

ANALIZA ODNOSA RAZINA PODZEMNE VODE I VODOSTAJA VRANSKOG JEZERA NA OTOKU CRESU

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

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

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

Fakultet građevinarstva, arhitekture i
geodezije, Sveučilište u Splitu
21000 Split, Matice hrvatske 15

U radu je analizirano ponašanje dnevnih razina podzemne vode mjerenih u tri duboka piezometra locirana u slivu Vranskog jezera na otoku Cresu. Obuhvaćeno je razdoblje od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000., dakle ukupno 1209 dana. Ponašanje razina u sva tri piezometra bilo je gotovo identično, jer su se vrijednosti kvadrata koeficijenta linearne korelacije između parova piezometara kretale između $R^2=0,955$ i $R^2=0,998$. Izračunati su i dnevni dotoci, kao i gubici iz jezera. Maksimalni srednji dnevni dotok u jezero u analiziranom razdoblju iznosio je $Q=8,9 \text{ m}^3/\text{s}$, dok je maksimalni srednji dnevni gubitak iz jezera iznosio $Q=-1,9 \text{ m}^3/\text{s}$. Analizirane su razlike između istovremeno mjerenih razina podzemne vode u svakom pojedinom piezometru i vodostaja jezera. Utvrđeno je da je na piezometru B1, udaljenom 335 m od obale jezera, razina podzemne vode samo 56 dana (4,6 % analiziranog vremena) bila viša ili jednaka vodostaju jezera. Na piezometru B2, udaljenom 540 m od obale jezera, razina podzemne vode bila je 262 dana (21,7 % analiziranog vremena) viša ili jednaka vodostaju jezera, dok je na najudaljenijem piezometru B3, izbušenom 790 m od obale jezera, razina podzemne vode bila viša ili jednaka vodostaju jezera 89,1 % analiziranog vremena. Ovakav odnos je neočekivan i teško ga je objasniti ili korigirati bez dodatnih mjerenja, a što je nužno s obzirom da postoji sumnja u realnost izmjerenih razina podzemnih voda. Činjenica da Vransko jezero na Cresu predstavlja u svijetu jedinstvenu vodnu masu formiranu na krškom otoku zahtijeva da se procesi koji se u i oko njega zbivaju pouzdano rasvijetle, što predstavlja osnovni cilj ovog rada.

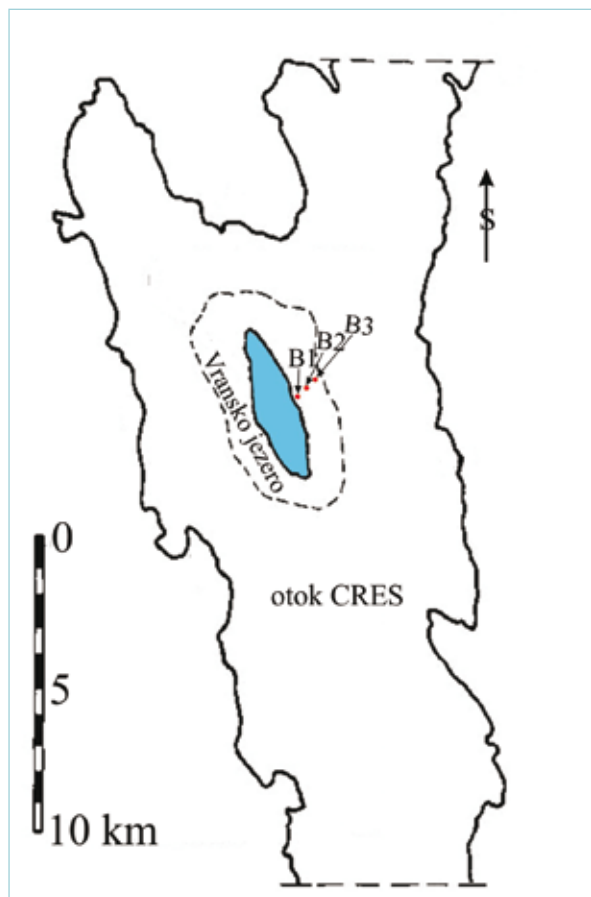
Ključne riječi: vodostaj jezera, dotok vode u jezero, razina podzemne vode, Vransko jezero, otok Cres, Hrvatska

1. UVOD

O Vranskom jezeru na otoku Cresu, krškom vodnom fenomenu svjetskog značaja, napisan je relativno velik broj radova, od kojih je glavnina navedena u članku objavljenom u časopisu Hrvatske vode 2014. godine (Bonacci, 2014.). Stoga ih se u ovom radu neće

spominjati niti navoditi u popisu literature. Razlog je i u tome što će cijeli rad biti posvećen isključivo analizi ponašanja razina podzemne vode mjerenih u tri duboka piezometra izbušena na istočnoj obali Vranskog jezera.

Na slici 1 nalazi se situacija otoka Cresa s ucrtanim položajem Vranskog jezera i tri duboka piezometra označena u daljnjem tekstu i na slikama kao B1, B2 i B3. Piezometre su izbušili stručnjaci Instituta za geološka istraživanja iz Zagreba. Kuhta (2002.) navodi sljedeće: „Kontinuirana opažanja razine podzemnih voda, njihove temperature i elektrolitičke vodljivosti započele su sredinom 1995. god. na piezometru B1 i na mjernom profilu VJ-2 u samom jezeru, približno 150 m ispred crpne stanice. Koncem godine u opažačku mrežu uključen je novo izvedeni piezometar B2. Početkom 1996. godine u stalnu opažačku mrežu uključen je mjerni profil VJ-1 lociran u depresiji na jugozapadnom dijelu jezera. U drugoj polovici 1997., neposredno po njegovom izvođenju, opažanja su započela i na piezometru B3.“ Kuhta (2002.) dalje navodi sljedeće: „Opažanja razine podzemnih voda na piezometarskim bušotinama do konca 1997. također su izvođena svakodnevno, a kasnije, do studenog 2002. godine, izvode se svaka tri dana. Mjerenja u tako dubokim bušotinama (200 i 300 m) mogu biti opterećena određenim pogreškama u odnosu na apsolutne vrijednosti razina i to prvenstveno zbog različitog istezanja kabela mjerača ili otklona bušotina od vertikale. Ipak, bez obzira na navedene probleme, velik broj sustavno prikupljenih podataka pruža dobru osnovu



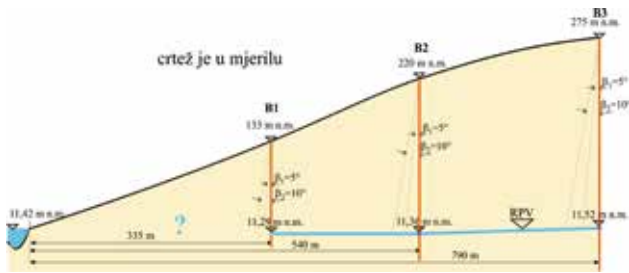
Slika 1: Situacija otoka Cresa s ucrtanim položajem Vranskog jezera, pretpostavljenom vododjelnicom njegovog sliva i lokacijama tri duboka piezometra (B1, B2, B3)

za analizu odnosa podzemnih voda istočnog boka i vode samog Vranskog jezera.“ Kuhta (2002) zaključuje da su centimetarske razlike u razinama manje od vjerojatnih pogrešaka prilikom određivanja apsolutne visine razine vode u dubokim bušotinama, te da su razine u svim piezometrima u stvarnosti vjerojatno iznad razine vode u jezeru, odnosno jezero se prihranjuje iz krškog podzemlja. Kuhta (2004.) te Kuhta i Brkić (2013.) su publicirali određene analize razina podzemnih voda mjerenih u tri piezometra (B1, B2, B3) i njihovog odnosa s vodostajima Vranskog jezera.

