

Stručni članak | Professional Paper | UDK 556.535(Ombla)
 Primljeno (Received): 27.10.2013.; Prihvaćeno (Accepted): 2.4.2014.

ANALIZA VODNIH RESURSA IZVORA OMBLE

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

Fakultet građevinarstva,
 arhitekture i geodezije
 Sveučilišta u Splitu
 Matice hrvatske 15, 21000 Split
 obonacci@gradst.hr

Manon Fumet

Université d'Avignon et des Pays
 de Vaucluse
 Pôle Agrosociétés - Campus Agroparc
 301 rue Baruch de Spinoza, BP 21239
 84 916 AVIGNON Cedex 9, France

Robert Šakić-Troglić, dipl. ing. građ.

TUDresden, Fak.
 Umweltwissenschaften
 FR Hydrowissenschaften
 Helmholtzstraße 10
 01069 Dresden, Germany

U članku je izvršena kompleksna analiza ponašanja vodnih resursa krškog izvora Omble. Izvor Omble predstavlja tipični priobalni krški izvor. Smješten je u blizini Grada Dubrovnika kojeg pouzdano snabdijeva kvalitetnom pitkom vodom. Na površinu izlazi na nadmorskoj visini od 2,5 m n.m. te se njegove vode praktično odmah preko preljeva ulijevaju u Jadransko more. Minimalni protok je procijenjen na iznos od $4,30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, dok je maksimalni protok procijenjen na $117 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. S obzirom na veličinu sliva, obilne i intenzivne oborine koje se na njemu javljaju, kao i njegov krški karakter, zaključeno je da se radi o izvoru s ograničenim maksimalnim kapacitetom istjecanja. Što se minimalnih protoka tiče, moguće je zaključiti da se prihranjuje iz stabilnog i velikog krškog vodonosnika. Srednji protok u prirodnom stanju u razdoblju opažanja od 1968. do 1980. iznosio je $28,01 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Od 1981. do 2012. (bez 1991.-1992.), dakle u razdoblju kada je korito rijeke Trebišnjice koja protječe kroz njegov sliv regulirano i pretvoreno u betonski kanal u dužini od preko 60 km, srednji se godišnji protok smanjio za $4,29 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ na vrijednost od $23,71 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. U radu su iznesene najnovije hidrološke analize protoka i temperatura vode. Posebna je pažnja posvećena definiranju površine sliva ovog izvora. U literaturi se navodi površina procijenjena na oko 600 km^2 , određena pretežno regionalnim geološkim analizama. Zbog nedostatka pouzdanih podataka niti u ovom radu nije bilo moguće odrediti pouzdanu površinu sliva, a još manje njegove granice. Međutim, primjenom hidrološke metode procijenjeno je da je površina sliva vjerojatno znatno veća te da se kreće između 850 km^2 i 1100 km^2 . Analizirano je i ponašanje nivoa podzemnih voda mjereno u nekoliko dubokih piezometara izbušenih u njegovom zaleđu. Dokazano je da se vododijelnica sliva izvora Omble i susjednog sliva izvora Zavrelje naglo mijenja tijekom vremena kao rezultat padanja intenzivnih oborina te je dokazano da se vode iz vodonosnika izvora Omble povremeno prelijevaju u susjedne izvore.

Ključne riječi: hidrologija krša, krški izvor, protok, Ombla

1. UVOD

Izvor Omble jedan je od najizdašnijih krških izvora Dinarskog krša iz kojeg se kvalitetnom pitkom vodom snabdijeva Grad Dubrovnik. Sliv mu se većim dijelom nalazi na teritoriju Bosne i Hercegovine, a sam izvor je lociran u Hrvatskoj. Već ga i ta činjenica čini osobito zanimljivim sa stanovišta upravljanja i korištenja njegovih vodnih resursa. Značaj ovog izdašnog krškog izvora u lokalnom i regionalnom smislu je velik. U njegovom neposrednom zaleđu planirana je izgradnja podzemne hidroelektrane Ombla (Jović, 2003.; Paviša, 2003.; Sever, 2003.).

U članku će biti tretirana prvenstveno hidrološka problematika. Kako se radi o krškom izvoru čiji je sliv lociran u dubokom kršu, kao što je onaj Dinarski, nemoguće je striktno razdvojiti hidrološke od hidrogeoloških analiza. Stoga će u ovom radu istovremeno biti korišteni različiti klimatološki, hidrološki, kao i hidrogeološki parametri kako bi mogli biti tretirani i objašnjeni različiti aspekti vodnih resursa izvora Omble.

Analizirat će se karakteristične (minimalne, srednje i maksimalne) godišnje, mjesečne i dnevne protoke izvora Omble. Uz to će biti izneseni rezultati mjerenja temperature vode izvora Omble. Nivoi podzemne vode mjereni u nekoliko dubokih piezometara bit će povezani s protocima izvora, a bit će iznesena i analiza istovremenih protoka izvora Omble i susjednog izvora Zaton, koji se još naziva i Palata. Važno je u uvodu naglasiti da su za predmetne analize na raspolaganju stajali nizovi podataka različite vremenske dužine, pa i različite kvalitete, što je samo donekle moglo utjecati na donošenje pouzdanih zaključaka. O svakom pojedinom parametru i slučaju bit će nastavno detaljno govora.



Slika 1 Situacija analiziranog područja s ucrtanom pretpostavljenom granicom sliva izvora Omble, položajem izvora Zaton, rijeke Trebišnjice, meteorološke postaje Trebinje, granice između Bosne i Hercegovine i Hrvatske te položaja izvedenih brana, akumulacija i hidroelektrana (HE)

Klimatološki parametri neće biti detaljnije analizirani u ovom radu prvenstveno stoga jer nije poznata ni površina, a još manje točne granice sliva izvora Omble. Informacije radi, u uvodu će se spomenuti da je na osnovi raspoloživog niza srednjih godišnjih temperature zraka mjerenih na meteorološkoj postaji Dubrovnik, u razdoblju 1961.–2012. ustanovljeno da je u podrazdoblju 1961.–1991. prosječna godišnja temperatura zraka iznosila 16,26 °C te da u tom podrazdoblju nije primijećen trend porasta srednjih godišnjih temperatura zraka. Statistički značajan trend porasta temperatura zraka primijećen je u recentnom podrazdoblju od 1992. do 2012., kada je i prosječna srednja temperatura zraka iznosila 16,95 °C, dakle za 0,69 °C više nego u prethodnom podrazdoblju. Detaljnije analize problematike skoka temperatura u Hrvatskoj, kao i na širem području zapadnog Balkana, moguće je naći u radovima Bonaccija (2010.; 2012.).

Prosječna godišnja oborina izmjerena na postaji Dubrovnik u razdoblju 1962.–2012. iznosila je 1142 mm. U spomenutom razdoblju trajanja 52 godine uočen je statistički značajan trend opadanja godišnjih oborina od prosječno 4,4 mm na godinu, što u cjelokupnom razdoblju iznosi čak 229 mm (oko 20 % prosječne oborine). Taj bi trend bio i značajno veći da 2009. i 2010. godine nisu bile ekstremno vlažne. Tijekom 2010. godine palo je 1722 mm, a tijekom 2009. 1590 mm oborina, što predstavlja treću i četvrtu najkišniju godinu cjelokupnog analiziranog razdoblja. Godine s najviše izmjerenih oborina na postaji Dubrovnik bile su 1963. i 1969. s 1750 mm.

Do klimatoloških podataka sa sliva Omble iz Bosne i Hercegovine (osim za postaju Trebinje), nažalost, nismo bili u mogućnosti doći. Prethodno izneseno spomenuto je stoga da se ukaže na moguće (vrlo vjerojatne) posljedice recentnih klimatskih promjena u cijelom slivu na promjene u ponašanju vodnih resursa izvora Omble. Daljnji porast temperature zraka i snižavanja količine oborina na slivu uz stalne i slabo kontrolirane antropogene zahvate mogli bi značajno utjecati na smanjivanje i/ili preraspodjelu vodnih resursa tijekom godine, što bi pak moglo uzrokovati mnogo negativnih posljedica ne samo na ekosustav, već i na socijalne i političke procese u regiji. Zbog nedostatka relevantnih podataka, analize te vrste nije bilo moguće izvršiti u okviru ovog rada. Stoga se već u uvodu naglašava neophodnost žurne analiza spomenute vrlo aktualne problematike s mogućim negativnim posljedicama na vodne resurse, ali i na brojne druge procese u slivu izvora Omble.

O raznim vidovima vodnih resursa izvora Omble objavljeni su u stručno-znanstvenoj literaturi brojni radovi (Paviša, 1988.; Žugaj i Bonacci, 1994.; Bonacci, 1995., 2004.; Milanović, 1981., 1996. 2000.; Ravnik i Rajver, 1998.; Bonacci i Roje-Bonacci, 2000.a, 2000.b.; Buljan et al., 2000.; Jović, 2003.; Paviša, 2003.; Sever, 2003.; Žugaj i Androić, 2011.; Denić-Jukić et al., 2012.; Roje-Bonacci i Bonacci 2013.). Cilj ovog rada je da hrvatskoj znanstvenoj i stručnoj javnosti iznese najnovije rezultate



Slika 2 Fotografija izvora Omble i okolne regije (snimio A. Maškarić)

hidroloških analiza ovog izvanrednog krškog fenomena te da ukaže na neophodnost njegovih daljnjih sustavnih i interdisciplinarnih istraživanja.

Na slici 1 prikazana je situacija analiziranog područja s ucrtanom pretpostavljenom granicom sliva izvora Omble, položajem izvora Zaton, rijeke Trebišnjice, meteorološke postaje Trebinje, granice između Bosne i Hercegovine i Hrvatske te položaja izvedenih brana, akumulacija i hidroelektrana (HE). Na slici 2 nalazi se fotografija izvora Omble i okolne regije (snimio A. Maškarić) na kojoj je moguće uočiti fascinantnu prirodnu ljepotu ovog krškog fenomena.

