

## UTJECAJ RECENTNOG OKRŠAVANJA NA ZAHVAĆANJE VODA

Franjo FRITZ

Ovaj rad posvećen je nedavno umirovljenom **Borisu Pavlinu**, dipl. ing. građ., koji je cijeli svoj radni vijek projektirao zahvate površinskih i podzemnih voda u krškim terenima

**Ključne riječi:** Krš, recentno okršavanje, hidrogeologija krša, vododrživost dolina u kršu, zahvati podzemnih voda.

**Key words:** Karst, recent karstification, karst hydrogeology, storage bottom leakage, groundwater intakes.

Na primjeru triju morfološki različitih krških terena ukazuje se na korisnost proučavanja razvitka recentnog reljefa i okršavanja. Koristeći te podatke (uz ranije izvedena geološka i hidrogeološka kartiranja i obradu podataka) znatno je dopunjeno znanje o mogućnostima ostvarenja nekih površinskih akumulacija i pristupilo se je veoma uspješnim zahvatima krških podzemnih voda.

The usefulness of studying the morphological evolution of recent relief and karstification is demonstrated by three morphologically different karst terrains. Using the results of these studies, as well as earlier geological and hydrogeological mapping, the knowledge about construction feasibilities of several storage basins has been considerably improved. It has also contributed to bringing about very successful intakes of karst groundwater.

### 1. PROBLEMATIKA ISTRAŽIVANJA

Nakon što su provedeni geološki, hidrogeološki i neotektonski istražni radovi u krškim terenima često ostaje još uvijek dosta otvorenih pitanja kako o mogućnostima zahvaćanja podzemne vode tako i o stupnju vododrživosti doline ili pojedinih njenih dijelova. Posebno se to odnosi na terene koje izgrađuju samo vapnenačke stijene. U takovim terenima i nakon spomenutih istražnih radova ima često premalo podataka potrebnih za projektna rješenja. U navedenim okolnostima svaki dopunski podatak, čak i pretpostavka, su veoma dobro došli, pa se sve naglašenije ukazuje potreba za proučavanjem razvitka reljefa (geneze) čime se često dobiju veoma korisna dopunska saznanja. U praksi ovi radovi su dosad izvođeni za potrebe hidroenergetike ili radi zahvaćanja većih količina vode za piće.

Kao i u ostalim terenima i u kršu razvitak reljefa ovisi prvenstveno o litološkoj građi terena. U tom pogledu u Dinarskom kršu treba razlikovati teren izgrađen samo od okršanih propusnih vapnenačkih stijena (vapnenci, vapnenci s proslojcima dolomita, vapnenačke breče i konglomerati) od manje okršanih i manje propusnih dolomita, laporovitih i tankouslojenih vapnenaca (osobito ako izgrađuju jezgre antiklinale). Unutar ovih stijena u Dinarskom kršu pojedine dijelove terena izgrađuju u cjelini vodonepropusne flišolike stijene (to su najčešće uske izdužene zone na terenu). Međutim, raspored i propusnost navedenih litoloških članova i posebno razvoj krških fenomena, uveliko ovisi o rasjednoj tektonici, koja je u Dinarskom kršu redovito veoma živa i često reversnog i navlačnog karaktera. Ovdje treba naglasiti nužnost poznavanja pojedinih faza neotektonskih i posebno recentno aktivnih tektonskih pokreta, koji su ostavili bitan trag u oblicima današnjeg reljefa, ali i u razvitku današnjih tokova podzemnih voda. Navedeni faktori

omogućuju da vode koje poniru u jednoj dolini otječu podzemno do susjedne ili do još udaljenijih dolina - koje mogu biti erozijska baza za veliki dio podzemnih voda razvedenog krškog reljefa. Stoga kod proučavanja razvitka krškog reljefa posebnu pažnju treba posvetiti visinskom odnosu proučavanog lokaliteta prema svim okolnim pa i udaljenim riječnim dolinama i depresijama kao i na udaljenost istraživanog terena do krajnje erozijske baze, do mora. Ova posljednja napomena osobito je interesantna i osjetljiva zbog razvitka okršavanja u najmlađem geološkom razdoblju. Dosadašnja su iskustva pokazala da je za tumačenje današnjeg razvitka priobalnog reljefa i današnje mreže tamošnjih podzemnih tokova bitan posljednji ciklus promjene razine mora (erozijske baze) od Würm glacijala do danas, kroz koje se razdoblje razina mora postupno uzdigla za oko 100 metara (ŠEGOTA, 1968).