Autori se zahvaljuju kolegi Kuhti koji im je ljubazno ustupio rezultate mjerenja dnevnih razina podzemne vode, vodostaja jezera i oborina u razdoblju od 21. kolovoza 1995. do 31. prosinca 2000. U ovom radu opisane su analize izvršene s dnevnim razinama vode izmjerenim u piezometrima i na Vranskom jezeru u razdoblju od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000. Ovo je razdoblje trajanja 1209 dana izabrano stoga jer su tada postojala mjerenja na sva tri piezometra, što prije toga nije bio slučaj.

Osnovni cilj, ali i novina ovog rada se nalazi u činjenici da su postojeća mjerenja razine podzemne vode omogućila izučavanje ne samo ponašanja podzemnih voda u dijelu krškog vodonosnika Vranskog jezera, već i analize odnosa vodostaja jezera i razina podzemnih voda. Na slici 2, izrađenoj u mjerilu, nalazi se presjek kroz tri piezometra s ucrtanim prosječnim vodostajem jezera i razina podzemne vode u razdoblju od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000. Prosječni vodostaj Vranskog jezera u razmatranom razdoblju iznosio je 11,42 m n.m. On je bio viši za 13 cm od prosječne razine podzemne vode izmjerene u najbližem piezometru B1, udaljenom 335 m od obale jezera i 6 cm od razine podzemne vode izmjerene u piezometru B2 udaljenom od obale 540 m. Tek u piezometru B3 udaljenom 740 m od obale prosječna razina podzemne vode bila je viša od prosječnog vodostaja jezera za 10 cm. Treba imati na umu da postojeća baterija piezometara kontrolira jedan mali dio vodonosnika jezera koji se nalazi na istočnoj strani. Provedene analize i zaključci temelje se na korištenim podatcima onakvim kako su zabilježeni, dakle i s mogućom greškom. Stoga se dana obrada i interpretacija može smatrati jednom od mogućih hipoteza. Ovi rezultati ukazuju na neophodnost žurne provjere točnosti kota apsolutnih razine vode u piezometrima. Naglašava se da su određene analize upravo s ovim podatcima bile javno publicirane (Kuhta, 2004.; Kuhta i Brkić, 2013.), što imperativno nameće neophodnost da se sve dileme s njihovom točnošću moraju razjasniti. To predstavlja ključni i neizbježni postupak koji će osigurati dugoročnu zaštitu i održivo upravljanje ovim fasciniranim i prevrijednim krškim vodnim fenomenom. Cilj rada je da se potaknu istraživanja koja će dati žurne odgovore na to jesu li i koliko mjerenja razina podzemne vode u tri piezometra vršena u razdoblju od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000. točna. Mjerenja se mogu smatrati točnima u pogledu značajki dinamike razine, ali

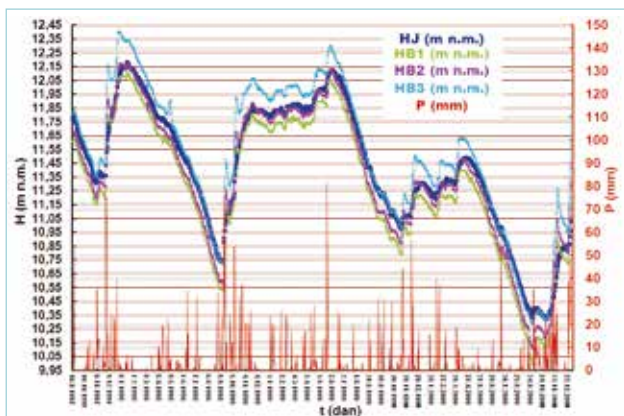
za određivanje apsolutne visine razine vode u njima uz centimetarsku točnost potrebno je vrlo precizno izmjeriti prosječnu inklinaciju bušotina, te provjeriti točnost geodetski određenih visina ušća bušotine.



Slika 2: Presjek na lokaciji tri piezometra s ucrtanim prosječnim razinama vodostaja jezera i podzemne vode u razdoblju od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000. Slika je u mjerilu

2. ANALIZA VODOSTAJA TE DOTOKA I GUBITAKA IZ JEZERA

Kota nule jezera iznosi 8.76 m n.m. U razdoblju od 1209 dana, koje je analizirano u ovom članku, izmjeren je minimalni vodostaj jezera od 10,32 m n.m., prosječni vodostaj od 10,42 m n.m. i maksimalni vodostaj od 12,18 m n.m. Na slici 3 ucrtani su nizovi dnevnih vodostaja jezera, H_J , dnevnih razina podzemne vode mjerene u tri piezometra, (B1, B2, B3), i dnevnih oborina, P , izmjerenih u razdoblju od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000. Uočljivo je reagiranje vodostaja na oborine; kao i sezonski karakter varijacija vodostaja jezera.



Slika 3: Nizovi dnevnih vodostaja jezera, H_J , i dnevnih razina podzemne vode mjerene u tri piezometra, (B1, B2, B3), i dnevnih oborina, P , izmjerenih u razdoblju od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000. (ukupno 1209 dana)

Primjenom metode bilance izračunate su vrijednosti dnevnih dotoka i gubitaka iz jezera, Q . Korišten je sljedeći izraz odnosa volumena jezera, V , izraženog u m^3 , i vodostaja jezera, H , izraženog u m n.m., definiran za raspon vodostaja od 7,5 m n.m. do 12,5 m n.m. (Bonacci, 2017.):