2. PROTOCI

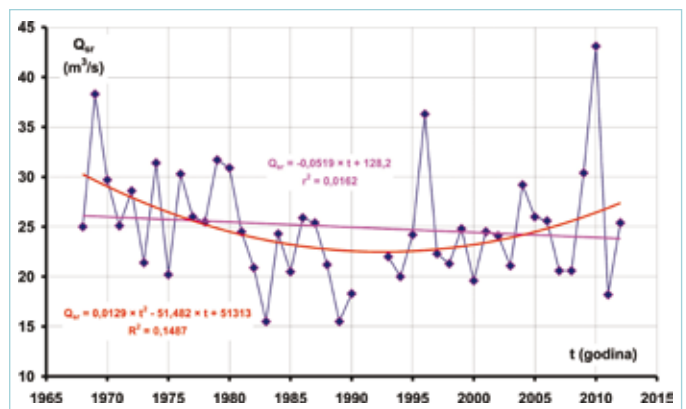
U radu su korišteni i analizirani najnoviji službeni hidrološki podatci protoka izvora Omble koje smo nesebično dobili od Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) iz Zagreba na čemu im i ovom prilikom zahvaljujemo. Činjenica da se radi o službenim podacima naglašava se stoga jer je u raznim izvorima (prije objavljenim studijama, referatima na domaćim i stranim skupovima i domaćoj i stranoj literaturi) moguće naići na različite podatke. Osim spomenutih podataka raspolagalo se i s podacima srednjih dnevnih protoka za razdoblje 1962.–1987. iz elaborata Instituta za korištenje i zaštitu voda u kršu, Trebinje (1988.). Ti su podatci korišteni samo za jednu analizu izvršenu u ovom radu. Treba istaknuti da postoje određene razlike između dva različita obrađivača koje nisu značajne kod srednjih i maksimalnih protoka, ali su razlike velika kod minimalnih protoka. Minimalne dnevne protoke određene od strane Instituta značajno su manje od onih koje su određene od strane DHMZ-a.

U članku je analizirano razdoblje od 55 godina (1968.–2012.) za koje se raspolagalo sa službenim podacima DHMZ-a. Neophodno je istaknuti da su zbog ratnih događanja u razdoblju od 1. rujna 1991. do 31. prosinca 1992. godine mjerenja vodostaja na izvoru Omble bila prekinuta.

Na slici 3 grafički je prikazan vremenski niz srednjih godišnjih protoka izvora Omble, Q_{sr} ($m^3 s^{-1}$), u razdoblju 1968.–2012. (bez 1991.–1992.) s ucrtanim pravcem linearne

regresije i krivuljom polinoma drugog reda te upisanim vrijednostima kvadrata koeficijenta linearne korelacije, r^2 , i indeksa nelinearne korelacije, R^2 . Srednji godišnji protoci u analiziranom razdoblju kreću se u vrlo širokom rasponu od minimalnih $15,5 m^3 s^{-1}$ 1989. godine do maksimalnih $43,1 m^3 s^{-1}$ 2010. godine, što znači da iz izvora godišnje može istjecati između 488×10^6 i $1359 \times 10^6 m^3$ vode.

Uočava se pojava statistički značajnog trenda opadanja srednjih godišnjih protoka koja iznosi u prosjeku 52 litre godišnje tijekom 50 godišnjeg razdoblja obuhvaćenog analizom. Pojava ovog trenda većim je dijelom uzrokovana činjenicom da je 1981. završeno reguliranje i betoniranje korita Trebišnjice kroz Popovo polje u dužini od nešto više od 60 km. Betonirano korito je dimenzionirano da kroz njega protječe oko $50 m^3 s^{-1}$ vode. Razlog betoniranja je bio da se spriječe gubitci vode kroz prirodno korito u krško podzemlje. U prirodnom stanju dio vode iz Trebišnjice je ponirao u krško podzemlje te prihranjivao vodonosnik izvora Omble. U prirodnom je režimu praktično svake godine tijekom dugih vremenskih razdoblja Trebišnjica presušivala. Na slici 4 nalazi se fotografija betoniranog korita rijeke Trebišnjice (snimio

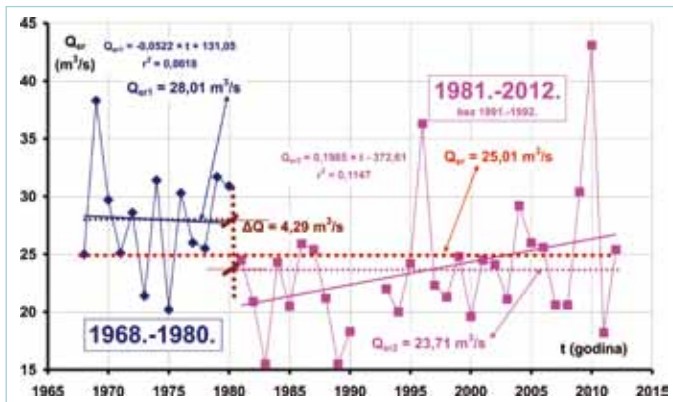


Slika 3 Grafički prikaz vremenskog niza srednjih godišnjih protoka izvora Omble, Q_{sr} ($m^3 s^{-1}$), u razdoblju 1968.–2012. (bez 1991.–1992.) s ucrtanim pravcem linearne regresije i krivuljom polinoma drugog reda te upisanim vrijednostima kvadrata koeficijenta linearne korelacije, r^2 , i indeksa nelinearne korelacije, R^2

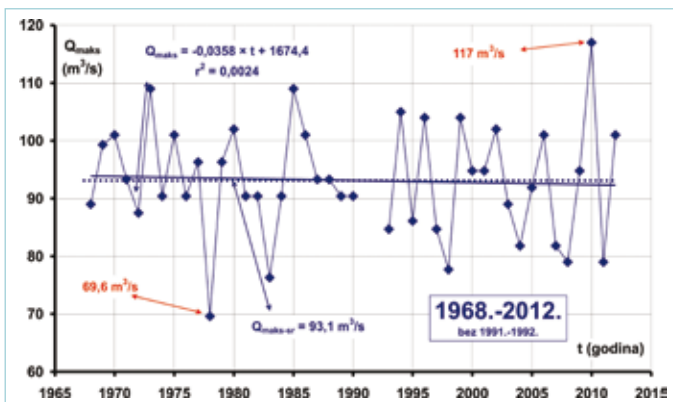
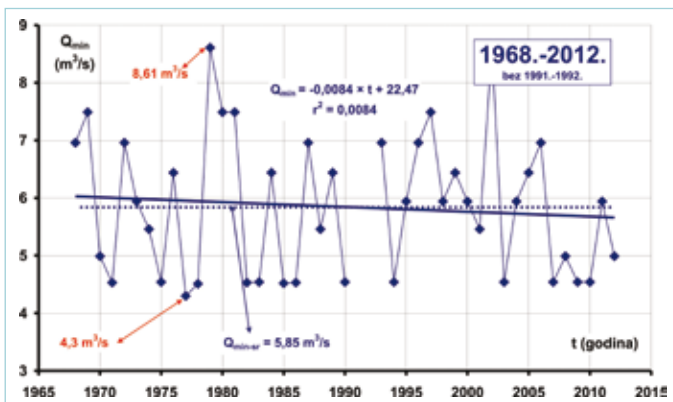


Slika 4 Fotografija reguliranog i betoniranog korita rijeke Trebišnjice (snimio O. Bonacci)

O. Bonacci). Primjenom RAPS (Rescaled Adjusted Partial Sums) metode (Garbrecht i Fernandez, 1994.; Bonacci et al., 2008.; Bonacci i Oskoruš, 2010.) utvrđeno je da postoji statistički značajan pad srednjih godišnjih protoka izvora Omble u razdoblju poslije betoniranja korita Trebišnjice. Na slici 5 prikazana su dva vremenska podniza srednjih godišnjih protoka izvora Omble. Uočava se da je u prirodnom stanju (razdoblje 1968.-1980.) analizirani protok bio za $4,29 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ viši od onog u razdoblju poslije



Slika 5 Grafički prikaz dva vremenska podniza srednjih godišnjih protoka izvora Omble, Q_v ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), u slijedeća dva podrazdoblja: 1) 1968.-1980.; 2) 1981.-2012. (bez 1991.-1992.)



Slika 6 Grafički prikaz vremenskog niza a) minimalnih, Q_{\min} ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), i b) maksimalnih, Q_{\max} ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), godišnjih protoka izvora Omble u razdoblju 1968.-2012. (bez 1991.-1992.) s ucrtanim pravcima linearne regresije i upisanim vrijednostima kvadrata koeficijenta linearne korelacije, r^2

betoniranja korita Trebišnjice (1981.-2012.). Radi se o 15 % smanjenom protoku. On bi bio i nešto veći da se 2010. godine nije pojavio najveći protok u cijelom razdoblju opažanja koji je iznosio $43,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ što je za $4,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ više od drugog po redu protoka koji je iznosio $38,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, a pojavio se 1969. godine.

Na slikama 6a i 6b se nalaze grafički prikazi vremenskih nizova minimalnih, Q_{\min} ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), i maksimalnih, Q_{\max} ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), godišnjih protoka izvora Omble u razdoblju 1968.-2012. (bez 1991.-1992.) s ucrtanim pravcima linearne regresije i upisanim vrijednostima kvadrata koeficijenta linearne korelacije r^2 . Trendovi opadanja nisu statistički značajni, što potvrđuju i niske vrijednosti kvadrata koeficijenta linearne korelacije, r^2 . Stoga se može zaključiti da se radi o slučajnim varijacijama.

Prosječna vrijednost minimalnog godišnjeg protoka izvora iznosi $5,85 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, a kreće se u rasponu između $4,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ i $8,61 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Može se zaključiti da se radi o krškom izvoru koji se hrani izdašnjim i stabilnim krškim vodonosnikom smještenim u njegovom zaleđu.

