

HIDROGEOLOŠKI ODNOSI NA KRŠKIM OTOCIMA – PRIMJER OTOKA VISA

JOSIP TERZIĆ

Institut za geološka istraživanja, Sachsova 2, Zagreb

Ključne riječi: otok Vis, krš, stijenska masa, hidraulička vodljivost, odnos slatke i slane vode

Key words: Vis island, karst, rock mass, hydraulic conductivity, salt/fresh water relations

Sažetak

Na primjeru otoka Visa prikazan je pristup hidrogeološkim istraživanjima na većim jadranskim otocima. Infiltracija, nakupljanje i istjecanje podzemnih voda odvijaju se u okršenoj stijenskoj masi. Hidrogeološki odnosi su uvjetovani geološkom gradom terena, a pritom se ističe posebna važnost postojanja potpune hidrogeološke barijere u komiškome zaljevu, te relativne barijere u području krških polja. Radi rasvjetljavanja hidrogeoloških odnosa tijekom istraživačkih radova 1999. i 2000. godine, uz korištenje prethodnih rezultata, načinjena je opsežna strukturalno-geološka razrada terena koja je uz ostala hidrogeološka istraživanja pomogla u identifikaciji oblikovanja i održavanja ovog krškog vodonosnika. Prikazan je i orijentacijski izračun hidrauličke vodljivosti stijenske mase i razina njegove primjenjivosti na ovakvim terenima. Na temelju svih tih metoda došlo se do zaključka kako se na otoku Visu slana morska voda ne proteže ispod cijelog otoka, već poput klina prodire u unutrašnjost po relativno nepropusnoj podlozi, a njena dubina može se procijeniti na više desetaka metara ispod današnje razine mora. Na temelju takvih zaključaka i vodeći računa o hidrološkoj bilanci, može se očekivati ostvarivost povećanja crpnih količina na viškome vodocrpilištu "Korita", kao i izvedba dodatnih zdenaca.

Abstract

An approach to the hydrogeological investigations on Adriatic islands is presented on the Island of Vis case study. Infiltration, accumulation and discharge of the groundwater occur in karstified rock mass. Hydrogeological relations are mostly a consequence of the geological setting, because of the complete hydrogeologic barrier in Komiža bay, and relative barrier in the area of karst poljes. Significant research was performed in the 1999 – 2000 period aimed of better understanding of hydrogeological relations. These investigations, as well as reinterpretation of some previously known data, included structural geology, hydrogeology, hydrology and hydrochemistry. Approximate rock mass hydraulic conductivity calculation is also shown, as well as level of its usability in such terrain. Based on all these methods, it is possible to conclude that on the Island of Vis there is no saline water present underneath the entire island. There is only a saline water wedge which is formed on the top of relatively impermeable base rock, some few tens of meters under recent sea level. With such a model, and taking in account the hydrological balance, it is possible to conclude that there is possibility of higher amount of groundwater exploitation then it is today.

Uvod

Vis je krški otok koji svoju vodoopskrbu zadovoljava crpljenjem vlastitog vodonosnika, pa zbog toga predstavlja zanimljivu hidrogeološku cjelinu za istraživanja odnosa slatke i slane vode u krškom podzemlju. Osim okršenosti, pojavljuju se i brojne druge zanimljivosti, kao npr. litološka i strukturalno-geološka uvjetovanost odnosa slatke i slane vode u podzemlju. Zbog povećanih potreba za vodom Vis je redovito suočen s ljetnim redukcijama. Tada je smanjeno napajanje vodonosnika, a potrebe za vodom su višestruko povećane zbog turizma i poljoprivrede.

Otok Vis je deseti po veličini jadranski otok, s površinom od oko 90 km². Najveća su naselja Komiža i Vis. Reljef Visa moguće je po duljini otoka raščlaniti na tri brdovita pravca između kojih se protežu dvije udoline. Sjevernija udolina je relativno uska i u njoj je smješteno

i vodocrpilište "Korita" (sl. 1) sa svim svojim zdencima. Južna udolina daleko je šira od sjeverne pa su se u njoj razvila i krška polja koja danas predstavljaju obrađene poljoprivredne površine. Bušenjem je ustanovljena debljina kvartarnog nanosa u sjeverozapadnom dijelu Velog polja (bušotina VP-1) od čak 45 m (Crnolatac, 1953). Polja se u tom dijelu terena nalaze približno na 110 m n.m. Najviši vrh otoka je Hum s 587 m n.m. na zapadnoj strani otoka. Pružanje reljefnih oblika je, osim rijetkih izuzetaka, istok-zapad. To je povezano s pružanjem glavnih rasjeda i geoloških struktura.

Zbog svojih geoloških i hidrogeoloških posebnosti, otok Vis je bio predmetom brojnih istraživanja, još od 18. stoljeća (Donati, 1750; Fortis, 1776). Novija geološka istraživanja započinje Salopek (1926, 1939), a nastavljaju u drugoj polovici 20. stoljeća Crnolatac (1953), Mamužić (1964), Šušnjar (1967), Borović et al. (1977) i brojni

drugi istraživači. Na geološkim podlogama već od 1950.-ih godina pokreću se opsežna hidrološka i hidrogeološka istraživanja: Poljak (1953), Šarin et al. (1963), Krznar (1968, 1989), Fritz (1989), Ivičić (1997), Bagarić et al. (1997), Kordek (1997), Kapelj et al. (2001), te brojni drugi.

Geološka građa i strukturno – tektonski odnosi

U geološkoj građi otoka Visa se pojedine stijene prema svojim hidrogeološkim svojstvima mogu podijeliti u pet osnovnih skupina (Terzić, 2003). To su (sl. 1):

- ❑ Nepropusne stijene pukotinske poroznosti. Klastiti i magmatiti koji su prema najnovijim istraživanjima (Koch & Belak, 2003) datirani u razdoblje od ladinika (T_2^2) do norika (T_3^1). Imaju funkciju hidrogeološke barijere. Jedino je moguće da kroz jače razlomljene rasjedne zone protječe određena količina vode iz karbonatnog vodonosnika u zaleđu.
- ❑ Karbonatne stijene slabe propusnosti i pukotinske poroznosti. To su dolomiti neokomske starosti ($^2K_1^{1+2}$). Stijene ove hidrogeološke skupine obuhvaćaju relativno usku zonu polukružno oko vodonepropusnih klastita i magmatita komiške uvale, s kojima su u rasjednom kontaktu (Borović et al., 1977).
- ❑ Karbonatne stijene srednje propusnosti i pukotinsko-disolucijske poroznosti. Stijene ove skupine izgrađuju najveći dio terena, djelomično su okršene i dostatno propusne da omogućuju relativno brzu infiltraciju oborinskih voda u podzemlje. Pukotinski i kavernozi prostori u stijenama ove skupine uglavnom su zapunjeni sitnijim česticama nastalim trošenjem dolomita, s primjesama crvenice. Zbog reducirane propusnosti dolazi do nakupljanja podzemnih voda i formiranja vodonosnika, a smanjena propusnost ograničava i prodor morske vode u podzemlje. U najvećoj mjeri riječ je o kalcitičnim dolomitima, a mjestimično i pločastim vapnencima cenomansko-turonske starosti ($K_2^{1,2}$), no tu se još ubrajaju i vapnenci i dolomitični vapnenci berijasa s laporima i laporovitim proslojcima ($^2K_1^{1+2}$), te vapnenci barem-apt-albske starosti (K_1^{3-5}) (Borović et al., 1977).
- ❑ Karbonatne stijene visoke propusnosti i pukotinsko-disolucijske poroznosti. Vapnenci ove skupine stijena uglavnom su raspucani i okršeni te je zadržavanje vode u njima vrlo ograničeno. To su bijeli vapnenci senonske starosti (K_2^3), jednim dijelom turonski rudistni vapnenci, te okršeni vapnenci cenomansko-turonske starosti ($K_2^{1,2}$) (Borović et al., 1977).