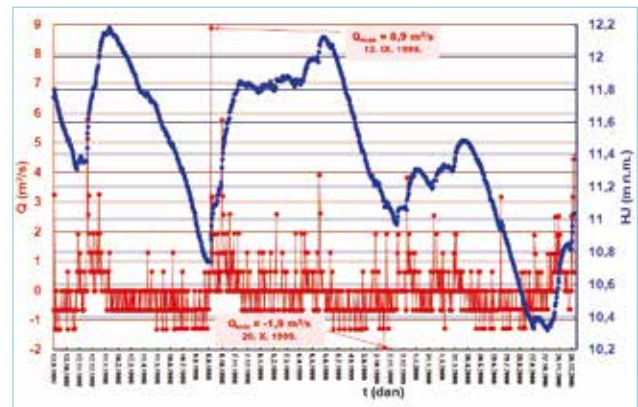
$$V = 61.896 \times H^2 + 4.146.900 \times H + 154.540.000 \quad (1)$$

Vrijednosti srednjih dnevnih dotoka i gubitaka iz jezera, Q , izraženih u m^3/s izračunate su izrazom:

$$Q = (V_t - V_{t-1}) / \Delta t \quad (2)$$

pri čemu je, V_t zapremina vode u jezeru u m^3 pri vodostaju, H_t , izmjenom na dan, t , zapremina vode u jezeru u m^3 , V_{t-1} pri vodostaju, H_{t-1} , izmjerena je prethodnog dana, $t-1$, dok, Δt , predstavlja vremenski inkrement za koji je vršeno definiranje dotoka i gubitaka iz jezera, a koji u ovom slučaju iznosi 86.400 s.

Grafički prikaz dnevnih dotoka i gubitaka, Q , izraženih u m^3/s , kao i dnevnih oborina, P , iskazanih u mm, nalazi se na slici 4. Maksimalni srednji dnevni dotok u jezero u analiziranom razdoblju iznosio je $Q=8,9 m^3/s$. Opažen je dana 12. rujna 1998., a bio je izazvan oborinama od 75,8 mm. Vodostaj jezera porastao je za 14 cm od 10,74 m n.m. prethodnog dana na 10,88 m n.m. sljedećeg dana 12. rujna 1998.

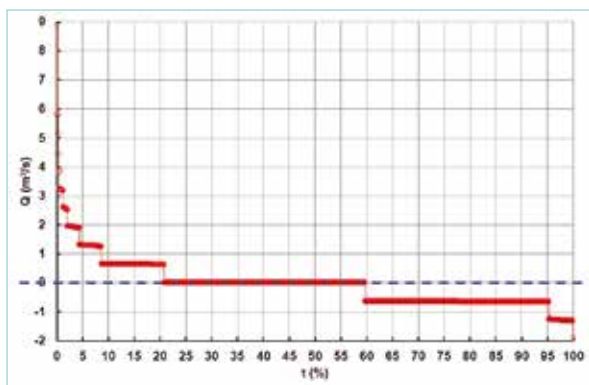


Slika 4: Nizovi dnevnih vodostaja jezera, H_J , i dnevnih dotoka ili gubitaka iz jezera, Q , u razdoblju od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000. (ukupno 1209 dana)

Maksimalni srednji dnevni gubitak iz jezera iznosio je $Q=-1,9 m^3/s$. Opaženo je dana 20. listopada 1999. Uzrokovano je dugotrajnim sušnim razdobljem koje je trajalo od kraja svibnja 1999. do sredine studenog iste godine. Ovdje je važno istaći da je opadanje vodostaja jezera proces složen od gubitaka vode iz jezera nepoznatim podzemnim krškim putovima i isparavanja vode s površine jezera.

Pri interpretaciji rezultata dotoka i gubitaka valja uzeti u obzir činjenicu da se radi o golemoj vodenoj površini, veličine od oko 5,5 km^2 , u kojoj razlika od samo jednog centimetra unosi značajnu razliku.

Na slici 5 ucrtana je krivulja trajanja dnevnih dotoka ili gubitaka iz jezera, Q , izraženih u m^3/s za razdoblje od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000. Tijekom razdoblja obuhvaćenog analizama, 20,9 % vremena jezero je imalo pozitivan dotok, tj. vodostaj je bio u porastu. Tijekom 38,7 % analiziranog razdoblja vodostaj jezera se nije mijenjao, dok je tijekom 40,4 % vremena vodostaj bio u opadanju.

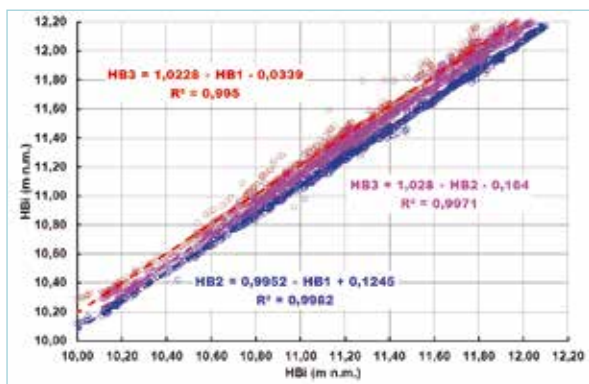


Slika 5: Krivulja trajanja dnevnih dotoka ili gubitaka iz jezera, Q, za razdoblje od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000. (ukupno 1209 dana)

3. ANALIZA RAZINA PODZEMNE VODE

Razina podzemne vode ili hidraulička visina jedna je od najvažnijih informacija u hidrologiji i hidrogeologiji, zbog toga jer je preko nje moguće interpretirati tečenje podzemne vode, kvantificirati svojstva vodonosnika i kalibrirati modele tečenja (Post i von Asmuth, 2013.). Kako se hidraulička visina mjeri u bunarima ili piezometrima oni predstavljaju istinske, često i jedine, prozore u prostor vodonosnika (Bonacci, 1988.). Njihova je uloga osobito važna u krškim vodonosnicima, kao što je to slučaj vodonosnika Vranskog jezera na Cresu.

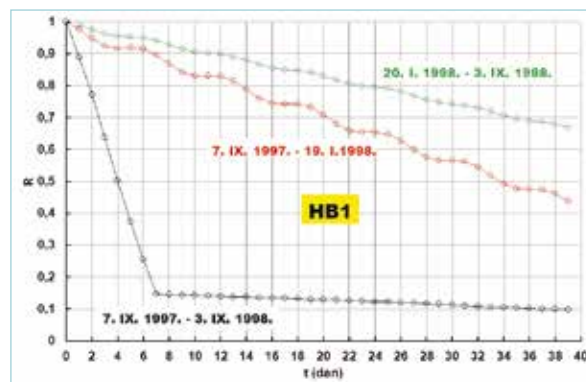
Na slici 6 prikazana su tri odnosa dnevnih razina podzemne vode između parova piezometra izmjerenih u razdoblju od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000. Na slici su ucrtani pravci regresije, upisane su njihove jednadžbe kao i kvadrati koeficijenata linearne korelacije. Vidljivo je da su sva tri pravca gotovo paralelna, a da su vrijednosti kvadrata koeficijenata korelacije vrlo visoke, te se kreću u rasponu od $R^2=0,995$ do $R^2=0,9982$.