Prosječna vrijednost maksimalnog godišnjeg protoka izvora iznosi $93,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, a kreće se u rasponu između $69,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ i $117 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Treba ukazati na činjenicu da je u postojećoj literaturi površina sliva izvora Omble procijenjen na oko 600 km^2 (Milanović, 1996.; Paviša, 1998.). Pretpostavljene granice tog sliva ucrtane su na slici 1. Ako se uzme u obzir da se sliv prostire na području koje spada među one na kojima padaju najobilnije godišnje oborine u Europi, s hidrološkog stanovišta maksimalni protok od samo oko $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ zasigurno je premalen. Objašnjenje se može naći u činjenici da izvor Omble spada u krške izvore s ograničenim maksimalnim kapacitetom istjecanja. Bonacci (2001.a) je dao detaljno objašnjenje ograničenog maksimalnog izlaznog kapaciteta krških izvora. U slučaju izvora Omble maksimalni izlazni kapacitet ograničen je činjenicom prelijevanja voda u okolne slivove, akumuliranjem vode u jako raspucanoj krškoj vadoznoj i epikrškoj zoni, ograničenim dimenzijama izlaznog krškog provodnika i tečenjem vode pod pritiskom.

Na fotografiji koja se nalazi na slici 7 vidi se pojava tri površinska toka iznad izvora Omble. U ovom se slučaju ne radi o površinskim bujičnim tokovima, već o izlivanju podzemne vode kroz fosilne i tijekom uobičajenih nivoa podzemne vode u zaleđu, neaktivnih krških provodnika. Naglo podizanje nivoa podzemne vode dogodilo se dana 23. studenog 2010. Uzrokovano je intenzivnim kratkotrajnim oborinama palim na sliv. Na kišomeru Dubrovnik izmjereno je $160,4 \text{ mm}$ kiše u manje od tri sata, dok su na slivu u Bosni i Hercegovini oborine bile još obilnije, ali pouzdane podatke nismo mogli dobiti. Maksimalni trenutačni protok izmjereno na izvoru Omble tog je dana iznosio $117 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Na osnovi slike 7 može se donijeti još jedan zaključak bitan za definiranje maksimalnog mogućeg izlaznog protoka isključivo iz krškog provodnika izvora Omble. Njegova maksimalna



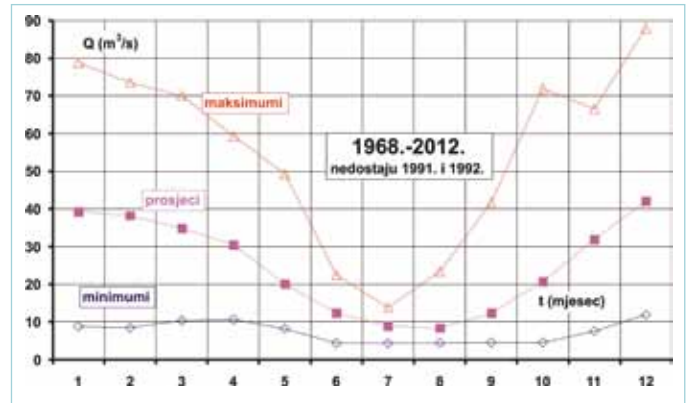
Slika 7 Fotografija lokaliteta izvora Omble snimljena 23. studenog 2010.

vrijednost vjerojatno ne prelazi $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Količine vode iznad spomenute vrijednosti od oko $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ dotječu u prostor formiran preljevom na kojem se mjeri vodostaj izvora, slijevanjem iz okolnog krškog masiva koncentriranim ili dispergiranim povremenim dotocima. Takav slučaj upravo je prikazan na fotografiji na slici 7. U ovom trenutku ne raspolaže se s tehnologijom mjerenja koja bi omogućila da se precizno i pouzdano odrede samo one količine vode koje izlaze iz krškog provodnika izvora Omble pa stoga prethodno izneseno treba uzeti u obzir kao vjerojatno važeću hipotezu.

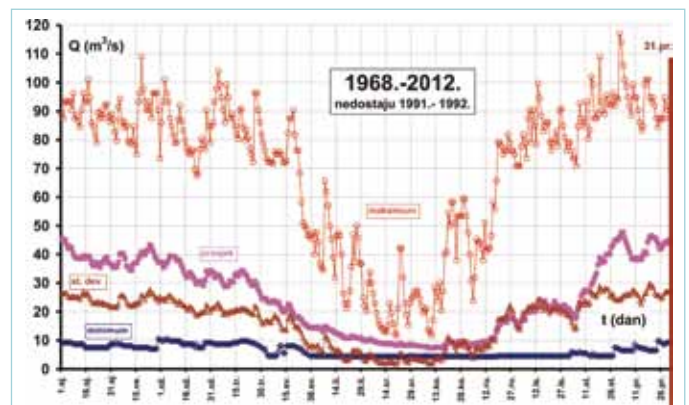
Grafički prikaz karakterističnih (maksimalnih, prosječnih i minimalnih) srednjih mjesečnih protoka, Q ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), izvora Omble izmjerenih u razdoblju 1968.-2012. (nedostaju 1991. i 1992.) prikazani su na slici 8. Moguće je uočiti da su rasponi srednjih mjesečnih protoka vrlo veliki. Najmanja je bila izmjerena u srpnju i iznosila je $9,35 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, dok se najveća vrijednost pojavila u prosincu te je iznosila $76,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Niski srednji protoci mogu se javiti u svakom mjesecu godine, dok se visoki javljaju samo u hladnom razdoblju godine.

Na slici 9 grafički su prikazani karakteristični (maksimalni, prosječni i minimalni) srednji dnevni protoci, Q ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), izvora Omble i njihove standardne devijacije izmjerene u razdoblju 1968.-2012. (nedostaju 1991. i 1992.). Iz ovog se prikaza još detaljnije nego na prethodnoj slici, na kojoj su prikazani karakteristični srednji mjesečni protoci, može uočiti da se svaki dan tijekom cijele godine mogu pojaviti vrlo niski protoci (niži od $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). U analiziranom razdoblju pojava protoka višeg od $70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ nije bila opažena u razdoblju od 23. svibnja do 18. rujna. Maksimalni trenutačni protok od $117 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ opažen je 1. prosinca 2010.

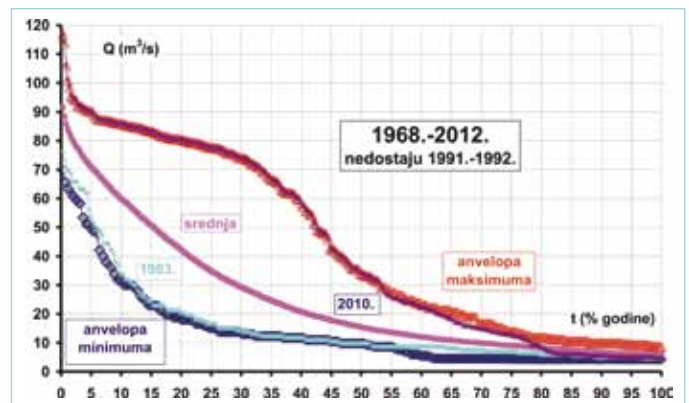
Na slici 10 ucrtano je pet krivulja trajanja srednjih dnevnih protoka, Q ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), izvora Omble. Srednja krivulja za cijelo analizirano razdoblje 1968.-2012. (nedostaju 1991. i 1992.) označena je svijetloplavom bojom. Anvelopa maksimuma ucrtana je crvenom bojom, dok je anvelopa minimuma ucrtana modrom bojom. Krivulja trajanja najsušnije godine analiziranog razdoblja, 1983. godine,



Slika 8 Grafički prikaz karakterističnih (maksimalnih, prosječnih i minimalnih) srednjih mjesečnih protoka, Q ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), izvora Omble izmjerenih u razdoblju 1968.-2012. (nedostaju 1991. i 1992.)

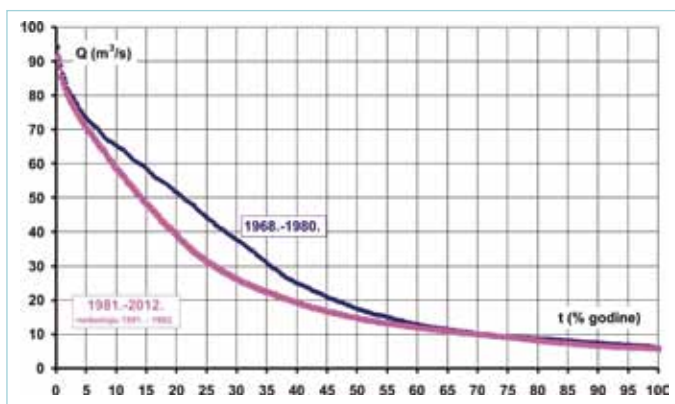


Slika 9 Grafički prikaz karakterističnih (maksimalnih, prosječnih i minimalnih) srednjih dnevnih protoka, Q ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), izvora Omble i njihove standardne devijacije izmjenjenih u razdoblju 1968.-2012. (nedostaju 1991. i 1992.)

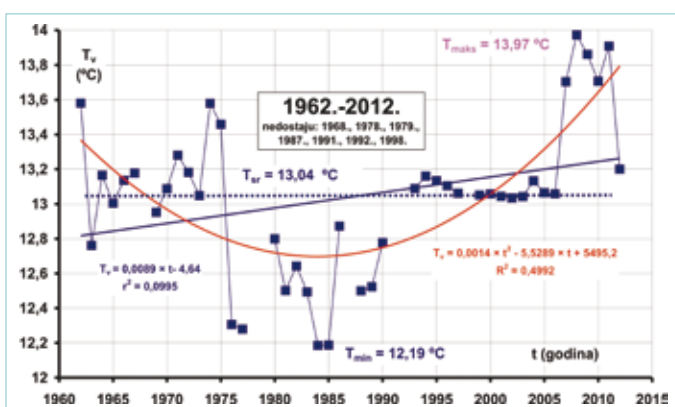


Slika 10 Pet krivulja trajanja srednjih dnevnih protoka, Q ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), izvora Omble: 1) anvelopa maksimuma (crvena boja); 2) srednja krivulja (svijetloplava boja); 3) anvelopa minimuma (modra boja); 4) najsušnja 1983. godina (svjetloplava boja); 5) najvlažnija 2010. godina (tamno ljubičasta boja). Srednja krivulja i anvelopne krivulje su određene za razdoblje 1968.-2012. (nedostaju 1991. i 1992.)