U Dinarskom kršu sve je više podataka da je današnji reljef relativno mlad. Većina rijeka i ujezerenja u priobalju i uzduž rijeka nastala su tijekom mlađeg pleistocena i holocena. U razdoblju od zadnjeg glacijala do danas okršavanje priobalnog terena odvija se kontinuirano ali s promjenom inteziteta okršavanja ovisno o promjeni klimatskih prilika, pa taj čitavi posljednji ciklus okršavanja (u razdoblju od oko 30.000 godina) treba tretirati kao recentno okršavanje (FRITZ, 1978).

Izvan utjecaja mora kao recentno okršavanje treba tretirati razdoblje zadnje faze usijecanja bilo koje doline. U dolini ili dijelu doline, gdje je usijecanje korita rijeke brže od spuštanja okolnog nivoa podzemnih voda, nalaze se stalno aktivni izvori (BAHUN & FRITZ, 1987). U takovim dolinama većih hidrogeoloških problema nema. Najčešće je kod proučavanja vododrživosti neke doline u kršu potrebno lučiti dva osnovna procesa okršavanja, stariji, vezan uz okršavanje šireg terena (iniciran prvenstveno rasjednom tektonikom)

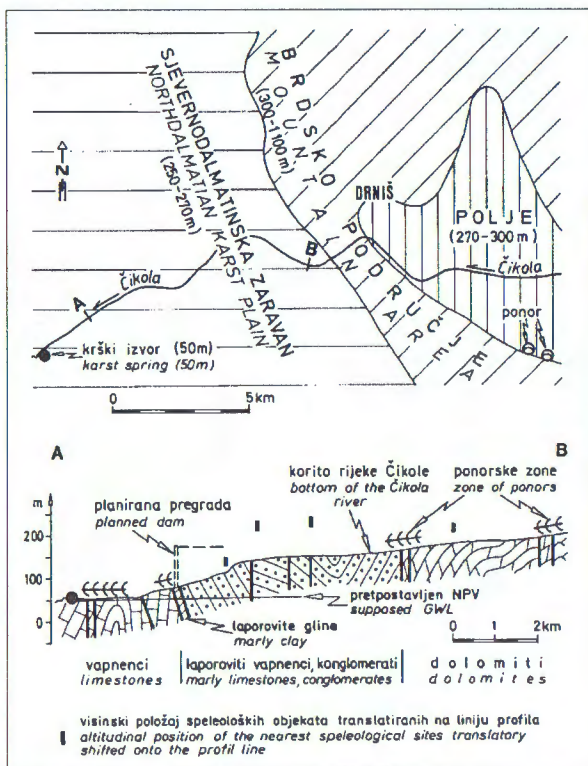
i mlađi, vezan uz destruktivan rad voda kojima je reljef oblikovan.

Na kraju ćemo ponoviti da se analizom razvitka recentnog reljefa mogu dobiti korisni pa i odlučujući podaci potrebni za realizaciju predmetne problematike. S nekoliko primjera to će se pokušati dokazati.

## 2. KANJON ČIKOLE

### 2.1. OPĆI PODACI

Čikola je lijeva pritoka rijeke Krke. Ulijeva se u nju uzvodno od vodopada Skradinski buk na koti oko 50 m n.m. Nizvodno od Drniša Čikola je usječena u Sjevernodalmatinsku zaravan kanjonom dubokim i do 200 metara. Taj dio istraživan je radi mogućnosti ostvarenja površinske akumulacije za potrebe hidroenergetike. Rijeka Čikola bujičnog je karaktera. Nizvodno od Drniša, u istraživanom terenu, ona presuši do najuzvodnijih ponora (sl. 1, profil).