Slika 6: Tri odnosa dnevnih razina podzemne vode između parova piezometra izmjerenih u razdoblju od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000. (ukupno 1209 dana)

Na slici 7 prikazana su tri niza koeficijenata autokorelacije, R, izračunata za podatke razina podzemne vode mjenjenih u piezometru B1 za dio vremenskog niza u porastu (20. I. - 3. IX. 1998. - zelena boja) u opadanju (7. IX. 1997. - 19. I. 1998. - crvena boja) i za slučaj kad se u analiziranom nizu nalazi dio podataka u porastu i dio u opadanju (7. IX. 1997. - 3. IX. 1998. - crna boja).

Uočava se da najsnažnija unutarnja povezanost postoji tijekom porasta razina podzemne vode mjenjenih u piezometru B1. U tom slučaju za vrijeme $t=39$ dana koeficijent autokorelacije iznosi $R=0,670$. Nešto manja, ali još uvijek snažna, je unutrašnja povezanost u padajućem dijelu vremenskog niza dnevnih razina podzemne vode piezometra B1. Za $t=39$ dana koeficijent autokorelacije iznosi $R=0,437$. Snažniju unutrašnju vezu tijekom porasta razina podzemne vode moguće je objasniti činjenicom da se radi o bržim procesima nego prilikom opadanja razine podzemne vode. Tijekom porasta dominantnu ulogu u kontroli procesa igraju veće krške pukotine kroz koje se podzemna voda brže kreće nego u slučaju opadanja kada se procesi odvijaju sporije kroz kršku matricu. U praksi se često koristi termin "pamćenje sistema" koji označava razdoblje do trenutka kada vrijednosti koeficijenta autokorelacije postaju beznačajne. Mangin (1984.) smatra se da je to trenutak kada su vrijednosti koeficijenta autokorelacije manje od $R=0,2$. U slučaju kad su koeficijenti autokorelacije računati za kompletni nivogram u kojem postoji uzlazna i silazna grana, vrijednost koeficijenta autokorelacije već poslije sedam dana padne ispod kritične vrijednosti od $R=0,2$, što se može objasniti činjenicom različitih procesa koji se odvijaju tijekom porasta i opadanja nivoa vode u piezometru.



Slika 7: Tri niza koeficijenata autokorelacije, R, izračunata za podatke razine podzemne vode mjenjenih u piezometru B1 za dio vremenskog niza u porastu (20. I. - 3. IX. 1998. - zelena boja) u opadanju (7. IX. 1997. - 19. I. 1998. - crvena boja) i za slučaj kad se u analiziranom nizu nalazi dio podataka u porastu i dio u opadanju (7. IX. 1997. - 3. IX. 1998. - crna boja)

Treba naglasiti da skoro identično izgledaju nizovi koeficijenata autokorelacije i u slučaju preostala dva piezometra, (B2 i B3). To je bilo za očekivati s obzirom na veliku sličnost ponašanja razina podzemne vode u sva tri piezometra, što je prethodno elaborirano prikazom na slici 6.

U tablici 1 upisane su vrijednosti deset najvećih porasta i opadanja vodostaja jezera i razina podzemne vode u tri piezometra izmjerenih u razdoblju od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000., izraženi u m/dan. Napominje se da su vrijednosti određene na osnovi dnevnih podataka prikazanih na slici 3 (dobivenih i objavljenih od strane vršitelja mjerenja). Uočava se da se najveći porasti javljaju na piezometru B3, koji je najudaljeniji

Tablica 1: Vrijednosti deset najvećih porasta i opadanja vodostaja jezera i razina vode u tri piezometra izmjerene u razdoblju od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000. izraženih u m/dan

R. br.	PORAST (m/dan)				OPADANJE (m/dan)			
	JEZERO	B1	B2	B3	JEZERO	B1	B2	B3
1.	0,14	0,27	0,27	0,42	-0,02	-0,03	-0,03	-0,03
2.	0,09	0,23	0,23	0,38	-0,02	-0,03	-0,03	-0,03
3.	0,09	0,21	0,21	0,26	-0,02	-0,03	-0,03	-0,04
4.	0,08	0,21	0,21	0,2	-0,02	-0,03	-0,03	-0,04
5.	0,07	0,17	0,17	0,2	-0,02	-0,03	-0,03	-0,04
6.	0,06	0,17	0,17	0,2	-0,02	-0,03	-0,03	-0,04
7.	0,06	0,15	0,15	0,17	-0,02	-0,03	-0,03	-0,05
8.	0,05	0,15	0,15	0,17	-0,02	-0,05	-0,05	-0,05
9.	0,05	0,13	0,13	0,17	-0,02	-0,06	-0,06	-0,05
10.	0,05	0,13	0,13	0,16	-0,03	-0,09	-0,09	-0,06

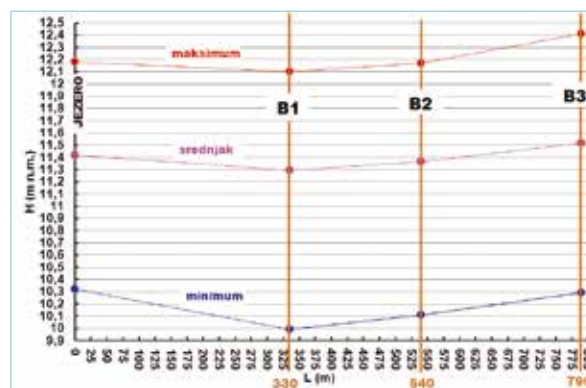
od obale jezera, te da su porasti vodostaja jezera manji od porasta razina podzemne vode. Najveći porast razina podzemne vode tijekom jednog dana iznosio je 42 cm, a opažen je na piezometru B3. Što se tiče opadanja vodostaja jezera i razina podzemnih voda oni su mnogo ujednačeniji. Vodostaj jezera je samo jednom tijekom 24 sata opao za 3 cm. Razine vode u piezometrima tek su u nekoliko slučajeva opadale više od 3 cm na dan. Kod piezometara B1 i B2 to se dogodilo u tri navrata, dok se kod piezometra B3 pojavilo u osam navrata.

4. ANALIZA ODNOSA VODOSTAJA JEZERA I RAZINA PODZEMNE VODE

Ključni dio analize, bitan za objašnjavanje dinamike cirkulacije vode u prostoru sliva Vranskog jezera, predstavlja izučavanje odnosa vodostaja jezera u funkciji razina podzemne vode izmjerenih u tri raspoloživa piezometra. Još je na slici 3 bio dat grafički prikaz nizova dnevnih vodostaja jezera, *HJ*, i dnevnih razina podzemne vode izmjerenih u tri piezometra, (*HB1*, *HB2*, *HB3*), u razdoblju od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000. Već se iz njega vizualno mogla uočiti velika sličnost u ponašanju vode u jezeru i podzemne vode, ali i činjenica da su razine podzemne vode često niže od vodostaja jezera.