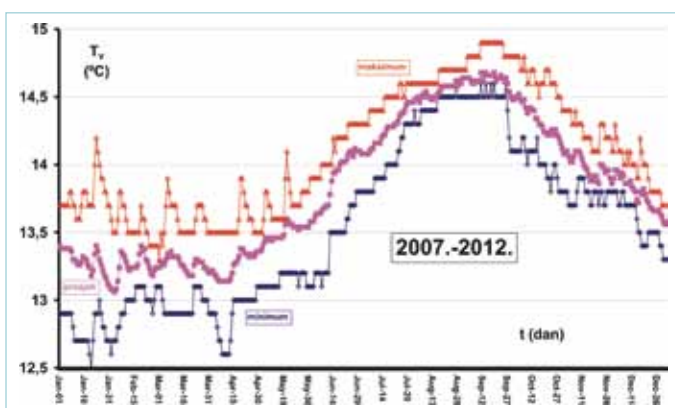
označena je svijetloplavom bojom, dok je krivulja trajanja najvlažnije 2010. godine ucrtana tamno ljubičastom bojom. Važno je uočiti da se anvelopa minimuma gotovo poklapa s krivuljom trajanja najsušnije 1983. godine, dok je anvelopa maksimuma gotovo identična s krivuljom trajanja protoka u najvlažnijoj 2010. godini.



Slika 11 Srednje krivulje trajanja srednjih dnevnih protoka, Q ($m^3 s^{-1}$), izvora Omble određene za dva podrazdoblja: 1) 1968.-1980.; 2) 1981.-2012. (nedostaju 1991.-1992.)



Slika 12 Grafički prikaz vremenskog niza srednjih godišnjih temperatura vode izvora Omble, T_v (°C), u razdoblju 1962.-2012. (nedostaju 1968., 1978., 1979., 1987., 1991., 1992., 1998.) s ucrtanim pravcem linearne regresije i krivuljom polinoma drugog reda te upisanim vrijednostima kvadrata koeficijenta linearne korelacije, r^2 , i indeksa nelinearne korelacije, R^2



Slika 13 Grafički prikaz karakterističnih (maksimalnih, prosječnih i minimalnih) srednjih dnevnih temperatura vode, T_v (°C), izvora Omble izmjenjenih u razdoblju 2007.-2012.

Na slici 11 ucrtane su srednje krivulje trajanja srednjih dnevnih protoka, Q ($m^3 s^{-1}$), izvora Omble određene za dva podrazdoblja: 1) 1968.-1980. 2) 1981.-2012. (nedostaju 1991.-1992.). Prvo se podrazdoblje odnosi na prirodni hidrološki režim koji nije bio poremećeni reguliranjem i betoniranjem korita Trebišnjice kroz Popovo polje u dužini

većoj od 60 km, dok se u drugom podrazdoblju osjeća utjecaj tog zahvata, ali i rada uzvodnih hidroelektrana. Bitno je uočiti da se velike razlike javljaju kod protoka većih od oko $15 m^3 s^{-1}$ i manjih od oko $50 m^3 s^{-1}$. Kod nižih, kao i viših protoka od prethodno spomenutih, razlike između dvije srednje krivulje trajanja su manje te se smanjuju i nestaju idući prema najvećim i najmanjim protocima.

3. TEMPERATURA VODE

Temperatura vode predstavlja jednu od najvažnijih fizičkih karakteristika vode koja utječe na druge fizičke, kemijske i biološke karakteristike i reakcije u sustavu i prostoru u kojem se voda nalazi i kroz koji se kreće (Bonacci et al., 2008.). Temperatura vode integrira utjecaje podzemnog kao i površinskog okoliša. Zbog toga taj podatak može biti iskorišten kao parametar za određivanje vremena boravka vode u pojedinom mediju ili dijelu sustava, te za definiranje svojstava tog medija. To se osobito odnosi na temperaturu vode krških izvora i vodotoka (Bonacci i Andrić, 2008.). Dakle, pažljivom analizom zasnovanom na detaljnim i kontinuiranim mjerenjima promjena temperatura vode tijekom vremena u kombinaciji s njenim ostalim kemijskim i fizičkim svojstvima potencijalno je moguće ustanoviti porijeklo vode. Pri analizi temperature izvorske vode od značaja bi bilo izučiti dinamičke promjene temperature vode tijekom pojedinih valova velikih voda. Za ispunjavanje tog cilja bilo bi neophodno raspolagati s kontinuirano mjerenim (najmanje satnim) podacima. Nažalost, autori ovog rada su raspolagali samo s podacima DHMZ-a očitanim jednom dnevno. U slučaju izvora Omble, čija se voda koristi za opskrbu pitkom vodom Grada Dubrovnika i okolice, analiza promjena temperature vode tijekom vremena od posebnog je značaja. Temperatura vode predstavlja u tom slučaju i važnu zdravstvenu te ekološku karakteristiku. Mjerenja temperatura vode izvora Omble započela su 1962., ali su prekidi u mjerenjima bili brojni. Temperatura vode na izvoru Omble mjerila se do kraja 2006. jednom dnevno, najčešće između 7 i 8 sati ujutro. Od 23. prosinca 2006. mjerenja se vrše automatski i kontinuirano pomoću digitalnog termometra instaliranog u blizini vodomjerne letve. Pouzdanost i točnost manualno mjerenih temperatura vode izvora Omble nisu visoki i mogu biti opterećeni greškom od ± 1 °C (ponekad i većom). Bez obzira na to, podatci koji su sakupljeni i nastavno analizirani daju vrlo značajne informacije o svojstvima i porijeklu vode koja istječe iz ovog izvora.

Na slici 12 grafički je prikazan vremenski niz srednjih godišnjih temperatura vode izvora Omble, T_v (°C), u razdoblju 1962.-2012. (nedostaju 1968., 1978., 1979., 1987., 1991., 1992., 1998.) s ucrtanim pravcem linearne regresije i krivuljom polinoma drugog reda te upisanim vrijednostima kvadrata koeficijenta linearne korelacije, r^2 , i indeksa nelinearne korelacije, R^2 . Prosječna srednja godišnja temperatura za cijelo raspoloživo razdoblje iznosila je

13,04 °C, a kretala se u rasponu od minimalnih 12,19 °C (1984.) do maksimalnih 13,97 °C (2008.). Neophodno je uočiti nagli skok temperatura vode koji se dogodio 2007. godine i nastavio sve do 2011. Skok je značajan i iznosi prosječno 0,7 °C. Najvjerojatiji razlog ovog skoka leži u promjeni načina, položaja i instrumenta mjerenja o čemu je prethodno iznesena informacija. S druge strane treba uočiti da je 2012. godine srednja godišnja temperatura opet pala na sličnu razinu koja je bila i u razdoblju od 1962. do 2006. U ovom trenutku nemamo objašnjenje za takvo ponašanje.

Od 2007. do danas vrše se kontinuirana mjerenja temperature vode izvora Omble automatskim i na jednom mjestu fiksiranim termografom. Za ta se mjerenja očekuje da daje pouzdanije i homogenije rezultate nego ručna mjerenja vršena u prethodnom razdoblju. Zbog toga je na slici 13 dat grafički prikaz karakterističnih (maksimalnih, prosječnih i minimalnih) srednjih dnevnih temperatura vode, T_v (°C), izvora Omble izmjerenih u razdoblju 2007.-2012. Raspon srednjih dnevnih temperatura kretao se između minimalne vrijednosti od 12,5 °C i maksimalne 14,9 °C. Moguće je zaključiti da izmjerene temperature vode prate hod temperatura zraka. U kolikoj je to mjeri posljedica činjenice da je termograf postavljen izvan otvora izvora Omble, pa je stoga pod jačim utjecajem temperature zraka nego kad bi bio lociran u podzemlju, u samom krškom provodniku iz kojeg Ombla izbija na površinu, ne može se u ovom trenutku pouzdano zaključiti. Međutim, činjenica da se temperature vode kreću u uskim granicama između 12 °C i 15 °C ukazuje na to da se ona dugo zadržava u podzemnom krškom vodonosniku.

4. POVRŠINA SLIVA

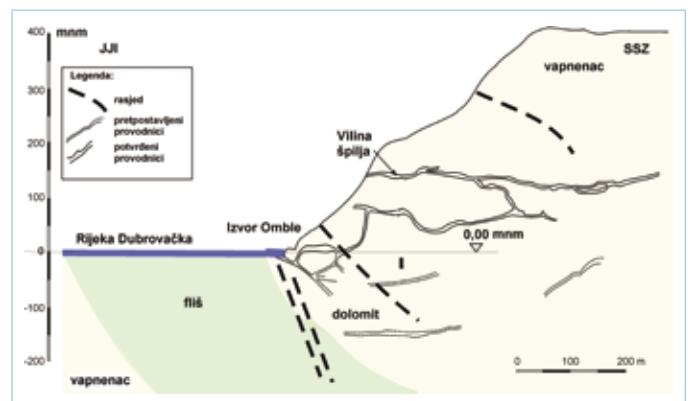
Sliv predstavlja topografski definirano područje drenirano izvorom, otvorenim vodotokom, jezerom ili sustavom povezanih izvora i provodnika tako da sve količine vode istječu kroz jedan izlaz ili mogu biti kontrolirane na jednom profilu (Bonacci, 2004.). Određivanje točnih površina i granica slivova bitna je polazna informacija za sve hidrološke, ali i druge analize vodnih resursa, a osobito one koje se bave izučavanjem bilance voda i upravljanjem vodnim resursima. Bez tih podataka nije moguće vršiti analize bilance voda, pa stoga niti učinkovito upravljati vodnim resursima, štiti izvore, vodotoke ili jezera od zagađenja, formirati i koristiti hidrološke i druge modele itd.