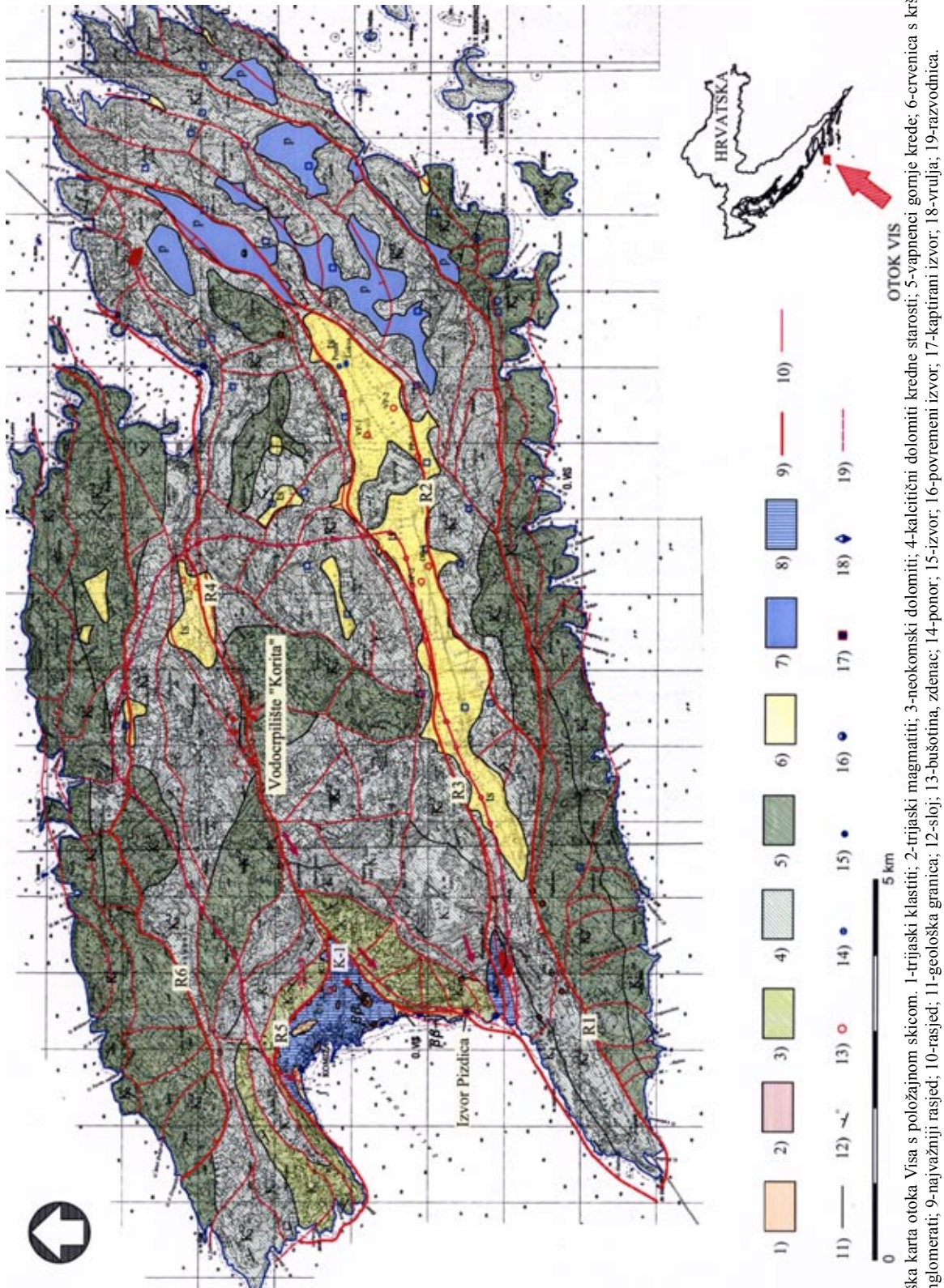
Hidrogeološka funkcija izravno je ovisna o prostornom smještaju.

- ❑ Kvartarne stijene naizmjeničnih svojstava, međuzrske i pukotinske poroznosti. Eolski pijesci (p) su vrlo propusni i može se reći kako nemaju hidrogeološkog značaja zbog lokalnog rasprostiranja i ograničene debljine. Crvenica (ts) je sastavljena uglavnom od gline i praha i male je propusnosti. Ima veliki kapacitet vlage pa u sušnom razdoblju nastaje vrlo veliki deficit vlage, a stvaraju se i pukotine koje bitno povećavaju propusnost. U području krških polja crvenica je pomiješana s nešto kršja pa je propusnija, na što upućuje postojanje kopanih zdenaca koji vrlo brzo reagiraju na oborine. Siparišne breče i konglomerati u području Komiže poseban su geološki član. Kroz njih je uočljiva intenzivna cirkulacija plitkih ispodpovršinskih voda. Propusnost im je međuzrska u tom smislu što je vezivo (okamenjena crvenica) relativno propusno, ali dobrim djelom i pukotinska, budući da se u ovom mladom geološkom članu mogu odrediti svi sustavi pukotina kao i na starijim stijenama. Rezultat ove relativno plitke ispodpovršinske cirkulacije kroz šupljikave kvartarne stijene na nepropusnoj podlozi od klastita i efuziva su svi stalni i povremeni izvori komiškog zaljeva.

Na temelju interpretacije avionskih snimaka, kao i terenskim mjerenjima radi rekonstrukcije smjera naprezanja, određeni su glavni rasjedi strukturnog sklopa otoka Visa. Rasjedi su reversni s vergencijama prema jugu i sjeveru (Terzić, 2003), i to su:

- ❑ rasjed Stupišće – uvala Milna (R1 na sl. 1);
- ❑ rasjed Dračevo polje – Plisko polje – rt Stačine (R2 na sl. 1);
- ❑ rasjed Šćeda – Žene Glava – Čumkovića – U. Dobra (R3 na sl. 1);
- ❑ rasjed Pizdica – Sv. Mihovil – Vis (R4 na sl. 1);
- ❑ rasjed Knez rt – Komiža – Sv. Mihovil (R5 na sl. 1);
- ❑ rasjed U. V. Dragodir – Oključna – Sv. Juraj (R6 na sl. 1).

Rasjedi su uglavnom subparalelni dužoj osi otoka. Rasjed R1 vjerojatno je prateći rasjed glavnoj zoni tzv. Viškog rasjeda koji se nalazi u moru južno od Visa (Prelogović et al., 2001). Nagnut je prema sjeveru. Rasjed R2 je ogranak rasjeda R1 i graniči lokalnoj strukturi, a vergencije prema sjeveru i sjeverozapadu. Rasjed R3 proteže se cijelom duljinom otoka, nagnut je prema sjeveru i uz njega su razvijena krška polja. Nešto južnije od njega nalazi se rasjed R1. Paralelni su, te svojim savijanjem slijede jedan drugoga, a tako su ostavili trag i na morfologiju otoka. Rasjed Pizdica – Sv. Mihovil – Vis (R4) je morfološki najizraženiji i hidrogeološki



Slika 1. Hidrogeološka karta otoka Visa s položajnom skicom. 1-trijaski skicom. 1-trijaski klastiti; 2-trijaski magmatiti; 3-neokomski dolomiti; 4-kalcični dolomiti kredne starosti; 5-vapnenci gornje krede; 6-crvenica s kršjem; 7-pijesci; 8-breče i konglomerati; 9-najvažniji rasjed; 10-rasjed; 11-geološka granica; 12-sloj; 13-bušotina, zdenac; 14-ponor; 15-izvor; 16-povremeni izvor; 17-kapirani izvor; 18-vrulja; 19-razvodnica.