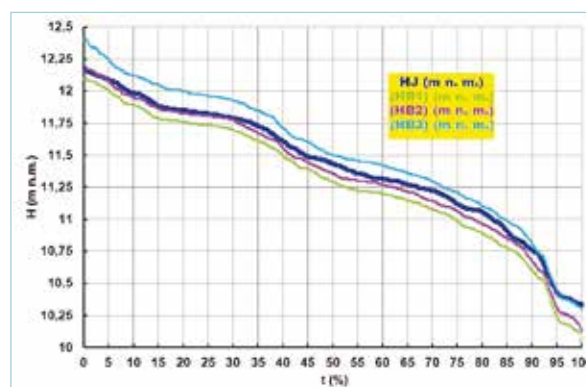
Na slici 8 ucrтана su tri karakteristična vodostaja i razine podzemne vode (minimalne, prosječne i maksimalne) izmjerene u jezeru i tri piezometra u razdoblju od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000. Uočava se da je maksimalni opaženi vodostaj jezera koji iznosi 12,18 m n.m. viši za 8 cm od najviše opažene razine podzemne vode u piezometru B1 i 1 cm od one opažene u piezometru B2. Samo u piezometru B3, najudaljenijem od obale jezera, maksimalna opažena razina podzemne vode je viša za 23 cm od maksimalnog vodostaja jezera. Slična je situacija i s minimalnim opaženim vodostajima i razinama podzemne vode. Minimalni opaženi vodostaj jezera iznosi 10,32 m n.m. Viši je za 33 cm od minimalne opažene razine podzemne vode u piezometru B1, 21 cm od one opažene u piezometru B2 i 3 cm od minimalne razine podzemne vode opažene u piezometru B3. Situacija s odnosom prosječnih vodostaja i razina

podzemne vode prodiskutirana je u poglavlju 1. UVOD vezano s komentiranjem rezultata prikazanih na slici 2.



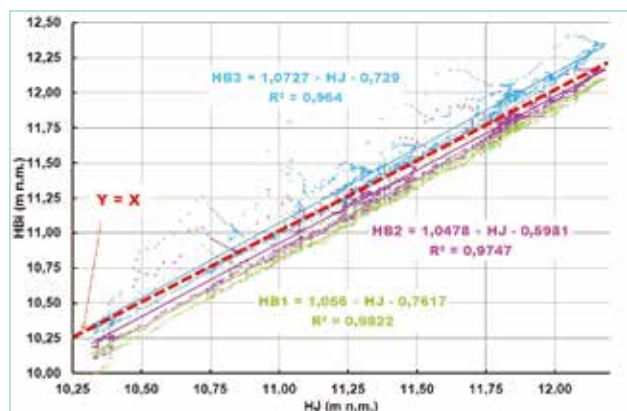
Slika 8: Tri karakteristična vodostaja i razine podzemne vode (minimalne, prosječne i maksimalne) izmjerene u jezeru i tri piezometra u razdoblju od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000. (ukupno 1209 dana)

Krivulja trajanja predstavlja prikaz analiziranih vrijednosti rangiran od najviše do najniže vrijednosti. U ovom slučaju rangirani su dnevni vodostaji jezera i dnevne razine podzemnih voda izmjerene u tri piezometra. Na slici 9 ucrtane su četiri krivulje trajanja dnevnih razina podzemne vode, (*HB1*, *HB2*, *HB3*), i vodostaja jezera, *HJ*, izraženih u m n.m., izmjerenih u razdoblju od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000.



Slika 9: Četiri krivulje trajanja dnevnih razina podzemne vode, (*HB1*, *HB2*, *HB3*), i vodostaja jezera, *HJ*, izmjerene u razdoblju od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000. (ukupno 1209 dana)

Iz grafičkog prikaza na slici 10, na kojem se nalaze tri odnosa između dnevnih razina podzemne vode, HB_i ($i=1,2,3$), na osi ordinate i vodostaja jezera, HJ , na osi apscise izmjerenih u razdoblju od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000. moguće je zaključiti da je međuzavisnost vodostaja jezera i razina podzemnih voda vrlo visoka. Pravci regresije skoro su paralelni, a vrijednosti kvadrata koeficijenta linearne korelacije, R^2 , se kreću se od $R^2=0,964$ za odnos vodostaja jezera i razine vode u piezometru B3 (najudaljenijem od obale) do $R^2=0,9822$ za odnos vodostaja jezera i razine vode u piezometru B1 (najbližem obali).



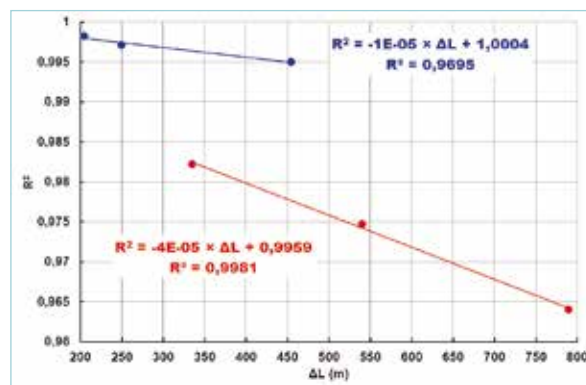
Slika 10: Odnos između dnevnih razina podzemne vode, HB_i ($i=1,2,3$), na osi ordinate i vodostaja jezera, HJ , na osi apscise, izmjerenih u razdoblju od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000. (ukupno 1209 dana)

U tablici 2 upisane su vrijednosti udaljenosti između parova piezometara te između piezometara i obale, ΔL , izražene u m, te vrijednosti kvadrata koeficijenta linearne korelacije, R^2 , između istovremenih razina podzemne vode u paru piezometara, ($B1-B2$; $B2-B3$; $B1-B3$), kao i istovremenih razina podzemnih voda u pojedinom piezometru i vodostaja jezera, ($B1-HJ$; $B2-HJ$; $B3-HJ$). Grafički prikaz dva odnosa između kvadrata koeficijenta linearne korelacije, R^2 , na osi ordinate i udaljenosti među piezometrima i obalom jezera, ΔL , na osi apscise nalazi se na slici 11. Modrom bojom su označene relacije između piezometara, a crvenom bojom između piezometara i jezera. Uočava se da s povećanjem razmaka između piezometara ili udaljenosti od obale

Tablica 2: Udaljenosti između parova piezometara te između piezometara i obale, ΔL , izražene u m, te vrijednosti kvadrata koeficijenta linearne korelacije, R^2 , između istovremenih razina podzemne vode u paru piezometara, ($B1-B2$; $B2-B3$; $B1-B3$), kao i istovremenih razina podzemnih voda u pojedinom piezometru i vodostaja jezera, ($B1-HJ$; $B2-HJ$; $B3-HJ$)