Slika 1 Karta reljefnih cjelina i uzdužni profil kanjona Čikole  
Fig. 1 Relief unit map and the cross-section of the Čikola riverbed

Područje kanjona Čikole izgrađuju okršene karbonatne stijene gornje kreda i paleogena. Litološki sastav prikazan je uz spomenuti profil. Tok rijeke okomit je na pružanje geoloških struktura. Strukture (bore) su često reducirane uzdužnim rasjedima koji su dijelom reversnog i navlačnog karaktera. Poprečni rasjedi nisu doveli do većeg horizontalnog pomaka naslaga. U kanjonu Čikole nema izvora, čak ni povremeno aktivnih. Istražna bušenja za potrebe registriranja nivoa podzemnih voda dosad nisu izvedena. Na osnovi kote izvora nizvodno od kanjona pretpostavlja se da je nivo podzemnih voda u području predviđene pregrade nekoliko desetaka metara ispod

korita, a da je u uzvodnom dijelu doline i preko 100 m ispod korita. Znači, u istraživanom području Čikola je hidrogeološki "viseća" rijeka.

Na temelju hidrogeoloških podataka iz šireg područja može se zaključiti da se kretanje podzemnih voda vrši uglavnom uzduž privilegiranih puteva u smjeru jugozapada. Unutar tamošnjih karbonatnih stijena relativno su slabije propusni laporoviti vapnenci i konglomerati s laporovitim vezivom, osobito gdje su u blizini glinoviti lapori kao što je slučaj u području u kojem se predlaže izvedba pregrede. Međutim, pomanjkanje izvora u dolini ukazuju da ove stijene nisu hidrogeološka barijera za podzemne vode. Očito je da je pozitivna hidrogeološka funkcija navedenih stijena ograničena i smanjena, što je posljedica rasjedne tektonike.

### 2.2. GENEZA RECENTNOG RELJEFA I OKRŠAVANJA

Osnovna morfološka jedinica u istraživanom reljefu je jedna od najvećih zaravni u Dinarskom kršu. To je "Kistanjska površ" (CVIJIĆ, 1926), koju FRIGANOVIĆ (1961) naziva Sjevernodalmatinska zaravan. Čitav istraživani teren pripada jugoistočnom dijelu te zaravni i u njoj je, nakon njenog oblikovanja, usječen kanjon Čikole (sl. 1.). Geneza Sjevernodalmatinske zaravni još je danas otvoreno pitanje, kao i vrijeme njenog nastanka. Najvjerojatnije je nastala u gornjem pliocenu (CVIJIĆ, 1926) ili u starijem pleistocenu (FRITZ, 1972). Činjenica je da su na zaravni sve stijene (bez obzira na litološki sastav) podjednako erodirane (uravnate) i da je s njih ispran klastični materijal. Procesi vezani uz genezu Sjevernodalmatinske zaravni su podjednako djelovali na čitav teren, odnosno nisu sačuvani tragovi koji bi upućivali na različite uvjete okršavanja pojedinih dijelova ove zaravni.

U kanjonu Čikole nema ostataka terasa niti sedre. Ovi podaci ukazuju da je dolina usječena kontinuiranim procesom u toku jedne faze (monofazna dolina) i da taj proces usijecanja u razmatranom dijelu doline traje još i danas. Znači, dolina Čikole je vrlo mlada, recentna. Pećina i jama ima malo. Njihove karakteristike (visinski položaj, male dimenzije - sl. 1, profil) su značajne za ocjenu o vododrživosti doline. Međutim za ocjenu vododrživosti su najvažniji ustanovljeni podaci o poniranju vode iz korita Čikole. Te podatke moguće je registrirati samo na nekoliko lokaliteta u fazi presušivanja ili nailaska povremenog površinskog toka. Promatrano okom, gubici vode iz korita su mali. Na osnovi registriranih ponornih zona programirano je simultano mjerenje protoka pa će se gubici točno registrirati. Očita je veza između lokacija poniranja vode i rasjedne tektonike.

Navedeni podaci vezani uz genezu (razvitak) kanjona Čikole ukazuje na relativno malen utjecaj voda Čikole (u fazi usijecanja kanjona) na povećanje propusnosti bokova kanjona. To ne znači da tog faktora nema, ali je vjerojatno svaden samo na najosjetljivije dijelove

terena, odnosno vezan je uz rasjednu tektoniku.

Nameće se pitanje pod kakvim se utjecajima razvilo osnovno okršavanje terena, čija je posljedica današnja bezvodica i dobropropusni putevi podzemnih voda prema nizvodnim izvorima. Odgovor na postavljeno pitanje treba tražiti u analizi razvoja šireg reljefa i okršavanja u razdoblju prije proboja Čikole u Sjevernodalmatinsku zaravan. To je prije svega utjecaj ujezerene vode u depresiji Petrovog polja (koju izgrađuju nepropusne stijene - sl. 1) prije proboja Čikole u Sjevernodalmatinsku zaravan.