Figure 1. The island of Vis hydrogeological map with location map. 1-Triassic clastic rocks; 2-Triassic volcanic rocks; 3-Neocomian dolomites; 4-Cretaceous calcitic dolomites; 5-Upper Cretaceous limestones; 6-terra rosa with rock fragments; 7-sands; 8-breccias and conglomerates; 9-main fault; 10-fault; 11-geological boundary; 12-bed; 13-borehole, well; 14-swallow hole; 15-spring; 16-temporary spring; 17-capped spring; 18-submarine spring; 19-water divide.

najznačajniji. Na zapadnom kraju ovog rasjeda, na dodiru s morem, nalazi se izvor Pizdica. Od izvora pa sve do iznad Komiže ovaj rasjed odjeljuje klastične i magmatske naslage od karbonata, što je uočljivo na avionskim snimcima. Iznad Komiže, kod crkve Sv. Mihovila markiran je širokim pojasom. Od Sv. Mihovila pa sve do Visa uz rasjed je nastala relativno uska udolina u kojoj je smješteno i vodocrpilište Korita. Istočno od grada Visa rasjed se pretpostavlja u podmorju, neposredno uz obalu, a opet ga se može zapaziti na malom poluotoku kod Češke vile i uvale Grandovac. Rasjedna zona na toj lokaciji i materijal ispune u potpunosti odgovaraju onoj kod crkve Sv. Mihovila. Nagnut je prema jugu. Mjestimično je značajna lijeva horizontalna komponenta pomaka krila rasjeda. Rasjed R6 sjeverne je vergencije. Unutar struktura zamijećeni su rasjedi lokalnog značaja. Najčešće su to sustavi rasjeda smicanja s izraženom desnom i lijevom horizontalnom komponentom pomaka krila, i oni su posebno značajni zbog lokalnog usmjeravanja podzemnih tokova.

Opis hidrogeoloških pojava i vodnih objekata

Sva naseljena mjesta otoka Visa priključena su na vodovod koji se vodom opskrbljuje na crpilištu "Korita". U vrijeme ljetnih suša na vodovod se priključuje i kaptirani izvor "Pizdica". Za crpljenje je uređena i bušotina K-1 iznad Komiže, ali se ne koristi zbog relativno niske izdašnosti (< 2 l/s) i izdvojenosti od crpilišta Korita. Minimalne izdašnosti kaptiranih objekata na otoku Visu iznose 3,3 l/s na izvoru "Pizdica" (Terzić, 2003), a na svim zdencima crpilišta "Korita" (zajedno) 27 l/s (Vranješ & Bojanić, 1998). Crpilište "Korita" sastoji se od šest zdenaca (BO-1, BO-2, BO-3, BO-4, BO-5, BO-6), no za vodoopskrbu se koriste samo prva četiri. Crpljenje podzemne vode u Koritima započelo je 1966.-1968., kada su izbušeni zdenci BO-1 i BO-2. Izvor "Pizdica" kaptiran je podzemno (rudarskim zahvatom) u stijeni, neposredno uz morsku obalu. U sušnim razdobljima zabilježeno je povišenje saliniteta, pa i prava bočata voda (do 700 mg/l klorida) (Vranješ & Bojanić, 1998). Osim ovih glavnih objekata postoje i brojni manji izvori, prvenstveno u Komiškom zaljevu, jedna značajnija vrulja u Kutu (Viška luka), lokva i ponor u Pliskom polju, te brojni kopani zdenci i cisterne. Svi su značajniji objekti prikazani na sl. 1.

Nakupljanje i bilanca podzemnih voda

Osim izvora Pizdica i crpilišta Korita, te nekoliko manjih i opisanih pojava, na otoku nema značajnijih koncentriranih izviranja podzemnih voda. Ostatak, koji je zapravo i najveći dio istjecanja slatke vode iz vodonosnika događa se procjeđivanjem i difuznim pretakanjem slatkih voda u more, cijelom dodirnom linijom s morem. Najveći dio tog kontakta vjerojatno je pokriven (skriven) vrlo

propusnim senonskim vapnencima s južne i sjeverne strane otoka (Sl. 1), te nije moguće motrenjem utvrditi na kojim je dijelovima terena istjecanje pojačano. Upravo zbog takvih obilježja vrlo je važno razmotriti vodnu bilancu. U toj bilanci jedini prinos (ulaz) predstavljen je padalinama, tj. njihovim efektivnim dijelom, odnosno dijelom koji se infiltrira do podzemnih voda.

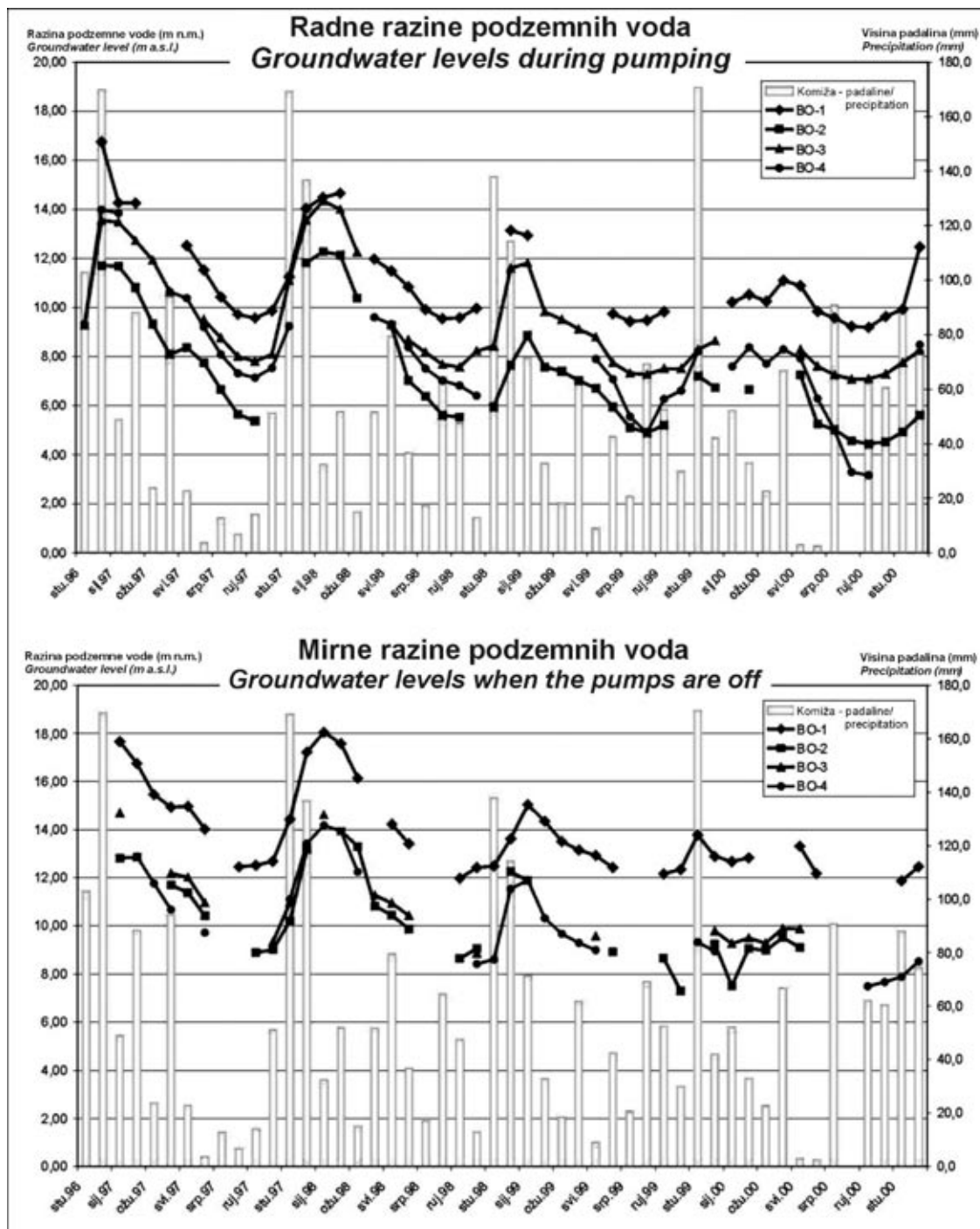
Izražena su sezonska kolebanja razina podzemne vode (Sl. 2), s minimumima u kolovozu – rujnu i maksimumima u siječnju. Vodonosnik se obnavlja već nakon rujna, a maksimalno je napajanje u prosincu i siječnju kada su i najobilnije oborine. U recesijskom dijelu krivulja uočljivi su manji maksimumi kao trenutne reakcije na obilnije oborine u proljetnom razdoblju. Na temelju toga moguće je zaključiti kako je infiltracija u okolici zdenaca brza. Međutim, također je uočljiv podjednak nagib recesijskih krivulja kroz razmatrano vrijeme, iako je početna točka prije recesije varirala. Promatranjem razina voda u zdencima uočljivo je kako kolebanje u pravilu premašuje 4 m (Sl. 2). Prema hidrochemijskim analizama određeno je kako je riječ o istovrsnoj podzemnoj vodi (Sl. 4). Moguće je zaključiti kako se jedinstveni viški vodonosnik sastoji od više propusnih pukotinskih i kavernočnih cjelina, koje su međusobno povezane sustavima pukotina i prslina. Veze između pojedinih cjelina su raznovrsne i usporavaju kretanje podzemnih voda, a njihovi odnosi održavaju stalni hidraulički kontinuitet. Slična su iskustva zabilježena i na drugim krškim lokalitetima (Urumović, 2000; Motyka, 1998).