Sliv u kršu, kao i cirkulacija vode unutar njega, ekstremno su složeni i promjenjivi tijekom vremena. U slučaju netočno određenih granica i površina slivova, što nije rijedak slučaj u krškim uvjetima, hidrološki, ali i drugi zaključci mogu biti krivo usmjereni te kao takovi mogu poslužiti za donošenje krivih pa i opasnih zaključaka. Općenito uzevši, u kršu nije moguće definirati granice sliva na osnovi isključivo površinske morfologije terena, dakle na osnovi analiza topografskih karata. Razlika

između stvarnog hidrološko-hidrogeološkog sliva i prema površinskoj topografiji određenog sliva u terenima dubokog krša (kao što je ovaj Dinarski) u pravilu su tako veliki da je tzv. topografski ili orografski sliv beskorisno (pa i štetno) upotrebljavati u praksi.

Pri određivanju površina sliva u kršu uglavnom se zaboravlja na činjenicu da se proces karstifikacije, tj. otapanja, fizičke erozije, promjene dimenzija i redistribucije površinskih i podzemnih krških oblika, kontinuirano i nezaustavljivo odvija te da ga se ne može kontrolirano pratiti (barem za sada). Sliv u kršu nije samo trodimenzionalna, već i četverodimenzionalna veličina. Četvrtu dimenziju predstavlja vrijeme. Promjene razine podzemne vode u krškom vodonosniku općenito i vrlo često naglo utječu na promjenu površine sliva s kojeg se prihranjuje analizirani krški izvor. To znači da neko područje prihranjivanja ne mora isključivo pripadati samo jednom izvoru. Od ostalih prirodnih procesa koji su stalno prisutni te utječu na promjenu područja prihranjivanja navode se sljedeći: erozija, transport i odlaganje sedimenata u podzemlju i na površini terena, razvoj i urušavanje ponikvi te otvaranje i zatvaranje ponora i ponorskih zona, čepljenje, ali i odčepljivanje velikih krških provodnika, itd.

U slučaju izvora Omble, koji spada u priobalne krške fenomene, o prethodno spomenutom treba voditi posebno ozbiljno računa. Razlog tome je u činjenici što je pred oko 21 tisuću godina globalna razina površine vodnog ogledala oceana na Zemlji bila za oko 100 m do 130 m niža od one današnje (Šegota, 1968.). Postoji realna mogućnost da je tada izlaz izvora Omble na površinu terena bio mnogo niži nego što je ovaj današnji. Kao hipotetična potvrda toj pretpostavci može poslužiti slika 14 na kojoj je ucrtan presjek kroz sustav istraženih krških špilja i velikih krških provodnika u blizini izlaza izvora Omble (Ravnik i Rajver, 1998.; Sever, 2003.). Ravnik i Rajver (1998.) su na osnovi mjerenja temperature vode u nizu dubokih piezometara izbušenih iz istražne galerije za izvedbu projektirane injekcijske zavjese pronašli položaje dva aktivna krška provodnika. Označeni su na slici 14 crtkanim linijama,

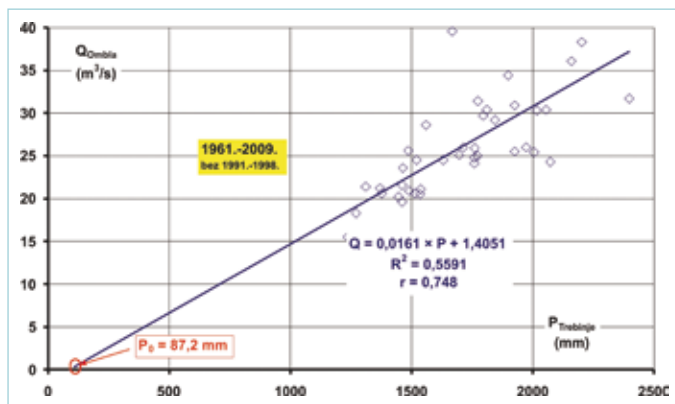


Slika 14 Presjek kroz sustav istraženih krških špilja i velikih krških provodnika u blizini izvora Omble. Slika je modificirana iz literature (Ravnik i Rajver, 1998.; Sever, 2003.)

a njihovo daljnje protezanje samo je pretpostavljeno i nepotvrđeno. Od kuda dolaze i kuda odlazi voda koja kroz njih teče nepoznato je. Postoje li, osim njih, još neki aktivni ili neaktivni (fosilni) provodnici, nije poznato. U biti, krški oblici u stalno zasićenom području krškog vodonosnika izvora Omble nisu uopće istraženi. Sa slike 14 se uočava da su neki veliki krški oblici (špilje, jame i provodnici) u nezasićenoj ili povremeno plavljenoj zoni u okolici izvora Omble detaljno speleološki istraženi. Postoje li, osim njih, u bližoj ili daljoj okolici još neotkriveni veliki krški oblici ne želi se u ovom radu spekulirati, ali na realnu mogućnost njihovog postojanja upućuje fotografija prikazana na slici 9 kao i neka istraživanja koja će biti iznesena u sljedećem poglavlju. Tijekom vremena u zavisnosti od brzog porasta nivoa podzemnih voda dolazi do naglih promjena površine sliva koje utječu na preraspodjelu vodnih resursa (Bonacci, 1987.; 2002.). Naglo povećanje hidrostatskog pritiska uzrokovano prirodnim procesima ili antropogenim zahvatima može uzrokovati izbijanje čepova gline iz postojećih neaktivnih krških provodnika, a time i preraspodjelu cirkulacije vode u krškom vodonosniku. Osim prirodnih procesa i brojne, uglavnom slabo kontrolirane ljudske djelatnosti, mogu uzrokovati neočekivane promjene cirkulacije vode unutar krških slivova.

U uvjetima dubokog i slabo izučenog Dinarskog krša taj zadatak je često vrlo teško, pa i nemoguće precizno i pouzdano riješiti. Upravo takav je slučaj određivanja granica i površine sliva krškog izvora Omble. Antropogeni utjecaji u slivu izvora Omble brojni su i snažni. Na promjenu površine sliva izvora Omble, a time i na smanjenje mogućnosti prihranjivanja njegovog vodonosnika, utjecalo je reguliranje i betoniranje korita Trebišnjice, o čemu je prethodno bilo govora.

Kako je već bilo prethodno spomenuto, Milanović (1996.) i Paviša (1998.) navode da površina sliva Omble iznosi oko 600 km². Pretpostavljene granice tog sliva ucrtane su na slici 1. Radi se o granicama sliva definiranim prvenstveno geološkim i topografskim analizama te dijelom na osnovi hidrogeoloških pretpostavki.



Slika 15 Prikaz odnosa srednjih godišnjih protoka izvora Omble, Q_{Ombla} ($m^3 s^{-1}$), i godišnjih oborina izmjerenih na klimatološkoj postaji Trebinje, $P_{Trebinje}$ (mm), u razdoblju 1961.-2009. (bez 1991.-1998.)

Na slici 15 prikazan je odnos srednjih godišnjih protoka izvora Omble, Q_{Ombla} ($m^3 s^{-1}$), i godišnjih oborina izmjerenih na klimatološkoj postaji Trebinje, $P_{Trebinje}$ (mm), u razdoblju 1961.-2012. (bez 1991.-1998.). Postaja Trebinje izabrana je kao reprezentativna klimatološka lokacija za sliv Omble. U spomenutom razdoblju godišnje su se oborine kretale u rasponu od 1236 mm do 2398 mm sa prosječnom vrijednosti od 1707 mm. Srednje godišnje temperature zraka su bile između 13,0 °C i 15,6 °C uz prosječnu temperaturu zraka od 14,3 °C. Bitno je uočiti da je vrijednost koeficijent linearne korelacije između srednjih godišnjih protoka Omble, Q_{Ombla} ($m^3 s^{-1}$), i godišnjih oborina izmjerenih na klimatološkoj postaji Trebinje, $P_{Trebinje}$ (mm) visoka. Ona iznosi 0,748, što jasno svjedoči o tome da oborine koje su uzete u proračun stvarno utječu na količine istjecanja iz analiziranog izvora. Treba uočiti da pravac regresije sječe os apscise u točki $P_0=87,2$ mm. S hidrološkog stanovišta to je neprihvatljivo jer bi značilo da istjecanja iz izvora Omble ima i kad su godišnje oborine Trebinja vrlo male, niže od 100 mm. Kao logično objašnjenje nameće se da je izvor Omble prihranjivan iz većeg sliva od onog koji je određen vrijednošću od 600 km².

Pri donošenju zaključaka o stvarnoj površini sliva izvora Omble zasnovanoj na korištenju oborina i temperatura mjenjenih na postaji Trebinje treba biti oprezan i stoga jer oborine pale na postaji Trebinje zasigurno nedovoljno dobro prezentiraju stvarne oborine pale na cijeli sliv (čije su granice osim toga i nedovoljno poznate). Isto se odnosi i na temperaturu zraka koja je na slivu vjerojatno niža od one mjerene na postaji Trebinje. Analize koje su prethodno izvršene imale su za cilj da ukažu na potrebu detaljnijih mjerenja sa svrhom pouzdanijeg i interdisciplinarnog određivanja granica i površine sliva izvora Omble. Uz to treba naglasiti da se površina sliva mijenja tijekom vremena u zavisnosti od razina podzemnih voda, ali vjerojatno i pod utjecajem brojnih i slabo kontroliranih antropogenih zahvata.