Prije proboja kanjona Čikole ujezerene vode iz depresije (polja) ponirale su uz južni i jugozapadni obod, na kontaktu s propusnim stijenama i podzemno otjecale prema jugu. Poniranje iz depresije i okršavanje podzemlja južno od depresije doseglo je najveći zamah neposredno prije proboja ujezerene vode u Sjevernodalmatinsku zaravan i začetka oblikovanja kanjona Čikole. Nakon tog proboja vode su sve više otjecale površinskim tokom Čikole, postupno se snižavao kontakt ujezerene vode s propusnim stijenama uz južni rub i jugozapadni rub depresije (polja). Raniji ponori postupno gube svoju funkciju, reljef se sve više snižava ovisno o usjecanju površinskog toka Čikole u Sjevernodalmatinsku zaravan. Danas više ujezerenja nema, a tek su najniži ponori sačuvali svoju funkciju i to samo u kišnom razdoblju.

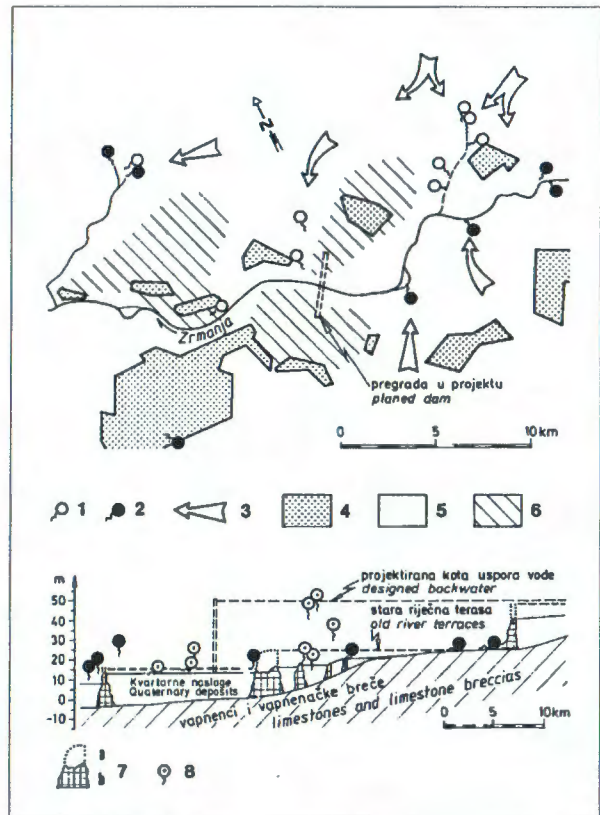
Iz iznesenog proizlazi da je u istraživanom terenu osnovni razvoj privilegiranih puteva kretanja podzemnih voda (i potencijalnih zona većih gubitaka vode iz akumulacije) vezan za razdoblje prije postojanja kanjona Čikole, odnosno da je vezan za razvoj okršavanja šireg terena, kako je to već uočeno i u drugim krškim terenima (FRITZ, 1972, BAHUN, 1973). Okršavanje podzemlja u širem području budućeg kanjona Čikole vezano je dakle uz rasjednu tektoniku, prvenstveno uz poprečne i dijagonalne rasjede uzduž kojih su se razvili privilegirani tokovi podzemnih voda u smjeru izvora (juga). Proizlazi da je proces okršavanja terena prije usjecanja kanjona Čikole u Sjevernodalmatinsku zaravan osnova i za razmatranje današnjeg kretanja podzemnih voda. Prema takvoj koncepciji okršavanje vezano uz razvoj kanjona Čikole nije bitnije utjecalo na pojačanu propusnost stijena u kojima se predviđa izvedba površinske akumulacije, osim donekle na povećanu propusnost uzduž rasjeda. To su prije svega rasjedi u području ponornih zona gdje se gube vode iz današnjeg toka Čikole. Daljnja istraživanja trebala bi dati dopunske podatke potrebne za ocjenu reda veličina gubitaka vode iz akumulacije.