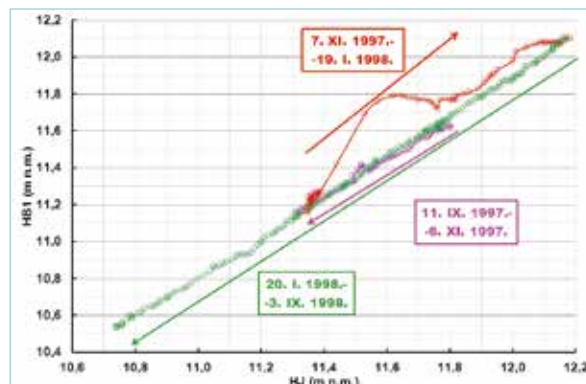
R. br.	RAZMAK IZMEĐU	ΔL (m)	R^2
1.	B1-B2	205	0,9982
2.	B2-B3	250	0,9971
3.	B1-B3	455	0,9950
4.	B1-HJ	335	0,9822
5.	B2-HJ	540	0,9747
6.	B3-HJ	790	0,9640

opadaju vrijednosti kvadrata koeficijenta linearne korelacije, R^2 . Ujedno se može zaključiti da je čvrstoća odnosa između razina podzemne vode mjerenih u tri piezometra veća od čvrstoće odnosa između vodostaja jezera i razina vode u piezometrima.



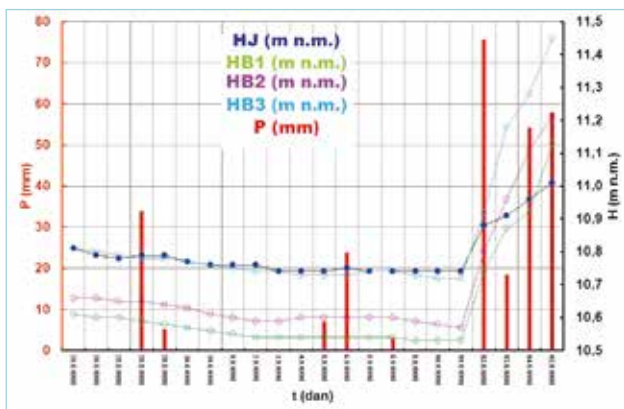
Slika 11: Prikaz dva odnosa između kvadrata koeficijenta linearne korelacije, R^2 , na osi ordinate i udaljenosti među piezometrima i obalom jezera, ΔL , na osi apscise. Modrom bojom su označene relacije između piezometara, a crvenom bojom između piezometara i jezera.

Na slici 10 uočava se da određeni broj točaka u sva tri odnosa između vodostaja jezera i razina podzemnih voda u piezometrima odstupa od pravaca regresije. Da bi se shvatilo o čemu se radi, nacrtana je slika 12 na kojoj su prikazani odnosi između dnevnih razina podzemne vode izmjerenih u piezometru B1, HB_1 , i vodostaja jezera, HJ , u tri različita vremenska podrazdoblja. Zelenom i ljubičastom bojom ucrtana su podrazdoblja kad su vodostaji jezera i razine podzemne vode bili u opadanju; dok je crvenom bojom ucrtano podrazdoblje kad su oba nivoa bila u porastu. Tijekom opadanja vodostaja i razina podzemne vode, odnos je stabilan i identičan u oba analizirana podrazdoblja. Početkom porasta, razina podzemne vode brže raste od razine vodostaja jezera. To se događa samo par dana iza kojih slijedi obratan proces, tj. brži porast vodostaja jezera i sporiji porast ili čak stagnacija razine podzemne vode.



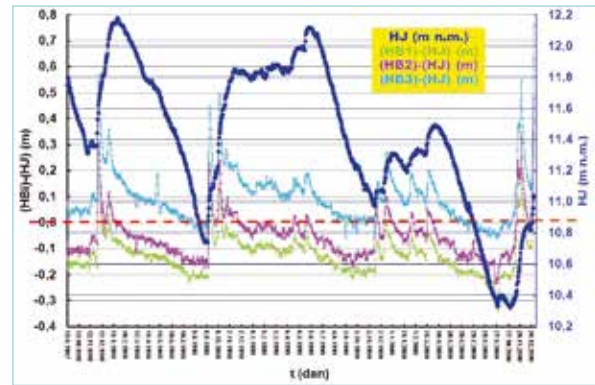
Slika 12: Odnosi između dnevnih razina podzemne vode izmjerenih u piezometru B1, HB_1 , i vodostaja jezera, HJ , u tri različita vremenska podrazdoblja. Zelenom i ljubičastom bojom ucrtana su podrazdoblja kad su vodostaji jezera i razine podzemne vode bili u opadanju, dok je crvenom bojom ucrtano podrazdoblje kad su oba nivoa bila u porastu.

S ciljem detaljnijeg uočavanja uzroka i posljedica dinamičkog procesa odnosa vodostaja jezera i razina podzemnih voda ucrtana je [slika 13](#) na kojoj su prikazani nizovi dnevnih vodostaja jezera, HJ , dnevnih razina podzemne vode mjerene u tri piezometra, ($HB1$, $HB2$, $HB3$), i dnevnih oborina, P , izmjerenih u razdoblju od 25. kolovoza 1998. do 15. rujna 1998. (ukupno 22 dana). Radi se o kratkom razdoblju vremena u kojem je zbog padanja obilnih oborina na slivu došlo do naglog podizanja kako razine podzemnih voda, tako i vodostaja jezera. Iz ove se slike jasno uočava da razina podzemne vode u sva tri piezometra brže raste od vodostaja jezera, te da čak i u slučaju piezometra B1 premašuje vodostaj u jezeru.

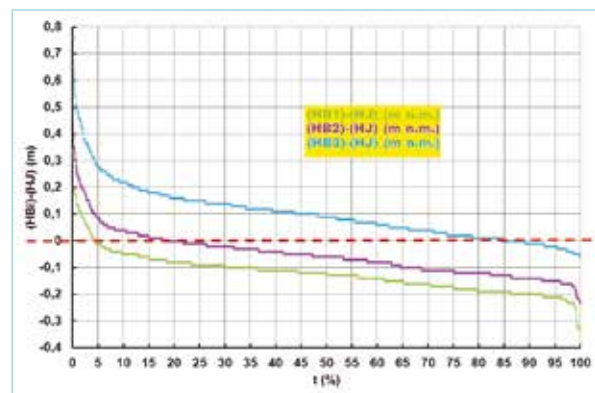


Slika 13: Nizovi dnevnih vodostaja jezera, HJ , dnevnih razina podzemne vode mjenjenih u tri piezometra, (B1, B2, B3), i dnevnih oborina, P , izmjerenih u razdoblju od 25. kolovoza 1998. do 15. rujna 1998. (ukupno 22 dana)