Koliko ona stvarno iznosi nije moguće pouzdano definirati na osnovi raspoloživih podataka. Međutim, moguće je barem približno odrediti njenu veličinu primjenom hidrološke metodologije metodom Turca (Turc, 1954.), koja je s uspjehom korištena kod određivanja slivova Zrmanje (Bonacci, 1999.), Krke i Krčića (Bonacci i Ljubenkov, 2005.; Bonacci et al., 2006.), Like i Gacke (Bonacci i Andrić, 2008.) i Dobre (Bonacci i Andrić, 2010.). Bitno je naglasiti da se svi slivovi spomenutih vodotoka nalaze u Dinarskom kršu. Da se ne bi nepotrebno opterećivao ovaj rad, navodi se da je postupak određivanja sliva prethodno spomenutom metodom detaljno objašnjen u radu Bonacci i Ljubenkov (2005.) objavljenom u ovom časopisu. Zainteresirane se upućuje da konzultiraju stranice 277 i 278.

Metodom Turca proračunato je da površina sliva izvora Omble u razdoblju 1961.-2009. (bez 1991.-1998.) iznosi prosječno 1060 km² uz godišnji koeficijent otjecanja od 0,46. Uz koeficijent otjecanja od 0,65 prosječna površina sliva određena po Turcu iznosi 850 km². U Dinarskom kršu prosječni godišnji koeficijenti otjecanja su znatno veći od

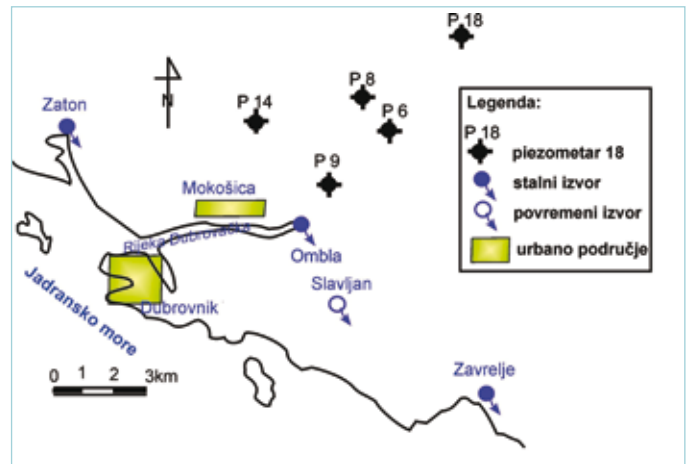
onih u nekrškim područjima te se kreće oko vrijednosti 0,5 i viših (Žugaj, 1995.; Bonacci, 2001.b).

Prethodno izračunatu vrijednost površine sliva Omble primjenom metode Turca potrebno je dodatno komentirati, tj. neophodno je na nju se kritički osvrnuti. Ona predstavlja samo grubu procjenu stvarnog stanja stvari. Za pouzdanije određivanje površine sliva izvora Omble bilo bi potrebno raspolagati s većim brojem klimatoloških postaja raspoređenih na raznim lokacijama i nadmorskim visinama unutar potencijalnog sliva. U tom bi slučaju trebalo primijeniti iterativni postupak odabira površine sliva vršenjem brojnih varijanti proračuna. Pošto se u ovom trenutku ne raspolaže s takvim podacima, na osnovi prethodno izvršenog proračuna se procjenjuje da se površina sliva Omble kreće u granicama između 850 km² i 1060 km². Bitno je naglasiti da je ona znatno veća (između 40 % i 80 %) od vrijednosti od 600 km² koja se spominje u literaturi (Milanović, 1996.; Paviša, 1998.) i s kojom se operira u postojećim hidrološkim i drugim analizama i aplikacijama. Osim toga, treba imati na umu da se površina sliva izvora Omble, kao uostalom i svih drugih krških izvora mijenja tijekom vremena u zavisnosti od nivoa podzemnih voda i ostvarenih veza između pojedinih dijelova složenog površinskog i podzemnog krškog sustava (Bonacci, 1987.; Krešić i Stevanović, 2010.).

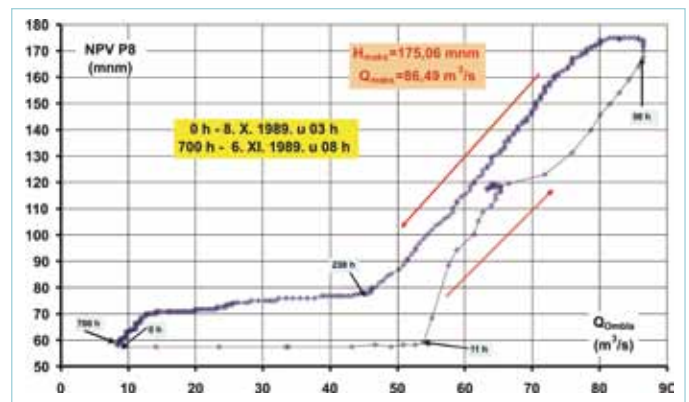
5. NIVOI PODZEMNIH VODA

Na slici 16 prikazana je situacija užeg područja sliva oko izvora Omble na kojoj su ucrtani položaji pet dubokih piezometara, dubljih od 200 m (P6, P8, P9, P14 i P18) čiji će podatci nastavno biti detaljnije analizirani. Osim njih ucrtani su i položaji stalnih krških izvora Omble, Zaton (Palate) i Zavrelja te povremenog izvora Slavljan. Raspolaže se s kontinuiranim mjerenjima u vremenskim inkrementima od jedan sat izvršenim tijekom 1988. i 1989. godine. Za potrebe istražnih radova za projektiranja hidroelektrane Ombla bilo je izbušeno 22 piezometra na kojima su bila organizirana mjerenja nivoa podzemne vode. U objavljenim radovima Bonacci (1995.), Bonacci i Roje-Bonacci (2006.a; 2006.b) te Roje-Bonacci i Bonacci (2013.) stručnoj javnosti su prezentirane brojne analize ovih podataka. U ovom će radu biti izneseni prema mišljenju autora bitni rezultati koji do sada nisu bili objavljeni na hrvatskom jeziku. U tablici 1 navedene su karakteristične vrijednosti nivoa podzemnih voda izmjerene u pet analiziranih piezometara u razdoblju od dvije godine mjerenja (1988.–1989.). Gotovo da i ne treba napomenuti da se očekuje da bi se u dužem razdoblju mjerenja mogli opaziti i veći ekstremi. To se posebno odnosi na maksimalne nivoe.

Na slici 17 grafički je prikazan odnos istovremenih satnih protoka izvora Ombla, Q (m³ s⁻¹), i nivoa podzemne vode, NPV P8 (m n.m.), izmjerenih u piezometru 8 u razdoblju od 8. X. 1989. u 03 h do 6. XI. 1989. u 08 h opaženih tijekom pojave velikih voda uzrokovanih intenzivnom kratkotrajnom oborinom. Ključno je uočiti da nivoi podzemne vode u



Slika 16 Situacija analiziranog područja s ucrtanim položajima pet piezometara te nekim stalnim i povremenim krškim izvorima



Slika 17 Prikaz odnosa istovremenih satnih protoka izvora Ombla, Q (m³ s⁻¹), i nivoa podzemne vode, NPV P8 (m n.m.), izmjerenih u piezometru 8 u razdoblju od 8. X. 1989. u 03 h do 6. XI. 1989. u 08 h, opaženih tijekom pojave velikih voda uzrokovanih intenzivnim oborinama (slika je modificirana iz literature Bonacci, 1995.)

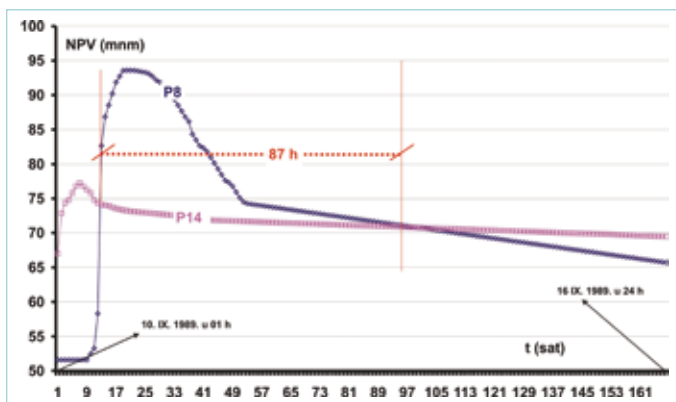
piezometru P8 u vremenskom razdoblju od 0 h do 11 h stagniraju, dok protoci izvora Omble rastu od 9,23 m³ s⁻¹ do 54,9 m³ s⁻¹. Ovaj se fenomen može objasniti činjenicom da se tijekom tih 11 sati vršilo punjenje velikih krških provodnika brzim turbulentnim tečenjem, dok matrica krškog vodonosnika koja se puni sporim difuznim i pretežno laminarnim tečenjem još nije reagirala na intenzivne oborine pale na slivu. Zbog toga nije došlo do podizanja nivoa podzemne vode u piezometru P8. Volumen vode istekle u ovih 11 sati kroz otvor izvora Omble iznosi oko 1,5 × 10⁶ m³ vode. Ako su prethodne pretpostavke točne, moglo bi se zaključiti da spomenuta vrijednost predstavlja zapreminu velikih krških provodnika u okolici izvora. Osim toga, potrebno je ukazati

Tablica 1 Karakteristične vrijednosti nivoa podzemnih voda izmjerene u pet piezometara