### 3. DOLINA ZRMANJE

#### 3.1. OPĆI PODACI

Uzduž svog toka rijeka Zrmanja je na nekim potezima erozijska baza za okolne krške podzemne vode, dok ja na ostalom dijelu hidrogeološki "viseća", tj. nivo podzemne vode je u toku čitave godine niži od korita rijeke (FRITZ & PAVIČIĆ, 1982). U srednjem toku

rijeka je erozijska baza za okolne krške podzemne vode pa je taj dio terena istražen u cilju razmatranja mogućnosti izvedbe površinske akumulacije za potrebe hidroenergetike. Izvedena su geološka i hidrogeološka kartiranja šireg i zatim užeg područja akumulacije. Još su izvedena geofizička ispitivanja, istražna bušenja i opažanja nivoa podzemnih voda. Prilikom terenskih radova pažljivo su registrirani podaci vezani uz razvitak reljefa (ostaci riječnih terasa, sedre i dr.).



Slika 2 Shematska hidrogeološka karta i uzdužni profil dijela rijeke Zrmanje

1 - Povremeni izvor; 2 - Nepresušan izvor; 3 - Generalni smjer tečenja podzemnih voda; 4 - Relativna hidrogeološka barijera; 5 - Propusno područje znatno okršeno recentnim podzemnim vodama; 6 - Propusno područje neznatno okršeno recentnim podzemnim vodama; 7 a - Rekonstruiran najviši razvoj sedre; 7 b - Sedra; 8 - Visinski položaj krškog izvora translativiran u ravninu profila

Fig. 2 Schematic map of the hydrogeological framework and the longitudinal profile of the part of the Zrmanja river

1 - Temporary spring; 2 - Permanent spring; 3 - General direction of groundwater flow; 4 - Hydrogeological relative barrier; 5 - Permeable area which has not got down to work by means of recent groundwater; 6 - Permeable area which has not got down to work by means of recent groundwater; 7 - Maximal travertine development as reconstructed travertine; 8 - Altitudinal position of spring translatory shifted onto the profile line

Uže područje akumulacije izgrađuju vapnenci i vapnenačke breče krede i paleogena. Mjestimice, u malim depresijama u reljefu i lokalno u dolini, ispod kvartarnog pokrivača izviruju manji izdanci laporovitih glina pliocenpleistocena.

Teren je naizgled monotonog, blago nagutog krškog reljefa, izuzev strmih strana doline. S hidrogeološkog gledišta bilo je posebno važno registrirati sve lokacije danas sačuvanih laporovitih glina. Istaložene

su u ranijoj depresiji inicijalnog reljefa Zrmanje u pliocenu i početkom pleistocena. Nakon što je gornji tok Zrmanje skrenuo iz smjera sjever-jug (s ušćem u Krku) u smjeru zapada (i dalje današnjim tokom - Fritz 1972) najveći dio tih glina je ispran erozijom Zrmanje.

Istraživano područje bilo je podvrgnuto u znatnoj mjeri mladoj rasjednoj tektonici. Posljedice toga su da je čak i najmlađi litostratigrafski član (laporovite gline) u svim graničnim kontaktima sa starijim stijenama rasjedan. Danas su laporovite gline sačuvane samo u najnižim manjim tektonskim blokovima koji su najčešće i blage depresije u terenu. Izuzetak je relativno veće prostranstvo ovih glina na lijevoj strani Zrmanje nizvodno od akumulacije. Na slici 2 označene su laporovite gline i u području gdje su prekrivene kvartarnim taložinama. Na taj način dobijen je potpuni pregled rasprostranjenosti tih nepropusnih sedimenata značajnih za tumačenje hidrogeoloških odnosa ali i razvitka reljefa. Istražnim je bušenjem ustanovljeno da je njihova debljina uglavnom preko 100 metara, pa su to hidrogeološke barijere za okolne krške podzemne vode.

### 3.2. UTJECAJ RAZVITKA RECENTNOG RELJEFA NA VODODRŽIVOST DOLINE

Laporovite gline taložene su u paleodepresiji čija se duža os prostirala približno uzduž današnje doline Zrmanje. Današnje rasprostranjenje vezano im je uz kasnije tektonske pokrete i eroziju rijeke tako da su sačuvane samo u najniže spuštenim tektonskim blokovima (sl. 2).

Ako razmotrimo današnji položaj ostataka laporovitih glina evidentno je, da se nizvodni dio akumulacije nalazi približno u središnjem dijelu nekadašnje paleodepresije. Laporovite gline u pleistocenskoj depresiji činile su hidrogeološku barijeru za okolne krške podzemne vode i to vjerojatno na većem prostranstvu od prostiranja današnjih ostataka gline. Izvori su tada bili uzduž rubnog (najvišeg) dijela te barijere.