Važna informacija na osnovi koje se može zaključivati o dinamici odnosa vode u jezeru i podzemne vode može se dobiti analizom razlika dnevnih razina podzemnih voda i vodostaja jezera, ($HBi-HJ$) ($i=1,2,3$), i niza dnevnih vodostaja jezera, HJ . Na [slici 14](#) prikazane su ove razlike usporedo s vrijednosti dnevnih vodostaja jezera. Kako je i bilo za očekivati ponašanje razlika razina podzemnih voda i vodostaja jezera u sva tri piezometra ima gotovo identično ponašanje, tj. prati porast i opadanje nivograma jezera. Na [slici 15](#) su prikazane tri krivulje trajanja razlika dnevnih razina podzemnih voda i vodostaja jezera, ($HBi-HJ$) ($i=1,2,3$), za podatke izmjerene u razdoblju od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000. Iz ovog je prikaza moguće utvrditi da je na piezometru B1, udaljenom 335 m od obale jezera, razina podzemne vode samo 56 dana (4,6 % analiziranog vremena) bila viša ili jednaka vodostaju jezera. Na piezometru B2, udaljenom 540 m od obale jezera, razina podzemne vode bila je 262 dana (21,7 % analiziranog vremena) viša ili jednaka od vodostaja jezera. Na najudaljenijem piezometru B3, izbušenom 790 m od obale jezera, razina podzemne vode bila je tijekom analiziranog razdoblja viša ili jednaka od vodostaja jezera 89,1 % vremena.



Slika 14: Nizovi razlika dnevnih razina podzemnih voda i vodostaja jezera, ($HBi-HJ$) ($i=1,2,3$), i niz dnevnih vodostaja jezera, HJ , izmjereni u razdoblju od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000. (ukupno 1209 dana)



Slika 15: Krivulje trajanja razlika dnevnih razina podzemnih voda i vodostaja jezera, ($HBi-HJ$) ($i=1,2,3$), za podatke izmjerene u razdoblju od 10. rujna 1997. do 31. prosinca 2000. (ukupno 1209 dana)

5. ZAKLJUČCI I SMJERNICE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA

Na osnovi originalnih i službenih rezultata mjerenja na analiziranom presjeku na kojem su locirana tri piezometra pojavljuje se pretpostavka o neuobičajenom i teško objašnjivom odnosu razina podzemnih voda krškog vodonosnika i vodostaja Vranskog jezera. Vjerojatnije je da se radi o netočno određenim apsolutnim vrijednostima razina podzemne vode u tri piezometra, nego vodostaja jezera. Međutim, radi li se i ako da o kolikim greškama se radi, tek treba službeno utvrditi. Razlozi za nepouzdanu određivanje razine vode u tri piezometra mogu biti: (1) različita istezanja kabela mjerača; (2) otklon bušotina od vertikale; (3) krivo određena kota cijevi piezometra od koje se vrše odmjeravanja razine podzemne vode. Neophodno je žurno ustanoviti radi li se o nekoj od prethodno navedenih grešaka. Tu se ne radi o nekom skupom i dugotrajnom postupku. Dileme koje postoje više od 15 godina i moraju biti otklonjene žurno, jer Vransko jezero na otoku Cresu predstavlja doista vrijedan krški fenomen o kojem smo dužni voditi svaku brigu. A nju je moguće ostvariti jedino ako se raspolaže s pouzdanim podlogama.

Treba naglasiti i činjenicu da pri analizama razina podzemnih voda, osobito onih mjenjenih u dubokim piezometrima izbušenim u kršu, treba biti vrlo oprezan,

jer postoje brojni mogući izvori pogrešaka, osim one tri koje su prethodno navedene. Detaljan opis potencijalnih pogrešaka moguće je naći u literaturi (Bonacci, 1988.; Post i von Asmuth, 2013.). Najčešće se javljaju greške vezane s: (1) mjernim instrumentima; (2) konverzijom pritiska u visinu; (3) učinka vremena osrednjavanja; (4) pogrešnog očitavanja (Post i van Asmuth, 2013.). U slučaju tri piezometra čiji su podatci razmatrani u ovom članku postoji mogućnost da oni nisu izbušeni okomito (da imaju otklon od vertikale) već pod nekim kutom. Najmanje je vjerojatno da su krivo određene apsolutne kote vrha piezometarskih cijevi od kojih se vrši odmjerenje razine podzemne vode, jer je za njihovo pouzdano određivanje bilo na raspolaganju dosta vremena.

Osnovni zaključak prethodno izvršenih analiza je da samo tri piezometra s kojima se raspolagalo nisu dovoljna da se objasni složena dinamika odnosa podzemnih voda i voda Vranskog jezera. Za izvršavanje ovog, vrlo značajnog i moglo bi se reći urgentnog zadatka, bit će potrebno izbušiti još najmanje 5 do 7 baterija od po tri duboka piezometra oko cijelog jezera. Činjenica je da je ispunjavanje tog cilja (makar u bliskoj budućnosti) teško očekivati zbog velike cijene takove vrste radova. Međutim, barem jedna baterija od tri piezometra locirana na zapadnoj obali jezera u smjeru položaja vrulje koja izbija u moru ili na sjevernoj strani na lokalitetu gdje je obala jezera najbliža obali mora bili bi od velike koristi za objašnjavanje procesa odnosa podzemnih voda i vode u jezeru. Na tim bi se mjestima moglo očekivati da voda iz jezera u određenim hidrogeološkim situacijama ima izravni kontakt s morem. Veći broj piezometara u jednoj bateriji omogućio bi da se odredi podzemna vododijelnica sliva Vranskog jezera. Očito je da baterija od tri piezometra ne može ispuniti taj zadatak.

Suvremene tehnologije, prije svega primjena logera za mjerenje razine, temperature i električne vodljivosti, omogućavaju mjerenje i niza drugih parametara u piezometrima. Od osobitog bi značaja bilo osim mjerenja razine vode u piezometrima kontinuirano mjeriti i električnu provodljivost kao i temperaturu vode. Ovaj zadatak bi mogao biti brzo i jeftino obavljen instaliranjem logera za mjerenje razine, temperature i električne vodljivosti u tri postojeća i ovdje analizirana piezometra. Vrijednost Vranskog jezera na otoku Cresu zaslužuje mnogo veću brigu i znatnija i organiziranije napore u istraživanje od onih koji se danas ulažu.

Osnovni zadatak ovog rada je bio da ukaže na činjenicu brojnih neriješenih problema i otvorenih dilema vezanih s Vranskim jezerom, te da potakne odgovorne da ulože sredstva i napore u rješavanje ove problematike. Dilema oko toga jesu li apsolutne vrijednosti razine podzemnih voda u tri postojeća piezometra točne ili ne postoji već duže od 15 godina i nažalost do sada nije riješena. Nadamo se da će ovaj rad pomoći da se ubrza rasvjetljavanje postojećih dilema nastalih na osnovi podataka koji su u radu interpretirani i koji se pošto su javno objavljeni (Kuhta, 2002.; 2004.; Kuhta i Brkić, 2013.) tretiraju kao važeći. Ukoliko se kojim slučajem pokaže da su svi analizirani vodostaji točno određeni to bi otvorilo brojna i zanimljiva pitanja na koja bi znanost trebala tek naći odgovore.

