojnih klimatoloških, hidroloških, hidrogeoloških, fizičko-kemijskih i drugih parametara koji mogu utjecati na količine i kakvoću vode

podzemnih voda u slivu. Pri tome se ne smije zanemariti činjenica da vododijelnice sliva izvora kao i samog vodotoka nisu pouzdano određene te da se one naglo mijenjaju u zavisnosti od nedovoljno poznatih kretanja podzemnih voda i osobito zbog fluktuacije razina podzemne vode koje u ovom prostoru prelaze intenzitete podizanja od stotinu metara u nekoliko sati. Jedini pouzdani način za rješavanje ove problematike je u aktiviranju starih (Biondić et al., 1997.) i bušenju novih piezometara te kontinuiranog mjerenja razine podzemne vode u njima.

U novije vrijeme intenzivirana su interdisciplinarna istraživanja usmjerenja na širi prostor obuhvata izvora Rječine. Nastavno će se navesti dva rada koje se smatra vrlo vrijednim i pravim putem za postizanje cilja boljeg shvaćanja složenih interdisciplinarnih procesa koji se odvijaju o ovom vrlo ranjivom, ali ekološki i društveno ekstremno značajnom krškom prostoru. Mance et al. (2014.) su korištenjem stabilnih izotopa analizirali krški hidrološki sustav prostora Kvarnerskog zaljeva u koji spada i područje izvora Rječine. Maksimović et al. (2015.) su izvijestili o rezultatima mikrobiološke i kemijske kakvoće vode izvora Rječine u razdoblju od 2010.-2014. Ukazano je na pojavu naglih porasta koncentracije suspendiranih čestica i pogoršanja mikrobioloških svojstava vode izvora tijekom intenzivnih oborinskih epizoda koje su u ovom prostoru izrazito česte.

Definitivno je potrebno napraviti plan interdisciplinarnih (hidroloških, hidrogeoloških, fizikalno-kemijskih, bioloških, ekoloških, društveni itd.) istraživanja vezanih s održivim korištenjem vodnih resursa u širem prostoru sliva Rječine. Autori vjeruju da bi ovaj rad mogao biti poticaj koji će pridonijeti ostvarenju tog cilja.

ZAHVALA

Ovim putem se zahvaljujemo Državnom hidrometeorološkom zavodu na ustupanju podataka mjerenja srednjih dnevnih, mjesečnih i godišnjih preljevnih protoka izvora Rječine te komunalnom društvu Vodovod i kanalizacija d.o.o. Rijeka na ustupljenim podatcima zahvaćenih količina vode izvora Rječine. ■

LITERATURA

- Biondić, B.; Dukarić, D.; Kuhta, M.; Biondić, R. (1997.): Hydrogeological exploration of the Rječina river spring in the Dinaric karst. *Geologia Croatica*, 50/2: 279-288.
- Biondić, B.; Goatti, V.; Vulić, Z. (1979.): Hydrogeological investigation of watershed Rjecina spring, Grobnicko polje, Zvir and Martinscica. *Proceedings of the 1st Intern. Symp. About Groundwater*, UNDP. 61-69, Zagreb.
- Biondić, R.; Kapelj, S.; Rubinić, J. (2004.): *Granični vodonosnici Hrvatske i Slovenije između Kvarnerskog i Tršćanskog zaljeva*. Hrvatski geološki institut, Zagreb. neobjavljeni elaborat.
- Bonacci, O. (1995.): Ground water behaviour in karst: example of the Ombla Spring (Croatia). *Journal of Hydrology*, 165(1-4): 113-134.
- Bonacci, O. (2001.): Analysis of the maximum discharge of karst springs. *Hydrogeology Journal*, 9(4):328-338.
- Bonacci, O.; Roje-Bonacci, T. (2012.): Impact of grout curtains on karst groundwater behaviour: an example from the Dinaric karst. *Hydrological Processes*, 26(18): 2765-2772.
- Božičević, S. (1973.): Contribution to the hydrogeology of the Rječina spring. *Geološki Vjesnik*, 25: 277-283.
- Božičević, S. (1974.): Morphology of the Rjecina spring water channels. *Geološki Vjesnik*, 27: 273-281.