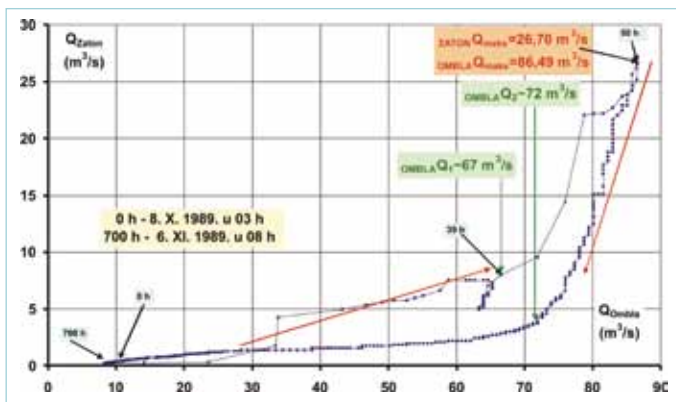
Piezometar broj	NPV (m n.m.)		Raspon (m)	i_{maks} (m h ⁻¹)	
	Min.	Maks.		porast	opadanje
6	67,30	186,35	119,05	17,50	-6,00
8	50,74	187,30	136,56	30,00	-10,30
9	7,48	125,80	118,32	17,20	-5,88
14	65,57	154,63	89,06	48,18	-4,38
18	95,62	194,90	99,28	21,90	-4,38

na formiranje petlje u odnosu istovremenih satnih protoka izvora Ombla, Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), i nivoa podzemne vode, NPV P8 (m n.m.). Tijekom porasta nivoa podzemnih voda protok iz izvora je znatno veći nego tijekom opadanja, za oko $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ do $15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, što se može objasniti nestacionarnošću tečenja u podzemlju krša. Maksimalni protok javlja se u pedesetom satu te iznosi $86,49 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Poslije njegove pojave nastavlja se porast nivoa podzemne vode do kote 175,06 m n.m. i nekoliko sati stagniranja protoka. Potom razina podzemne vode stagnira nekoliko sati, ali se javlja opadanje protoka izvora. Oblik krivulje od 11 h do 250 h tipičan je za tečenje pod tlakom. Zaključujući prema obliku odnosa Q ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) - NPV P8 (m n.m.) u 231. satu započinje pa sve do kraja analize traje tečenje sa slobodnim vodnim licem. Ako je ta pretpostavka točna, to bi značilo da se na nivou od oko 75 m n.m. u blizini piezometra P8 javlja prostrani krški provodnik koji je spojen s izvorom Omble (Hajdin i Ivetić, 1978.).

Primjer brze i neočekivane promjene razina podzemnih voda u prostoru zaleđa izvora Omble grafički je prikazan na slici 18. Na slici su ucrtana dva nivograma satnih vrijednosti nivoa podzemnih voda izmjerenih u piezometrima P8, (NPV P8 (m n.m.)), i P14, (NPV P14 (m n.m.)), u razdoblju od 10. IX. 1989. u 01 h do 16. IX. 1989. u 24 h opažena tijekom pojave



Slika 18 Grafički prikaz dva nivograma satnih vrijednosti nivoa podzemnih voda izmjerenih u piezometrima P8, (NPV P8 (m n.m.)), i P14, (NPV P14 (m n.m.)), u razdoblju od 10. IX. 1989. u 01 h do 16. IX. 1989. u 24 h opaženih tijekom pojave velikih voda uzrokovanih intenzivnim oborinama



Slika 19 Prikaz odnosa istovremenih satnih protoka izvora Ombla, (Q_{Ombla} ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)), i Zaton (Q_{Zaton} ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)), tijekom pojave velikih voda uzrokovanih intenzivnim oborinama (slika je modificirana iz literature Bonacci, 1995.)

velikih voda uzrokovanih intenzivnim oborinama. Ovaj prikaz služi kao dokaz da se tijekom vremena u zavisnosti od naglih promjena nivoa vode mijenjaju položaji granice sliva Omble prema susjednim slivovima. Dva analizirana piezometra međusobno su udaljena nešto više od 3 km zračnom linijom. Nivo podzemne vode u piezometru P14 dulje od 95% vremena godišnje viši je od nivoa podzemne vode u piezometru P8, što znači da voda iz piezometra P14 teče prema izvoru Omble. Međutim, kao posljedica obilnih intenzivnih oborina nivo se vode u piezometru P14 kratkotrajno digne čak i više od 20 m iznad nivoa vode u piezometru P8. U tom trenutku dolazi do obratnog smjera tečenja podzemnih voda. Dolazi do prelijevanja vode iz sliva izvora Omble u susjedne slivove u konkretnom slučaju u sliv izvora Zaton.

Jedan primjer prelijevanja voda iz sliva Omble u sliv susjednog izvora Zaton prikazan je na slici 19. Na njoj je prikazan odnos istovremenih satnih protoka izvora Ombla, (Q_{Ombla} ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)), i Zaton (Q_{Zaton} ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)), tijekom pojave velikih voda uzrokovanih intenzivnim oborinama. Protok izvora Zaton naglo poraste kad protok izvora Omble prijeđe vrijednost između $60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ i $70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Prije toga izvor Zaton doseže maksimalni protok od oko $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ do $6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Čini se da je to maksimalni iznos kojim ovaj izvor može biti prihranjen iz vlastitog sliva. Protoci viši od spomenute vrijednosti u izvor Zaton dolaze prelijevanjem iz sliva izvora Omble. Dokaz o promjenama smjera tečenja podzemne vode uzrokovanih obilnim oborinama iznesen je na slici 18. Bonacci (2004.) je pokazao da prelijevanje podzemne vode iz sliva izvora Omble u sliv izvora Zaton započinje kad nivoi podzemne vode dosegnu: 1) 75 m n.m. u piezometru P9; 2) 135 m n.m. u piezometru P6; 3) 165 m n.m. u piezometru P18. Na slici 19 moguće je, također, uočiti formiranje petlje pri porastu i opadanju protoka. Razlog je isti kao i u slučaju prikazanom na slici 17.

6. ZAKLJUČCI I SMJERNICE ZA BUDUĆA ISTRAŽIVANJA

U prethodnom dijelu ovog rada iznesena su brojna saznanja vezana s vodnim resursima izvora Omble. Bilo bi netočno tvrditi da su u njemu obuhvaćene sve postojeće podloge i navedena sva izvršena istraživanja, ali autori vjeruju da su korištena i navedena ona bitna za ukazivanje na složenost procesa koji se zbivaju u analiziranom prostoru. Cilj je rada da se pomogne boljem razumijevanju složenih procesa koji se događaju u ovom ključnom i ekstremno vrijednom vodnom i ekološkom sustavu. Mora se ustvrditi da je izvor Omble nedovoljno istražen ili u najmanju ruku da postoje brojne mogućnosti i potrebe da ga se bolje i detaljnije istraži. To je moguće učiniti korištenjem novih tehnologija koje danas stoje na raspolaganju, koje nisu skupe, a čijom se upotrebom može relativno brzo doći do važnih odgovora na ključna pitanja. Vrijednost izvora Omble, kao i vrijednost cijelog sliva nije samo u činjenici bogatih vodnih resursa, već mnogo više u neprocjenjivom, vrlo ranjivom i slabo istraženom površinskom, a osobito podzemnom ekosustavu

(Bonacci et al., 2009.). Ozbiljan problem za žurno rješavanje učinkovitijeg upravljanja vodnim resursima izvora Omble predstavlja činjenica da se sam izvor i vrlo mali dio sliva nalazi u jednoj državi, a pretežni dio sliva u drugoj.

Jedan od bitnih zadataka, koji vezano s održivim upravljanjem vodnim resursima mora biti žurno riješen, je određivanje granica i površina sliva izvora Omble. Za ispunjavanje tog, u ovom slučaju ekstremno složenog, ali i jednako toliko važnog zadatka, bit će potrebna suradnja brojnih stručnjaka kao što su geolozi, hidrogeolozi, hidrolozi, geokemičari, klimatolozi, biolozi itd. Današnja tehnologija omogućava kontinuirano praćenje ne samo temperature vode, već i brojnih drugih njenih fizičkih i

kemijskih svojstava, a prije svega mutnosti, električne provodljivosti, pH, brojnih kemijskih karakteristika itd. Na osnovi tako prikupljenih podataka u kombinaciji s drugim hidrogeološkim (nivoi podzemne vode prije svega) i meteorološkim parametrima (temperatura zraka, oborine) sliva bilo bi moguće doći do brojnih važnih zaključaka pa čak i do saznanja o stvarnoj površini sliva izvora Omble. U slučaju izučavanog izvora se ne raspolaže sa sustavnim, istovremenim i kontinuiranim mjerenjima (u vremenskim inkrementima od najdulje 1 sat) spomenutih parametara. Tu bi situaciju trebalo žurno ispraviti, posebno zbog toga jer već postoje izbušeni piezometri, a mjerni uređaji danas više nisu skupi. Potrebna je samo dobra volja odgovornih. ■