U ovakvim otočkim vodonosnim sustavima vrlo je bitan makar i orijentacijski izračun bilance podzemnih voda. Poseban je problem nepoznavanje uvjeta na jednome od najznačajnijih rubnih uvjeta: dodiru slatke i slane vode, tj. zoni miješanja, a i praktično je nemoguće kvantitativno izraziti količine vode koje se "izgube" procjeđivanjem i raspršenim izviranjem na rubovima vodonosnika, u zonama gdje nema izvora u obliku koncentriranih tokova. U ovakvim terenima je prikladnije pretpostaviti postotak efektivne infiltracije nego izračunavati ga raznim iskustvenim formulama koje nisu primjerene za ove uvjete. Obično se pretpostavlja srednja visina efektivne infiltracije za ovakve krške terene oko 40%.

U tom je slučaju količina efektivne infiltracije I_e (m^3 /godišnje):

$$I_e = 0,4 \cdot A \cdot P \quad (1)$$

Gdje A (m^2) predstavlja površinu slijeva, a P prosječne oborine ($m^3/m^2/god$). Za relevantnu hidrometeorološku postaju Komiža visina oborine u razmatranom razdoblju iznose 668 mm/god, što znači da je $P = 0,67 m^3/m^2/god$. Slijevna površina $A = 23158165 m^2$. Uvrste li se te vrijednosti u izraz (1) dobivamo $I_e = 6,2 \cdot 10^6 m^3/god$, što predstavlja ukupne ulazne količine u viški vodonosnik, budući da ne postoji niti površinska hidrografija, niti umjetna napajanja bilo kakve vrste.



Slika 2. Razine podzemnih voda u razdoblju od 1996.-2000. godine u ovisnosti o količini oborina. Radne razine – pri uključenim crpkama, mirne – kad crpke ne rade.

Figure 2. Groundwater levels from 1996 to 2000 in relation with the amount of precipitation. Groundwater levels during pumping and groundwater levels when the pumps are off.

Zamršenija su pitanja kod postavljanja parametara otjecanja. Možemo ih opisati jednadžbom:

$$V_I = D + V_p + V_K + O \quad (2)$$

Gdje je V_I - ukupni izlazni volumen (m^3/god); D

- gubici zbog procjeđivanja na rubovima vodonosnika (m^3/god); V_p - istjecanje na izvoru Pizdica (m^3/god); V_K - crpljenje na crpilištu Korita (m^3/god); O - istjecanje na manjim priobalnim izvorima (m^3/god). Ako pretpostavimo da se tijekom cijele godine neprestano crpi 25 l/s na vodocrpilištu Korita, tada $V_K = 1,3 \cdot 10^4 m^3/god$;

ako na izvoru Pizdica istječe u prosjeku 6 l/s, tada je $V_p = 3,2 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{god}$. Pretpostavlja se da po rasjedima na ostale male izvore od Velog Žala do Gusarice iz ovog sustava isteče još toliko, tada je i $O = 3,2 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{god}$, tj.: $V_1 = D + 1,94 \cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{god}$.

Moguće je pretpostaviti da se kroz više desetljeća crpljenja na Visu uspostavila ravnoteža ulaznih i izlaznih komponenta kroz duži vremenski period. Znači, možemo pisati da je promjena zaliha podzemnih voda ništavna, dakle:

$$\Delta W = I_e - V_1 = 0 \quad (3)$$

Iz čega se posredno može izračunati količina vode koja se gubi procjeđivanjem izvan koncentriranih tokova, tako da $D = 6,18 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{god}$; što u stvari predstavlja čak 99,7% ukupnih izlaznih količina. Dakle, crpne količine na crpilištu Korita zajedno s istjecanjem na svim izvorima zapravo su vrlo niske u odnosu na gubitke do kojih dolazi zbog procjeđivanja izvan registriranih koncentriranih tokova. To znači da je u ovakvom hidrogeološkom sustavu najznačajniji problem dodira slatke i slane vode, kao i pitanje godišnje obnove zaliha podzemnih voda. Iz toga proizlazi pretpostavka da i značajno povećanje crpnih količina u odnosu na današnje najvjerojatnije ne bi bitno utjecalo na bilancu voda pa tako niti na zaslanjenje u zdencima. Naravno, izvodivost bitnoga povećanja crpnih količina povezana je i s pitanjima raspodjele propusnosti naslaga u i izvan područja postojećih zahvata.

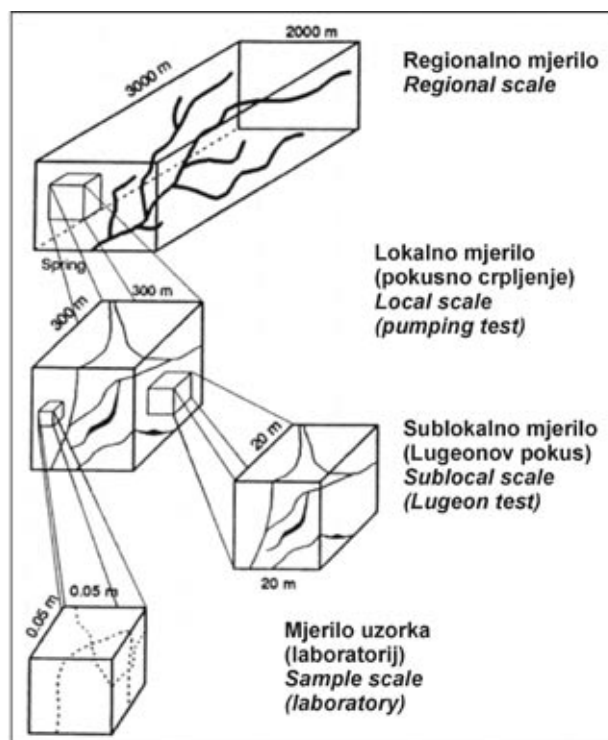
Hidraulička svojstva stijenskih masa

Prema tvrdnjama brojnih autora, izračuni utemeljeni na Darcyevom zakonu do određene su granice primjenjivi i na okršenu stijensku masu (Ford & Williams, 1989; Milanović, 1981; Urumović, 2000, 2003; Motyka, 1998; White, 2002; Kiraly 1975). Odabir metode najviše ovisi o mjerilu promatranih pojava. Na slici 3 prikazan je jedan od pristupa podjele mjerila promatranja okršene stijenske mase s najboljim metodama za izračun parametara (Sauter, 1992).

Na vodonosnu stijensku masu zahvaćenu zdencima i bušotinama na Visu primijenjen je izračun sukcesivnim nizom stacionarnih stanja (Thiemova metoda), budući da su postojali jedino podaci pokusnih crpljenja (Krznar, 1968, 1989) s mjerenjima sniženja samo u crpljenom zdencu. Budući da se vodonosnik promatra kao otvoreni, umjesto vrijednosti sniženja koje su izmjerene uvodimo ekvivalentno sniženje (Hantush, 1964), prema jednadžbi:

$$s^* = s - \frac{s^2}{2h_0} \quad (4)$$

Gdje "s*" predstavlja ekvivalentno sniženje, "s" izmjereno sniženje, a "h₀" inicijalnu debljinu saturiranosti otvorenog vodonosnika. Pri crpljenju količinom "Q"



Slika 3. Mjerilo proučavanja i metode odredbe hidrauličkih parametara u krškim sustavima (Sauter, 1992).