U vrijeme i nakon taloženja laporovitih glina pukotine i šupljine u vapnenačkim stijenama njihove podine kolimirane su glinovitim materijalom. Tijekom najmlađih tektonskih pokreta, koji traju do današnjih dana, cjelovita barijera laporovitih glina zajedno s njihovom podinom postupno je izdiferencirana u niz tektonskih blokova različitih (međusobnih) visinskih odnosa. Pri kraju tih tektonskih pokreta dogodilo se relativno naglo usijecanje doline Zrmanje (FRITZ, 1972).

Tijekom navedenih zbivanja laporovite su gline isprane s viših tektonskih blokova. Paralelno s navedenim procesom okršavan je teren i podzemnim vodama, osobito u smjeru današnjih izvora, koji su se postupno "spuštali" od gornje zone paleodepresije prema sve nižoj novonastaloj erozijskoj bazi, prema koritu rijeke Zrmanje.

U holocenu nastupili su blaži klimatski uvjeti i prestalo je naglo usijecanje doline Zrmanje, a u najnižvodnijem dijelu projektirane akumulacije čak je započelo taloženje holocenskih taloga. Tada je dolina Zrmanje u pregradnom profilu dosegla maksimalni razvoj,

a korito najniži nivo (oko 17 m niže od današnjeg dna doline).

Iz navedenog može se s dosta sigurnosti zaključiti da je najniža erozijska baza recentnog okršavanja u nizvodnom dijelu akumulacije bila 15-20 m niža od današnje erozijske baze. **Pod recentnim krškim podzemnim tokovima u dolini Zrmanje smatramo tokove podzemnih voda nastale od formiranja hidrogeološke barijere iz laporovitih glina do danas, dakle od približno srednjeg pleistocena do danas.**

To je posljednji povezan i kontinuirani ciklus okršavanja ovog terena koji je presudan za tečenje današnjih krških podzemnih voda k nizvodnom dijelu akumulacije, kao i za ocjenu mogućnosti gubitaka vode iz akumulacije.

Tijekom spominjanih najmlađih geoloških zbivanja postupno se je u području projektirane akumulacije smanjivala površina nepropusnih stijena (barijere), a povećalo se prostranstvo propusnih stijena iz podine barijere. Recentno okršavanje danas otkrivenih propusnih stijena iz podine barijere nije se odvijalo ravnomjerno na cijelom njihovom prostranstvu.

U nizvodnom dijelu akumulacije registrirano je niz povremenih izvora s krškim režimom istjecanja. Izdašnost izvora tokom godine koleba od 0 do nekoliko m<sup>3</sup>/s. Najčešće su to izvorišta od grupe izvora, smještenih jedan poviše drugog ili jedan do drugog i njihova aktivnost je veoma dobar indikator o režimu nivoa krških podzemnih voda u neposrednom zaleđu akumulacije. Unutar akumulacije registrirana su samo dva speleološka objekta. Oba su pećine-izvori i po svojoj hidrogeološkoj funkciji ne razlikuju se od opisanih izvora.

Današnja mjesta krških izvora označavaju osnovne drenažne zone okolnih krških voda prema dolini. U razvitku doline otpor kretanju krškim podzemnim vodama pružala je pleistocenska barijera, koja se je usjecanjem Zrmanje postupno smanjivala do današnjih ostataka, ali su otpor kretanju podzemnim vodama pružale i manje izlomljene i glinovitim materijalom kkolimirane vapnenačke naslage iz podine barijere. Približno takav proces razvitka recentnih tokova odvija se sve do danas. U tom procesu smanjuje se površina nepropusnih i manje propusnih stijena.

Visinski položaj izvora u odnosu na najnižu dosegnutu erozijsku bazu u dolini Zrmanje (podina kvartarnih naslaga) prikazan na profilu. Odnos visinskog položaja izvora, odnosno privilegiranih tokova podzemnih voda u zaleđu izvora s odgovarajućim gradijentom podzemnih voda u njihovom zaleđu, bitan je za ocjenu maksimalne moguće kote uspora vode u dolini. U tom cilju rekonstruirana su i ranija prirodna ujezerenja u dolini kao važan indikator o vododrživosti doline u skorašnjoj prošlosti (sl. 2, profil).