LITERATURA

- Bonacci, O. (1987.): *Karst hydrology with special reference to Dinaric karst*. Springer Verlag, Berlin.
- Bonacci, O. (1995.): Ground water behaviour in karst: example of the Ombla Spring (Croatia). *Journal of Hydrology*, 165, 113-134.
- Bonacci, O. (1999.): Water circulation in karst and determination of catchment areas: example of the River Zrmanja. *Hydrological Sciences Journal*, 44(3), 373-386.
- Bonacci, O. (2001.a): Analysis of the maximum discharge of karst springs. *Hydrogeology Journal*, 9, 328-338.
- Bonacci, O. (2001.b): Monthly and annual effective infiltration coefficients in Dinaric karst: example of the Gradole karst spring catchment. *Hydrological Sciences Journal*, 46(2), 287-299.
- Bonacci, O. (2002.): Development of catchment area in karst as a result of natural and anthropological factors. U: *Evolution of karst: from prekarst to cessation*, (ur. F. Gabrovšek), Inštitut za Raziskovanje Krasa, Postojna, 359-365.
- Bonacci, O. (2004.): Hazards caused by natural and anthropogenic changes of catchment area in karst. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, 655-661.
- Bonacci, O., 2010.: Analiza nizova srednjih godišnjih temperature zraka u Hrvatskoj. *Grđevinar* 62(9), 781-791.
- Bonacci, O. (2012.): Increase of mean annual surface air temperature in the Western Balkans during last 30 years. *Vodoprivreda*, 44(255-257), 75-89.
- Bonacci, O, Andrić, I. (2008.): Sinking karst rivers hydrology: case of the Lika and Gacka (Croatia). *Acta Carsologica* 37(2-3), 185-196.
- Bonacci, O, Andrić, I. (2010.): Impact of an inter-basin water transfer and reservoir operation on a karst open streamflow hydrological regime: an example from the Dinaric karst (Croatia). *Hydrological Processes*, 24(26), 3852-3863.
- Bonacci, O., Jukić, D., Ljubenković, I. (2006.): Definition of catchment area in karst: case of the rivers Krčić and Krka, Croatia. *Hydrological Sciences Journal*, 51(4), 682-699.
- Bonacci, O., Ljubenković, I. (2005.): Nove spoznaje o hidrologiji rijeke Krke. *Hrvatske vode* 13(52), 265-281.
- Bonacci, O., Oskoruš, D. (2010.): The changes in the lower Drava River water level, discharge and suspended sediment regime. *Environmental Earth Sciences*, 59(8), 1661-1670.
- Bonacci, O., Pipan, T., Culver D. C. (2009.): A framework for karst ecohydrology, *Environmental Geology*, 56, 891-900.
- Bonacci, O., Roje-Bonacci, T. (2000.a): Posebnosti krških vodonosnika. *Hrvatske vode*, 8(30), 25-41.
- Bonacci, O., Roje-Bonacci, T. (2000.b): Interpretation of groundwater level monitoring results in karst aquifer: examples from the Dinaric karst. *Hydrological Processes*, 14, 2423-2438.
- Bonacci, O., Trninić, D., Roje-Bonacci, T. (2008.): Analysis of the water temperature regime of the Danube and its tributaries in Croatia. *Hydrological Processes*, 22(7), 1014-1021.
- Buljan, R., Prelogović, E., Paviša, T. (2000.): Izvorište Ombla. *Zbornik radova 2. Hrvatskog geološkog kongresa*, 555-560.
- Denić-Jukić, V., Juras, T., Plenković, M., Kadić, A., Jukić, D. (2012.): Turbidity dynamics of the karst spring Ombla (Croatia). *Geophysical Research Abstracts* EGU2012-12428.
- Garbrecht, J., Fernandez, G.P. (1994.): Visualization of trends and fluctuations in climatic records. *Water Resources Bulletin*, 30(2), 297-306.
- Hajdin, G., Ivetić, M. (1978.): Jedan primjer pokušaja objašnjavanja uvjeta u krškom podzemnom toku na osnovu pijezometrijskih stanja i izlaznih proticaja. *Naš Krš*, 4(4), 27-32.
- Institut za korištenje i zaštitu voda u kršu, Trebinje (1988.): Hidrološka obrada – utvrđivanje parametara režima vrela Omble. (neobjavljeni elaborat)
- Jović, V. (2003.): Numerical model of flows in the underground storage reservoir of the Ombla HE plant – natural state and the state planned by the project. *HYDRO 2003 Conference Proceedings*, 1, 483-498.
- Krešić, N., Stevanović, Z. (ur.) (2010.): *Groundwater hydrology of springs – engineering, theory, management, and sustainability*. Elsevier, Amsterdam.
- Milanović, P. (1981.): *Karst hydrogeology*. Water Resources Publication, Littleton.
- Milanović, P. (1996.): Ombla Spring, Croatia. *Environmental Geology*, 27, 105-107.
- Milanović, P. (2000.): *Geological engineering in karst*. Zebra Pbl. Co., Beograd.
- Paviša, T. (1998.): Podzemna akumulacija u krškom terenu. *Hrvatska vodoprivreda*, 7, 14-25.
- Paviša, T. (2003.): HPP Ombla in Croatia – proposed use energy from groundwater in karst aquifer. *HYDRO 2003 Conference Proceedings*, 1, 463-470.

- Ravnik, D., Rajver, D. (1998.): The use of inverse geotherms for determining underground water flow at the Ombla karst spring near Dubrovnik, Croatia. *Journal of Applied Geophysics*, 3, 177-190.
- Roje-Bonacci T, Bonacci O. (2013.): The possible negative consequences of underground dam and reservoir construction and operation in coastal karst areas: an example of the hydroelectric power plant (HEPP) Ombla near Dubrovnik (Croatia). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 2041-2052.
- Sever, Z. (2003.): The Ombla HPP multipurpose project. *HYDRO 2003 conference proceedings*, 1, 455-462.
- Šegota, T. (1968.): Morska razina u halocenu i mlađem würmu. *Geografski Glasnik*, 30, 15-39.
- Turc, L. (1954.): Le bilan d'eau et des sols. *Troisième journée de l'hydraulique*, Alger, 36-43.
- Žugaj, R. (1995.): *Regionalna hidrološka analiza u kršu Hrvatske*. Hrvatsko Hidrološko Društvo, Zagreb.
- Žugaj, R., Andreić, Ž. (2011.): Utjecaj klimatskih promjena na protok Omble. *Zbornik radova 5. Hrvatske konferencije o vodama*, 249-257.
- Žugaj, R., Bonacci, O. (1994.): HE Ombla hidrološka obrada. Elektroprojekt, Zagreb (neobjavljeni elaborat).

WATER RESOURCE ANALYSIS OF THE OMBLA SPRING

Abstract. The paper carries out a complex water resource behaviour analysis of the Ombla karst spring. The Ombla is a typical coastal karst spring. It is located in the vicinity of the town Dubrovnik, and reliably supplies it with good quality drinking water. It appears on the surface at the altitude of 2.5 m asl, so its water almost immediately flows into the Adriatic Sea. Its minimum discharge is estimated at $4.30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, and its maximum at $117 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Considering the size of its recharge area and the abundant, intense precipitation which appears in it and also due to its karst character, it has been concluded that this is a spring with a limited maximum discharge capacity. With regard to its minimum discharges, it can be concluded that it is recharged from a stable, large karst aquifer. Its medium discharge in the natural state in the observation period from 1968 to 1980 equalled $28.01 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. From 1981 to 2012 (with the exception of the 1991-1992 period), i.e. in the period when the river bed of the Trebišnjica River, which flows through its catchment area, was regulated and turned into a concrete canal in the length of over 60 km, its medium discharge was reduced by $4.29 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, to the value of $23.71 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. The paper presents the most recent hydrological analyses of water discharges and temperatures. A special attention was paid to the definition of the spring's catchment area. In the literature, this surface is estimated at about 600 km^2 , which is determined mostly through regional geological analyses. Due to a lack of reliable data, this paper could not determine the catchment area with certainty either, and even less reliably its boundaries. However, by application of a hydrological method, it was estimated that the catchment area is probably much larger, ranging between 850 km^2 and 1100 km^2 . The behaviour of groundwater levels, measured in several deep piezometers drilled in its hinterland, was also analyzed. It was proven that the watershed between the Ombla spring catchment and the neighbouring catchment of the Zavrelje spring suddenly changes as a result of intense precipitation, and that waters from the aquifer of the Ombla spring occasionally spill over to the neighbouring springs.

Key words: karst hydrology, karst spring, discharge, Ombla spring

ANALYSE VON WASSERRESOURCEN IN DER OMBLAQUELLE

Zusammenfassung. Im Artikel wird das Benehmen der Wasserressourcen in der Karstquelle des Flusses Ombla analysiert. Die Omblaquelle, eine typische Karstquelle an der Küste, befindet sich in der Nähe der Stadt Dubrovnik, wofür sie Trinkwasser zuverlässig liefert. Das Wasser tritt aus der Erde auf 2,5 m ü. M., und der Fluss mündet praktisch gleich nach dem Überlauf in die Adria. Minimaler Abfluss wird auf $4,30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ und maximaler auf $117 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ geschätzt. Auf Grund der Größe des Flussverlaufs, ergiebiger und intensiver Niederschläge sowie der Karsteigenschaften der Quelle konnte geschlossen werden, dass das eine Quelle mit beschränkter maximaler Schüttung ist. Die minimalen Abflüsse zeigen, dass sich die Quelle aus dem stabilen und großen Karstgrundwasserleiter speist. Der mittlere Abfluss im natürlichen Zustand im Beobachtungszeitraum 1968-1980 betrug $28,01 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Zwischen 1981 und 2012 (ausgenommen 1991-1992), also im Zeitraum als das Flussbett der durch das Einzugsgebiet der Quelle durchfließende Trebišnjica reguliert und über 60 km kanalisiert wurde, verringerte sich der mittlere Jahresabfluss um $4,29 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ auf den Wert von $23,71 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. In der Arbeit werden die letzten hydrologischen Analysen des Abflusses und der Wassertemperatur dargestellt. Besondere Aufmerksamkeit wurde der Definition der Fläche des Einzugsgebietes dieser Quelle gewidmet. In der Literatur ist die Fläche, ermittelt durch überwiegend geologische Analysen, auf ungefähr 600 km^2 geschätzt worden. Wegen des Nichtvorhandenseins zuverlässiger Daten konnte die Fläche des Einzugsgebietes auch hier nicht zuverlässig bestimmt werden, noch nicht einmal seine Grenzen. In Anlehnung an die hydrologische Methode konnte allerdings geschätzt werden, dass die Fläche des Einzugsgebietes wahrscheinlich viel größer ist und zwar zwischen 850 km^2 und 1100 km^2 beträgt. Die Bewegungen des Grundwasserspiegels wurden auch mit Hilfe von einigen tief im Hinterland eingebauten Pegelrohren analysiert. Es konnte bestätigt werden, dass sich die Wasserscheidelinie zwischen dem Einzugsgebiet der Omblaquelle und dem benachbarten Einzugsgebiet der Quelle von Zavrelje im Laufe der Zeit als Folge der intensiven Niederschläge rasch ändert, und dass die Gewässer aus dem Grundwasserleiter der Omblaquelle ab und zu in die benachbarten Quellen überlaufen.

Schlüsselwörter: Karsthydrologie, Karstquelle, Abfluss, Ombla