Figure 3. Research scale and methods for the hydraulic parameters determination in karstified systems (Sauter, 1992).

dolazi do radijalnog toka podzemne vode prema zdencu. Zdenac promatramo kao valjak na čijem oplošju voda sa svih strana dolazi okomito na valjak. U ovakvom sustavu parametri se određuju prema izrazu:

$$s^* = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R_0}{r_z} \quad (5)$$

Tu "Q" predstavlja crpnu količinu, "T" transmisivnost, "R₀" fiktivni polumjer utjecaja zdenca, i "r_z" efektivni polumjer zdenca. Granične vrijednosti R₀ i r_z treba pretpostaviti. Pošto se njihov odnos u jednadžbi (5) nalazi u logaritmu, pogreška u pretpostavljanju tih dviju vrijednosti biti će matematičkim putem umanjena, tako da neće utjecati na red veličine dobivenih hidrauličkih parametara. Kod konkretnih slučajeva, moguće je pretpostaviti iznos R₀ oko 200m. Efektivni polumjer zdenca (r_z) ovisi o tehničkoj izvedbi zdenca, procesima ispiranja ili zamuljivanja vodonosnika u neposrednoj blizini bušotine. U razmatranim primjerima opravdano je za vrijednost efektivnog polumjera zdenca uzeti polumjer same bušotine. Izračunate vrijednosti transmisivnosti i hidrauličke vodljivosti raspucane karbonatne mase otoka Visa prikazane su u tablici 1, i one uz sva ograničenja

ukazuju na brojne zaključke o viškome vodonosniku. Klasifikacije stijena prema hidrauličkoj vodljivosti koje je moguće naći u postojećoj literaturi (Freeze & Cherry, 1979), smještaju okršene vapnence u raspon od 10^{-2} do 10^{-6} m/s, a dolomitične vapnence od 10^{-5} do 10^{-9} m/s. Dobiveni rezultati, dakle, ne odstupaju od literaturnih navoda. Također, na dubini koja se kreće u rasponu od nekoliko desetaka metara ispod današnje razine mora pretpostavlja se relativno nepropusna podloga, koja je nastala zapunjavanjem pukotinsko-kavernskih prostora sekundarnim (uglavnom sitnozrnatim) materijalom. Taj je proces prisutan u svim dijelovima terena, a najizraženiji je u području krških polja.

Kako je vidljivo u tablici 1, postojeći podaci podijeljeni su unutar tri sredine za koje se i prije izračuna pretpostavljalo kako su različite u hidrogeološkom smislu. Jedno od većih ograničenja predstavlja relativno mali broj bušotina i mogućnost da nisu locirane u reprezentativne dijelove terena. Međutim, budući da nema elemenata koji bi upućivali ne izrazito kanalske uvjete toka, i ovaj se broj bušotina može prihvatiti kao reprezentativan. Tako je karbonatnu stijensku masu na otoku Visu moguće podijeliti u tri skupine koje se razlikuju prema redu veličine hidrauličke vodljivosti. To su:

- područje krških polja, zapunjena stijenska masa;
- pretežito dolomitične stijene i
- okršeni vapnenci.

Također, tijekom izračunavanja se zapaža blago sniženje vrijednosti transmisivnosti (odnosno hidrauličke vodljivosti) s povećanjem crpne količine i rezultirajućim značajnijim padom razine podzemne vode (odnosno odvodnjavanjem vodonosnika). To upućuje na postupno

opadanje propusnosti naslaga s dubinom. Ta činjenica dodatno podupire pretpostavku o sekundarnom zapunjavanju okršenog podzemlja sitnozrnatim materijalom, prvenstveno glinovito – prahovitim česticama tla, ali i pjeskovitim česticama koje nastaju trošenjem dolomita. Dakle, otok Vis može se promatrati kao hidrogeološka sredina za koju i u regionalnom mjerilu (Sl. 3) vrijede hidrauličke zakonitosti zasnovane na Darcyevom zakonu, naravno, uz određena ograničenja. Za područja na kojima nisu razvijena krška polja vrijednosti vodopropusnosti variraju između onih nižih, izmjerenih na zdencu K-1, čije se hidrauličke vodljivosti kreću u redu veličine oko $K = 1$ m/dan, do maksimalnih u području crpilišta “Korita” gdje su vrijednosti K od oko 2 do 5 m/dan, što je zapravo unutar istog reda veličine. Nešto su veće razlike u transmisivnostima između tih zdenaca, što je i logično, jer se BO-5 nalazi praktički u sredini otoka, gdje je vodonosnik najdeblji (u prirodnim uvjetima). Tako u vrijednostima transmisivnosti dolazi do razlike u redu veličine između tih dvaju zdenaca, pa je propusna moć vodonosnika u području crpilišta “Korita” za red veličine viša od one kod zdenca K-1. U području ispod krških polja vrijednosti se snižavaju zbog pojačanih procesa prekomjernog zapunjavanja šupljina i znatno su nižeg reda veličine. Vrijednosti hidrauličke vodljivosti variraju od oko 0,1 do 0,3 m/dan. Time je opravdana i početna pretpostavka prema kojoj je u toj zoni postavljena relativna barijera i razvodnica s hidrauličkim kontinuumom, tj. razvodnica unutar poroznog medija, a uvjetovana je smanjenjem vrijednosti propusnosti za cijeli red veličine. Zbog toga su u njenom pojasu razine vode najviše.

Tablica 1. Raspodjele transmisivnosti i hidrauličke vodljivosti triju tipičnih cjelina karbonatnog vodonosnika otoka Visa, u rasponima.

Table 1. Transmissivity and hydraulic conductivity for three typical parts of the island of Vis karstified aquifer, in ranges.

PARAMETAR PARAMETER	KRŠKA POLJA - ZAPUNJENA STIJENSKA MASA KARST FIELDS – FILLED ROCK MASS			PRETEŽITO DOLOMITIČNE STIJENE – MOSTLY DOLOMITIC ROCKS	OKRŠENI VAPNENCI – KARSTIFIED LIMESTONES
	VELO POLJE VP-2	PLISKO POLJE PP-1	DRAČEVO POLJE DP-1	K-1	BO-5
T (m ² /s)	(3,5 – 4,5) * 10 ⁻⁵	6 * 10 ⁻⁵ – 1,2 * 10 ⁻⁴	(2,6 – 3,1) * 10 ⁻⁵	(3,0 – 4,6) * 10 ⁻⁴	9 * 10 ⁻⁴ – 2,3 * 10 ⁻³
K (m/s)	9,5 * 10 ⁻⁷ – 1,2 * 10 ⁻⁶	(1,5 – 3,5) * 10 ⁻⁶	(1,0 – 1,5) * 10 ⁻⁶	(1,0 – 1,2) * 10 ⁻⁵	(2,3 – 4,9) * 10 ⁻⁵
T (m ² /dan)	3 – 3,8	8 – 12,5	2 – 2,7	26 – 40	80 – 200
K (m/dan)	0,08 – 0,1	0,15 – 0,3	0,08 – 0,13	0,85 – 1,1	2,0 – 4,4

Fizikalno kemijske značajke podzemnih voda

Osnovno pitanje kada se govori o hidrogeokemiji krških otoka jest miješanje slatke i slane vode, tj. udjel slane vode u vodonosniku. Podrijetlo takvog saliniteta može biti rezultat različitih prirodnih i antropogenih utjecaja. Najčešći slučajevi su miješanje s morskom vodom, zaslanjenje s površine terene zbog utjecaja vjetrova, zatim čak i miješanje sa starom ili izoliranom morskom vodom, a prostorno ograničeni slučajevi posljedica su nazočnosti evaporita (gips, anhidrit) u litološkom sastavu krških vodonosnika. Pretjerana eksploatacija podzemne vode u priobalnim i otočkim vodonosnicima, poljoprivredna djelatnost uz korištenje mineralnih gnojiva i navodnjavanje mogu biti uzrok antropogenog povećanja saliniteta podzemnih voda. Tijekom istraživačkih radova 1999. i 2000. godine (Kapelj, J. et al., 2001) načinjene su kemijske analize ionskog sastava podzemnih voda na dva skupa uzoraka, u vrijeme hidrološki niskih i visokih voda. Na slici 4 prikazani su Piperovi dijagrami prema kojima se vide hidro-kemijski facijesi kojima pripadaju podzemne vode na otoku Visu.