ZAHVALA

Autori rada iskreno se zahvaljuju nepoznatim recenzentima na primjedbama koje su dali na prvu verziju rada i koje su usvojene u ovoj verziji te su na taj način pomogle boljem rasvjetljavanju ove ekstremno važne i složene problematike. ■

LITERATURA

- Bonacci, O. (1988.): Piezometer – the main source of hydrologic information in the karst. *Vodoprivreda*, 20(115), 265–278.
- Bonacci, O. (1993.): The Vrana Lake hydrology (Island of Cres – Croatia). *Water Resources Bulletin*, 29839, 407–414.
- Bonacci, O. (2014.): Analiza varijacija razine vode jezera Vrana na otoku Cresu. *Hrvatske vode*, 22(80), 337–346.
- Bonacci, O. (2017.): Preliminary analysis of the decrease in water level of Vrana Lake on the small carbonate island of Cres (Dinaric karst, Croatia). U: Parise, M., Gabrovsek, F., Kaufmann, G. & Ravbar, N. (ur.) *Advances in Karst Research: Theory, Fieldwork and Applications*. Geological Society, London, Special Publications, 466. 6, 1–11.
- Kuhta, M. (2002.): Hidrogeološka istraživanja Vranskog jezera na otoku Cresu u razdoblju 2001.–2002. god. *Institut za geološka istraživanja, Zavod za hidrogeologiju i inženjersku geologiju, Zagreb*. (nepublicirani elaborat).
- Kuhta, M. (2004.): Lake Vrana on Cres Island – Genesis, characteristics and prospects, in: *Proceedings of XXXIII Congress IAHR and 7th Congress ALHSUD*, Zacatecas, Mexico
- Kuhta, M.; Brkić, Ž. (2013.): Seasonal temperature variations of Lake Vrana on the Island of Cres and possible influence of global climate changes. *Journal of Earth Science and Engineering*, 3, 225–237.
- Mangin, A. (1984.) Pour une meilleure connaissance des systemes hydrologiques a partir des analyses correlative et spectrale. *Journal of Hydrology*, 67(1–4), 25–43.
- Post, W.E.A.; von Asmuth, J.R. (2013.): Review: Hydraulic head measurement – new technologies classic pitfalls. *Hydrogeology Journal*, 21(4), 737–750.

Analysis of groundwater levels and Lake Vrana water levels on the Cres Island

Abstract. The paper analyses the behaviour of groundwater levels recorded in three deep piezometers located in the Like Vrana basin on the Cres Island in the period from 10 September 1997 to 31 December 2000, i.e. a total of 1209 days. The behaviour of groundwater levels in all three piezometers was nearly identical, with the values of square coefficients of linear correlation among the piezometer pairs ranging from $R^2=0.955$ and $R^2=0.998$. The daily inflows and lake water losses were calculated as well. The maximum mean daily inflow into the lake in the analysed period equalled $Q=8,9 \text{ m}^3/\text{s}$, whereas the maximum mean daily loss from the lake was $Q=-1,9 \text{ m}^3/\text{s}$. The differences between simultaneously measured groundwater levels in each individual piezometer and the lake water level were analysed. It was determined that in the piezometer B1, 335 m away from the lake shore, the groundwater level was higher or equal to the lake water level for a period of only 56 dana (4.6 % of the analysed time period). In the piezometer B2, 540 m away from the lake shore, the groundwater level was higher or equal to the lake water level for a period of 262 dana (21.7 % of the analysed time period), whereas in the farthest piezometer B3, drilled 790 m away from the lake shore, the groundwater level was higher or equal to the lake water level 89.1 % of the analysed time period. This relation was unexpected and difficult to explain or correct without further measurements, which is necessary due to doubts as to the veracity of the measured groundwater levels. Lake Vrana on the Cress island, a unique water formed on a karst island mass in the world, deserves that the processes occurring in the lake itself and its environment should be reliably clarified, which is the primary objective of this paper.

Key words: lake water level, water inflow into a lake, groundwater level, Lake Vrana, Cres Island, Croatia

Analyse der Beziehung zwischen Grundwasser- und Wasserspiegeln des Vrana-Sees auf der Insel Cres

Zusammenfassung. In der Arbeit wurden die Veränderungen von täglichen Grundwasserspiegeln analysiert, die mit drei tiefen Piezometern im Einzugsgebiet des Vrana-Sees auf der Insel Cres im Zeitraum vom 10. September bis 31. Dezember 2000, also insgesamt 1209 Tage, gemessen wurden. Die Spiegel in allen drei Piezometern verhielten sich fast identisch, weil die Quadrat-Werte der Koeffizienten des linearen Zusammenhangs zwischen den Piezometerpaaren zwischen $R^2=0,955$ und $R^2=0,998$ waren. Tägliche Zuflüsse sowie Abflüsse wurden auch berechnet. Der maximale mittlere Tageszufluss in den See betrug in dem analysierten Zeitbereich $Q=8,9 \text{ m}^3/\text{s}$, während der maximale mittlere Tagesabfluss aus dem See $Q=-1,9 \text{ m}^3/\text{s}$ war. Die Unterschiede zwischen den in jedem einzelnen Piezometer gleichzeitig gemessenen Grundwasserspiegeln und den Seespiegeln wurden analysiert. Es konnte festgestellt werden, dass im Piezometer B1, das 335 m von der Seeküste entfernt war, der Grundwasserspiegel nur 56 Tage (4,6% des analysierten Zeitbereichs) höher oder gleich hoch wie der Seespiegel war. Im Piezometer B2, 540 m von der Seeküste entfernt, war der Grundwasserspiegel 262 Tage (21,7% des analysierten Zeitbereichs) höher oder gleich hoch wie der Seespiegel, während in dem meist weit entfernten Piezometer B3, eingebaut 790 m von der Seeküste, der Grundwasserspiegel höher oder gleich hoch wie der Seespiegel für 89,1% des analysierten Zeitbereichs war. Diese Beziehung ist unerwartet, und man kann sie schwer ohne weitere Messungen erklären oder korrigieren. Weitere Messungen sind erforderlich, da auch Zweifel bezüglich der Richtigkeit von gemessenen Grundwasserspiegeln bestehen. Da der Vrana-See auf Cres eine einmalige, auf einer Karstinsel entstandene Wassermasse ist, ist es erforderlich die Prozesse, die im See und um den See ablaufen, zweifellos zu erklären, was auch das Hauptziel dieses Beitrags war.

Schlüsselwörter: Seespiegel, Zufluss vom Wasser in den See, Grundwasserspiegel, Vrana-See, Insel Cres, Kroatien