- Državni arhiv u Rijeci (1999.): *Rječina i Zvir - regulacija i revitalizacija*. Rijeka.
- Garbrecht, J.; Fernandez, G.P. (1994.): Visualization of trends and fluctuations in climatic records. *Water Resources Bulletin*, 30(2): 297-306.
- Knežević, R. (1999.): Osnovne značajke režima porječja Rječine. *Acta Geographica Croatica*, 34: 73-88.
- Kuhta, M. (1998.-1999.): Speleološki objekti na području navlačne strukture Rječine. *Speleolog*, 46/47: 23-29.
- Kuhta, M.; Brkić, Ž.; Kuhta, L. (2014.): *Izvor Rječine i sjeverozapadni rub Grobničkog polja; Hidrogeološki radovi - hidrokemijska i izotopna istraživanja*. Hrvatski geološki institut, Zagreb. neobjavljeni elaborat.
- Linić, A. (2005.): Vodoopskrba Rijeke i okolice - Prošlost, sadašnjost i budućnost. *Zbornik radova stručno-poslovnog skupa „Prošlost, sadašnjost i budućnost vodoopskrbe i odvodnje - iskustva i izazovi“*, Opatija. 1-88.
- Maksimović, J.; Piškur, V.; Mihelčić, N.; Vukić-Lušić, D.; Rubinić, J. (2015.) Kemijska i mikrobiološka kakvoća vode izvora Rječine u razdoblju od 2010. do 2014. godine. *Zbornik radova 6. Hrvatske konferencije o vodama*, Opatija. 333-341.
- Mance, D.; Hunjak, T.; Lenac, D.; Rubinić, J.; Roller-Lutz, Z. (2014.): Stable isotope analysis of the karst hydrological systems in the Bay of Kvarner (Croatia). *Applied Radiation and Isotopes*, 90: 23-34.
- Munda, B.; Trutin, M.; Pribeg, D. (2009.): *Novelacija granica zaštitnih zona vodocrpilišta riječkog vodoopskrbnog sustava*. GeoAqua, Zagreb. neobjavljeni elaborat.
- Ožanić, N.; Rubinić, J. (1996.): Problemi praćenja stanja i gospodarenja vodnim resursima na primjeru sliva Rječine. *Hrvatska Vodoprivreda*, 50: 41-45.
- Ožanić, N.; Rubinić, J. (1999.): *Istraživanja na području sliva Rječine*, Hrvatske vode, VGO Rijeka, Rijeka. neobjavljeni elaborat.
- Rubinić, J.; Ožanić, N. (1997.): Prirodne hidrološke značajke površinskih vodnih pojava - podloge za potrebe izrade prostornog plana Županije Primorsko-goranske, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci. neobjavljeni elaborat.
- Rubinić, J.; Sarić, M. (2005.): Hidrologija i vodni resursi u slivu Rječine. *Zbornik radova stručno-poslovnog skupa „Prošlost, sadašnjost i budućnost vodoopskrbe i odvodnje - iskustva i izazovi“*, Opatija. 199-207.
- Stražičić, N. (1999): *Riječki izvori i vodotoci u vremenu prošlom i sadašnjem*. Izdavački centar Rijeka.

A contribution to the Rječina karst spring hydrology

Abstract. The paper contains a hydrological analysis of overflow discharges measured at the Rječina spring. The available data included average daily overflow discharges measured in the period from 1 January 1948 to 31 December 2015. It should be noted that measurements at the spring were not conducted in the period from 1 January 1960 to 31 December 1965 and throughout 2001, i.e. the 68-year period contains complete overflow discharge data for 61 years. The average multiannual discharge in the available period equalled 6.85 m³/s. The lowest value of the average annual overflow discharge was recorded in 2011 and amounted to 3.53 m³/s, whereas the highest value was observed in 1951 and equalled 11.21 m³/s. It was determined that a series of average annual overflow discharges can be divided in two time subseries: (1) 1948 - 1979 and (2) 1980 - 2015. In the first subseries, the average annual overflow discharge equalled 7.86 m³/s, whereas in the second one it was lower by 1.76 m³/s, equalling 6.10 m³/s. The number of days per year (N) when the spring runs dry was analysed. Based on available data, the analysis of abstracted water quantities from the Rječina spring was conducted in the period from 1 January 1997 to 31 December 2015. It was reported that the hydrological regime of the spring had a strong natural variability, and it was recommended that detailed interdisciplinary investigations of the spring water should be carried out to ensure its sustainable use and facilitate further development.

Key words: karst hydrology, water abstraction, Rječina karst spring, spring drying out

Beitrag zur Hydrologie der Karstquelle der Rječina

Zusammenfassung. Im Artikel wird die hydrologische Analyse der an der Quelle der Rječina gemessenen Durchflüsse des Überlaufs dargestellt. Die Angaben über mittlere Tagesdurchflüsse im Zeitraum vom 1. Januar 1948 bis 31. Dezember 2015 standen zur Verfügung mit der Anmerkung, dass an der Quelle von 1. Januar 1960 bis 31. Dezember 1965 sowie im Jahr 2001 keine Messungen durchgeführt wurden. Im Zeitraum von 68 Jahren standen also die Angaben über die Durchflüsse für eine Laufzeit von 61 Jahren zur Verfügung. Der durchschnittliche mehrjährige Durchfluss betrug 6,85 m³/s. Der niedrigste Wert der mittleren Jahresdurchflüsse - 3,53 m³/s - wurde in 2011 beobachtet, während der höchste in 1951 beobachtet wurde und 11,21 m³/s betrug. Es wurde festgestellt, dass sich die Reihe der mittleren Jahresdurchflüsse in zwei zeitliche Unterreihen gliedert: (1) 1948-1979 und (2) 1980-2015. In der ersten Unterreihe betrug der durchschnittliche Jahresdurchfluss 7,86 m³/s, während er in der zweiten Reihe um 1,76 m³/s niedriger war und 6,10 m³/s betrug. Die Anzahl von Tagen pro Jahr (N), wenn die Quelle trocken ist, wurde auch analysiert. Auf Grund von verfügbaren Angaben aus dem Zeitraum vom 1. Januar 1997 bis 31. Dezember 2015 wurden die entnommenen Wassermengen aus der Quelle der Rječina analysiert. Es wird auf die starke natürliche Variabilität des hydrologischen Regimes der Quelle hingewiesen. Weiterhin wird vorgeschlagen, weitere detaillierte interdisziplinäre Untersuchungen des Quellenwassers durchzuführen, mit dem Ziel die nachhaltige Nutzung der Quelle sicherzustellen und weitere Entwicklung zu ermöglichen.

Schlüsselwörter: Karsthydrologie, Wasserentnahme, Karstquelle der Rječina, Austrocknung der Quelle