Krugovi oko simbola na Piperovim dijagramima (Sl. 4) označavaju vrijednost ukupno otopljene krute tvari (TDS - engl. "total dissolved solids"). Razmatranjem Piperovih dijagrama može se zaključiti kako najveći dio podzemnih voda otoka Visa pripada kalcijsko – karbonatnom facijesu. Neki uzorci, posebno u zimskom razdoblju, nemaju prevladavajući kation. Vidljivo je kako uzorci s izvora Pizdica i bušotine Velo Žalo predstavljaju poseban, natrijsko – kloridni facijes. Kada se obrati pozornost na prostorni smještaj Pizdice i Velog Žala, uočljivo je da se upravo u tome dijelu terena vjerojatno

odigrava glavni prodor morske vode u vodonosnik, a kemijski sastav i mineralizacija uzoraka upućuju na to da je riječ o pojasu miješanja slatke i slane vode. Dakle, u prostoru između dviju hidrogeoloških barijera, gdje karbonatni vodonosnik ulazi u more, dolazi s jedne strane do priobalnog istjecanja slatke vode (izvor Pizdica), a iz smjera mora do formiranja klina slane vode i prijelaznih zona u dubljim slojevima. Razmatrajući hidro-kemijske facijese (Sl. 4) te vrijednosti pojedinih aniona i kationa na različitim lokacijama (Tabl. 2) može se zaključiti kako do podzemnog miješanja dolazi u obalnim područjima, dok u središnjem dijelu otoka nema prodora morske vode. Salinitet na tim lokacijama najvjerojatnije je posljedica vjetrom nanosene posolice. Tome u prilog idu i više vrijednosti klorida na nekim uzorcima u zimskom nego u ljetnom razdoblju.

Postotak morske vode u svakom uzorku moguće je izračunati metodom "jednostavnog miješanja" (engl. "conservative mixing"), koja je detaljno opisana u literaturi (Appelo & Postma, 1994). Osnovna formula ovoga izračuna je:

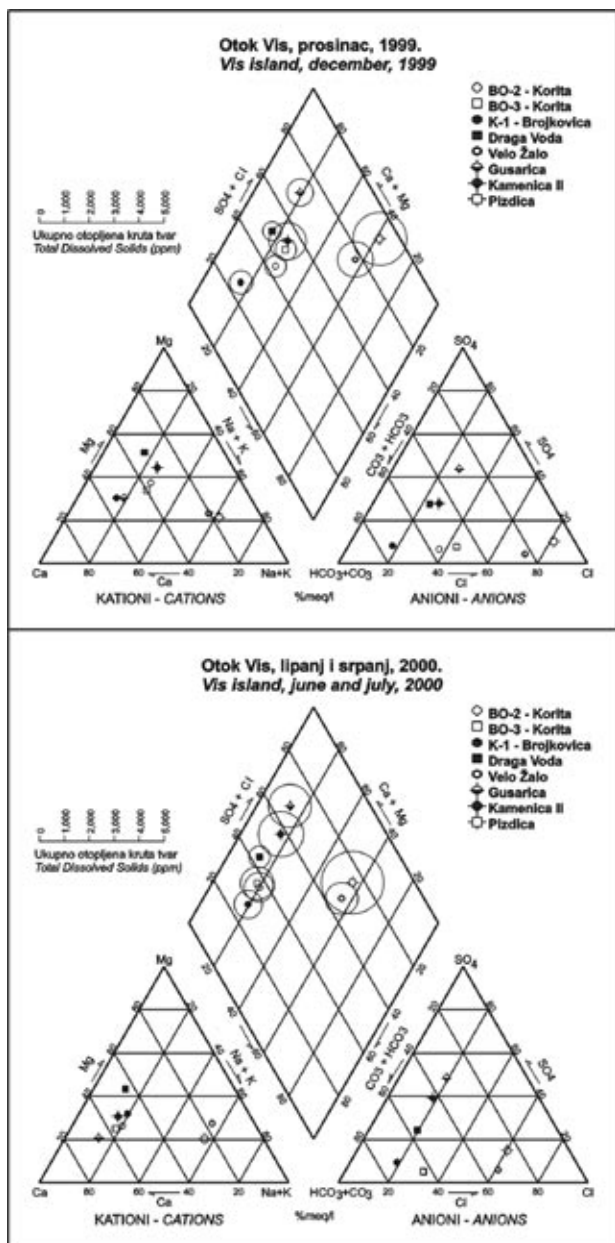
$$m_{i,mješ} = f_{more} \cdot m_{i,more} + (1 - f_{more}) \cdot m_{i,slatka} \quad (6)$$

Gdje je: m_i - koncentracija iona "i" [mmol/l], f_{more} - udio morske vode u miješanoj vodi [-], a indeksi $m_{i,mješ, more, slatka}$ - znače redom: mješavina, morska voda, slatka voda. Udio morske vode f_{more} utemeljen je na koncentraciji klorid iona Cl⁻. Za klorid je pretpostavljeno kako je konzervativni (nereaktivni) parametar.

Tablica 2. Rezultati kemijskih analiza ionskog sastava podzemnih voda otoka Visa (mg/l) (Kapelj et al., 2001).

Table 2. Results of chemical analysis of the ion composition of the Vis aquifer groundwaters (mg/l) (Kapelj et al., 2001).

Lokacija Location	prosinac, 1999. december, 1999							lipanj i srpanj, 2000. june and july, 2000						
	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca	Mg	Na	K
BO-2, Korita	214	82	20	45	28	36	1,3	320	92	20	91	27	38	1,39
BO-3, Korita	188	98	24	50	26	37	1,2	361	104	23	109	29	39	1,34
K-1	288	40	25	70	24	22	2,59	331	50	34	76	30	33	2,5
Draga Voda	164	44	72	35	34	20	0,91	210	42	71	55	33	18	0,97
Velo Žalo	156	290	24	49	34	153	5,14	199	214	28	35	34	127	5,7
Gusarica	145	76	170	83	30	34	1,83	245	84	290	168	32	38	2,36
Kamenica II	332	112	160	53	47	49	1,87	331	82	240	146	51	50	1,7
Pizdica	92	530	90	61	46	245	9,31	298	418	140	90	47	241	9,66



Slika 4. Prikaz hidrogeokemijskih podataka s otoka Visa Piperovim dijagramima.

Figure 4. The Piper diagram presentation of the hydrochemical data.

Svaka promjena koncentracije $m_{i,reak}$ koja je rezultat kemijskih reakcija, a ne miješanja slatke i slane vode, je:

$$m_{i,reak} = m_{i,uzorak} - m_{i,slatka} \quad (7)$$

$$f_{more} = \frac{m_{Cl^-,uzorak} - m_{Cl^-,slatka}}{m_{Cl^-,more} - m_{Cl^-,slatka}} \quad (8)$$

Ako je more jedini izvor kloridnih iona, tada je $m_{Cl^-,slatka} = 0$. Također, koncentracija klorida u morskoj vodi

iznosi oko 35‰, što iznosi približno 570 mmol/l. Takva koncentracija klorida može se smatrati konstantom u svim oceanima na svijetu. Iz toga slijedi odnos:

$$f_{more} = \frac{m_{Cl^-,uzorak}}{570} \quad (9)$$

Na temelju ovakvih izračuna u tablici 3 su prikazani postotni udjeli morske vode u svim uzorcima s otoka Visa. Budući da nema podataka za kišnicu na otoku Visu, a također niti za čistu morsku vodu, za potrebe ovoga rada moguće je prihvatiti vrijednosti kemijskog sastava morske vode koje se preporučuju u relevantnoj svjetskoj literaturi (Appelo & Postma, 1994). Za kemijski sastav kišnice bolje je preuzeti vrijednosti korištene prilikom hidrogeokemijskih istraživanja na otoku Cresu (Kapelj, S., 1997).

Izračunom metodom jednostavnog miješanja dodatno je potkrijepljena teza da je glavni pravac prodora mora u unutrašnjost otoka upravo u zonama najvećeg istjecanja. Također, uočava se kako su na nekim lokacijama udjeli slane vode u podzemnoj vodi viši u zimskom nego u ljetnom razdoblju. Do toga dolazi vjerojatno zbog toga što u zimskom razdoblju dolazi do dodatnog zaslanjenja zbog kapljica donesenih vjetrovima.

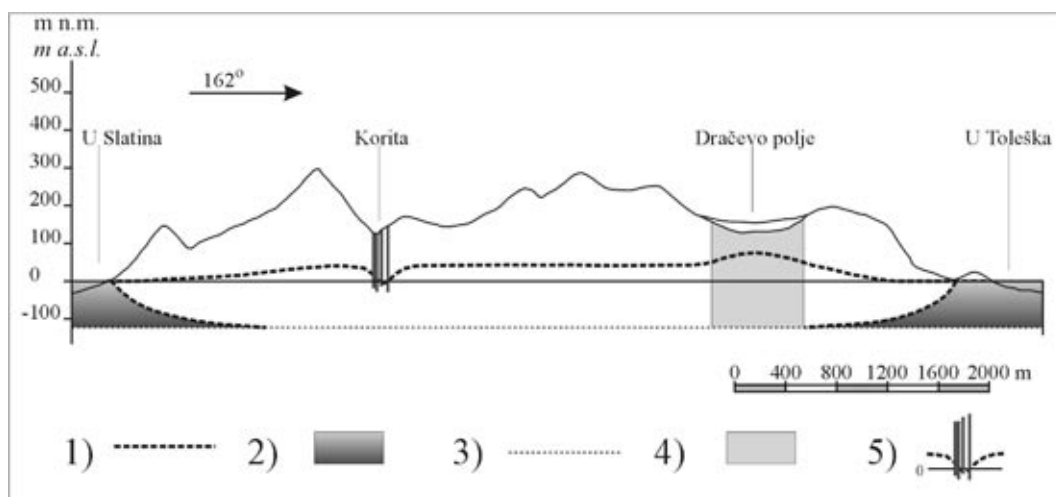
Konceptualni model viškoga vodonosnika

Na temelju svih podataka moguće je postaviti pojmovni model Viškog vodonosnika. Budući da nema podataka o podzemnom zaslanjenju u unutrašnjosti otoka, a na priobalnim izvorima pojavljuju se povišene vrijednosti klorida, opravdana je pretpostavka da se na određenoj dubini, od nekoliko desetaka metara ispod današnje razine mora nalazi relativno nepropusna podloga. Na toj je dubini ili slabiji intenzitet okršavanja ili je stijenska masa zapunjena sekundarnim materijalom. Ako se uzme u obzir da je tijekom kvartara razina mora bila znatno niža od današnje (Šegota, 1968), opravdanije je govoriti o zapunjavanju pukotinskih i kavernih prostora sekundarnim materijalom, čije je podrijetlo najvećim dijelom glinovito-prahovita crvenica, ali i pjeskoviti produkt raspadanja pretežito dolomitnih stijena. S druge strane, kada se govori o hidrogeologiji otoka, nemoguće je zaobići Ghyben-Herzbergov zakon (Ghyben 1888; Herzberg 1901). Budući da ne postoje podaci koji ukazuju na protezanje slane morske vode ispod cijele površine Visa, može se ustvrditi kako na Visu nije riječ o postojanju slatkovodne leće ispod koje se nalazi slana voda, nego o vodonosniku s relativno nepropusnom podlogom (Sl. 5). Morska se voda poput klina proteže u unutrašnjost otoka, s raznolikom duljinom prodiranja. Što su naslage propusnije, to je moguć dublji prodor morske vode i obratno, pa se tako intruzije slane vode najdublje u unutrašnjosti otoka očekuju po zonama najvažnijih rasjeda strukturnog sklopa (Sl. 1).

Tablica 3. Udio morske vode na pojedinim istraživanim lokacijama otoka Visa.

Table 3. Sea water ratio on groundwater samples from Vis.

Lokacija Location	prosinac, 1999. December, 1999		lipanj i srpanj, 2000. June and July, 2000	
	$m_{Cl, \text{uzorak}}$ mmol/l	f_{more} %	$m_{Cl, \text{uzorak}}$ mmol/l	f_{more} %
BO-2, Korita	2,3129	0,41	2,5950	0,46
BO-3, Korita	2,7642	0,49	2,9335	0,52
K-1	1,1283	0,20	1,4103	0,25
Draga Voda	1,2411	0,22	1,1847	0,21
Velo Žalo	8,1799	1,45	6,0362	1,07
Gusarica	2,1437	0,38	2,3694	0,42
Kamenica II	3,1591	0,56	2,3129	0,41
Pizdica	14,9495	2,64	11,7904	2,08



Slika 5. Poprečni profil sa shematiziranim prikazom razine podzemne vode i dodirne plohe mora i slatke vode u podzemlju. 1-granica vodonosnika; 2-klin morske vode; 3-pretpostavljena razina okršavanja (nepropusna podloga je zapravo još pliće); 4-relativna barijera ispod krških polja; 5-konus depresije na crpilištu Korita.

Figure 5. Cross section with schematized groundwater level and fresh/salt water contact. 1-aquifer boundary; 2-seawater wedge; 3-presumed karstification level (impermeable base rock is closer to surface); 4-relative barrier underneath the karst poljes; 5-depression cone on pumping site Korita.

Dubina prodora klina morske vode obrnuto je proporcionalna otjecanju slatke podzemne vode prema morskoj obali (Urumović, 2000), pa bi eventualno prekomjerno povećanje eksploatacije podzemnih voda u sušnim razdobljima moglo uzrokovati bitno širenje prodora morske vode, a pogotovo duž rasjedne zone (okomito na profil sl. 5, kroz zonu rasjeda R4 na sl. 1).

Zaključci

Rezultati hidrogeokemijske analize uzoraka vode prikazani u obliku hidrogeokemijskih facijesa na Piperovim dijagramima jednoznačno upućuju da je glavni pravac miješanja slatke i slane vode u zoni od izvora Pizdica prema istoku (bušotina Velo Žalo). Ti

su rezultati potvrđeni i metodom izračuna odnosa pri jednostavnom miješanju slatke i slane vode. Taj glavni pravac slijedi zonu rasjeda koja je strukturnogeološkom razradom ocijenjena kao glavni drenažni pravac viškog vodonosnika.

Interpretacijom podataka pokusnih crpljenja određene su približne vrijednosti hidrauličkih parametara stijenske mase ovog vodonosnika. Prema raspodjeli veličina hidrauličke vodljivosti izdvojene su tri cjeline s karakterističnom propusnosti vodonosnika.

Izračun bilance voda na Visu ukazuje na neke zaključke, koji su u skladu s ostalima. Izračunato je kako na crpilištu Korita i svim registriranim izvorima iz podzemnog vodonosnog sustava izlazi tek nešto ispod 1% količina godišnje efektivne infiltracije. To znači da preko 99 % vode izlazi iz vodonosnika procjeđivanjem izvan poznatih mjesta koncentriranih izviranja i kemijskim miješanjem sa slanom morskom vodom. Ovi su rezultati u skladu s prostornim rasporedom najpropusnijeg geološkog člana, senonskih rudistnih vapnenaca, koji se nalaze u dvije relativno uske zone na krajnjem sjeveru i jugu otoka. Ti su vapnenci izrazito okršeni i vrlo propusni, a pošto se nalaze u zonama uz more, oni zapravo sakrivaju mjesta koncentriranih izviranja podzemnih voda.

Kao model viškog vodonosnika prihvaćena je situacija na slici 5, tj. na temelju svih spoznaja moguće je zaključiti kako morska voda formira klin u podzemlju, ali ne prodire cijelom površinom ispod otoka, jer je na dubini od nekoliko desetaka metara ispod razine mora identificirana relativno nepropusna podloga. Zbog toga na crpilištu Korita nema značajnijeg udjela slane vode, iako je intenzivno crpljenje u tijeku od šezdesetih godina prošlog stoljeća. Ipak, u slučaju kada bi se povećale eksploatacijske količine i proširilo područje eksploatacije podzemnih voda, nije isključena mogućnost prodora slane vode dublje u unutrašnjost otoka po glavnim rasjednim pravcima.

Ipak se, na temelju ovdje prikazanih rezultata, može očekivati da je na otoku Visu izvedivo znatno povećanje crpnih količina, te time rješavanje povećanih potreba vodoopskrbe. To bi se moglo ostvariti ili povećanjem crpnih količina na vodocrpilištu Korita ili bušenjem novih zdenaca. I jednu i drugu pretpostavku trebalo bi vrlo podrobno istražiti.

Konačno, na temelju iskustava s otoka Visa moguće je zaključiti kako je pri izučavanju hidrogeologije na otocima izgrađenim od okršenih karbonatnih stijena neophodno:

□ temeljito proučiti prostorni raspored naslaga, tj. prostor u kojem se događa infiltracija, nakupljanje i istjecanje podzemnih voda, s posebnim naglaskom na strukturnogeološka istraživanja uz izdvajanje rasjednih zona, tj. zona povišene hidrauličke vodljivosti koje usmjeravaju istjecanje podzemnih voda, ali i prodor slane morske vode u unutrašnjost;

□ proučiti vodnu bilancu, makar i u orijentacijskom smislu;

□ analizirati hidraulička svojstva stijenske mase ukoliko je moguće, te ocijeniti stupanj pogodnosti postojećih podataka;

□ u sklopu hidrogeokemijske razradbe posebnu pozornost treba posvetiti utjecaju mora i analizi zona miješanja slatke i slane vode.

Primljeno: 10.7.2004.

Prihvaćeno: 11.9.2004.

LITERATURA

- Appelo, C. A. J. & Postma, D. (1994): Geochemistry, groundwater and pollution. A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield. ISBN 90 5410 105 9. Pg. 536.
- Bagarić, I., Linčir, P. & Novosel, T. (1997): Istraživanje mogućnosti vodoopskrbe otoka Visa iz postojećeg crpilišta podzemne vode "Korita", Institut građevinarstva hrvatske, Zavod za hidrotehniku, Zagreb.
- Borović, I., Marinčić, S. & Majcen, Ž. (1977): Osnovna geološka karta, List Vis, Beograd.
- Crnolatac, I. (1953): Geologija otoka Visa, Zavod za geološka istraživanja, Zagreb, 1953.
- Donati, V. (1750): Saggio della storia naturale dell' Adriatico, Venezia.
- Ford, D. & Williams, P. (1989): Karst geomorphology and Hydrology. Pg. 601, Chapman & Hall, London.
- Fortis, A. (1776): Viaggio in Dalmazia. Venezia.
- Freeze, R. A. & Cherry, J. A. (1979): Groundwater, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, pg. 604, New Jersey, USA.
- Fritz, F. (1989): Otok Vis, mogućnosti površinskog uskladištenja vode, Arhiv Instituta za geološka istraživanja, Zagreb.
- Ghyben, W. B. (1888): Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam. The Hague, Netherlands, Tijdschrift van Let Koninklijk Instituut van Ingenieurs, p. 8-22.
- Hantush, M. S. (1964): Hydraulics of Wells, in V. T. Chow (ed) "Advances in Hydroscience", 1, Academic Press, Inc., 281-432, New York.
- Herzberg, A. (1901): Die Wasserversorgung einiger Nordseebader. Wasserversorgung, v. 44, p. 815-819 and p. 842-844.
- Ivičić, D. (1997): Hidrogeološka studija dalmatinskih otoka, Arhiv Instituta za geološka istraživanja, Zagreb.
- Kapelj, J., Kapelj, S. & Terzić, J. (2001): Crpilišta pitke vode na otoku Visu – rezultati hidrogeoloških istražnih radova provedenih tijekom 1999 i 2000 godine – preliminarni izvještaj. Fond IGI br. 57/01.
- Kapelj, S. (1997): Hidrogeokemijske značajke Vranskog jezera na otoku Cresu. Disertacija. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – geološko – naftni fakultet. Str. 96. Zagreb.
- Kiraly, L. (1975): Rapport sur l'etat actuel des connaissances dans le domaine des caracteres physiques des roches karstiques. In Hydrogeology of karstic terrains. A. Burger & L. Dubertret (eds), 53-67. Internat. Union Geol. Sci., Series B, 3.
- Koch, G. & Belak, M. (2003): Evaporitic-carbonate deposits of Komiža diapiric structure (Island of Vis, Croatia): their palynostratigraphy and sedimentological features. 22nd IAS Meeting of Sedimentology. Abstract book. Opatija.
- Kordek, S. (1997): Vodovodni sustav na otoku Visu - analiza postojećeg stanja, Institut građevinarstva hrvatske, Zavod za hidrotehniku, Zagreb.
- Krznar, J. (1968): Elaborat o izvršenim ispitivanjima na pumpnoj stanici K-1a u Komiži, Geotehnika, Zagreb.
- Krznar J. (1989): Elaborat o izvedbi istražno – eksploatacijskih bunara BO-6 i BO-7 (Korita – otok Vis), Geotehnika, Zagreb.
- Mamužić, P. (1964): Geologija Viško – Lastovskog otočja, Institut za geološka istraživanja, Fond. struč. dok., Zagreb.
- Milanović, P. T. (1981): Karst hydrogeology. Water resources publications. Pg. 434. Colorado, USA.

- Motyka, J. (1998): A conceptual model of hydraulic networks in carbonate rocks, illustrated by examples from Poland. *Hydrogeology Journal*, vol. 6, no. 4, pg. 469-482.
- Poljak, J. (1953): Geološki i hidrogeološki izvještaj o otoku Visu, Zavod za geološka istraživanja, Zagreb.
- Prelogović, E., Pribičević, B., Dragičević, I., Buljan, R & Tomljenović, B. (2001): Recentni strukturni sklop prostora Dinarida. Fond str. dok. INA – naftaplin, Zagreb.
- Salopek, M. (1926): O razvoju trijasa na otoku Visu, I. dio, *Geografski vestnik*, Ljubljana.
- Salopek, M. (1939): O tektonskom okviru trijasa u Komiškom zalivu, rad JAZU, knjiga 263, 113-138, Zagreb.
- Sauter, M. (1992): Quantification and forecasting of regional groundwater flow and transport in a karst aquifer (Gallusquelle, Malm, SW Germany). *Tubinger Geowissenschaftliche Arbeiten, Part C*, (13), 151.
- Šarin, A. & Prvanović, M (1963). Pregled geologije sjevernog dijela otoka Visa – preliminarni izvještaj. Arhiv Geotehnike. Zagreb.
- Šegota, T. (1968): Morska razina u holocenu i mladem Würmu, *Geografski glasnik*, 30, 15-39, Zagreb.
- Šušnjar, M. (1967): Stratigrafska i strukturna problematika otoka Visa, *Geološki vjesnik* 20, 175 – 189, Zagreb.
- Terzić, J. (2003): Hidrogeološki odnosi otoka Visa. Magistarski rad. Rudarsko – geološko – naftni fakultet, 106 str., Zagreb.
- Urumović, K. (2000): Uvjeti prodora morske vode u krški vodonosnik pulskih zdenaca, 2. hrvatski geološki kongres, Cavtat – Dubrovnik, Zbornik radova, 815-820, Zagreb.
- Urumović, K. (2003): Fizikalne osnove dinamike podzemnih voda. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet. ISBN 953-6923-01-7. 318 str. Zagreb.
- Vranješ, M. & Bojanić, D. (1998): Projekt vodomjerenja vodozahvata Dalmacije – vodovod Vis, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split.
- White, W. B. (2002): Karst hydrology: recent developments and open questions. *Engineering geology* 65, pg. 85-105. Elsevier science.