Na osnovi iznijetog izdvojeni su unutar propusnih stijena tereni s različitim hidrogeološkim funkcijama (sl. 2). Na opisan način dobivene razlike pokazale su da je predložen pregradni profil lociran u relativno manje okršenim stijinama.

Na temelju navedenih podataka o razvoju recentnog

okršavanja prognozirani su potezi kroz koje se očekuju osnovni gubici vode akumulaciji, ocijenjen je red veličine tih gubitaka i postavljena je koncepcija otješnjenja akumulacije (FRITZ & STOJIC, 1986).

#### 4. PRIOBALNO PODRUČJE

##### 4.1. UVOD

U usporedbi s ostalim krškim terenima (HERAK, 1977) u priobalnim terenima Dinarida razvijeni su svi fenomeni krša. U tome nema razlike da li se teren uzdiže naglo od obale u planinski reljef ili se radi o zaravnjenom, niskom priobalnom reljefu (FRITZ, 1978, 1980). Kao primjer razvoja površinskog i podzemnog krškog reljefa prikazat ćemo zapadni dio Ravnih Kotara, koji su hidrogeološki dobro istraženi. To je tipičan niski priobalni teren koji je poslužio i kao dokaz da nemaju pokrića hidrogeološke rajonizacije i klasifikacije terena s pretenzijama shematiziranja pojava krških fenomena ovisno o reljefnim cjelinama (FRITZ, 1980). Naime još uvijek treba isticati da specifičnosti krškog terena zahtijevaju da svaki problem treba rješavati zasebno, na konkretnim podacima vezanim uz istraživani teren.

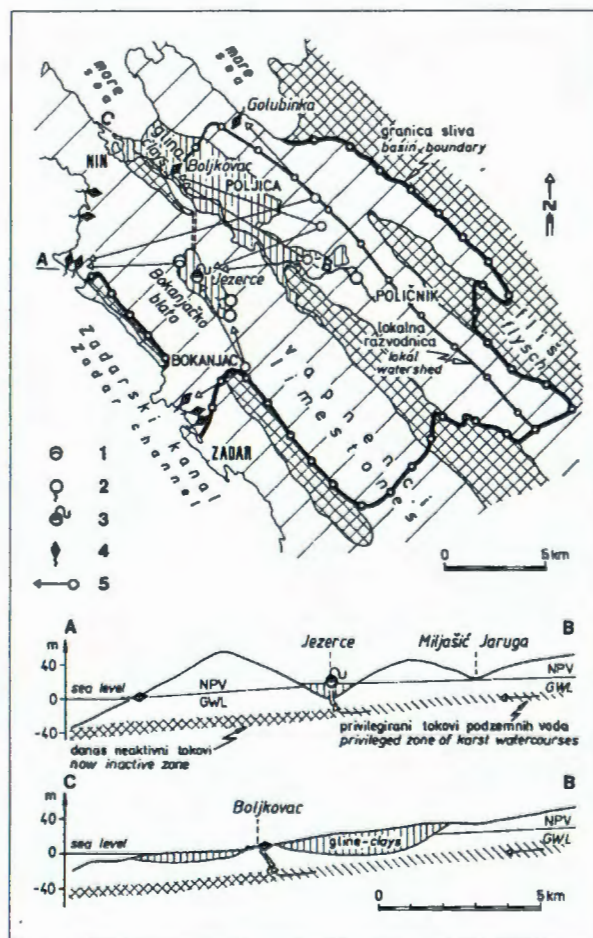
##### 4.2. OPĆI HIDROGEOLOŠKI PODACI O TERENU

Prikazani teren (sl. 3) čini hidrogeološki sliv nazvan Bokanjac-Poličnik, unutar kojeg je izdvojen sliv krškog bočatog izvora Golubinka, koji je istraživani za zahvat slatkih voda (PAVLIN & FRITZ, 1978). Reljef u slivu je blago valovit, najviši grebani dosežu 120 m n.m. Najizrazitija depresija u terenu je Bokanjačko blato, a dolina Miljašić jaruge je jedini povremeni površinski tok. Bokanjačko blato je malo krško polje (na koti oko 20 m, ispunjeno glinama debljine do 18) s povremenim izvorima, estavelom i ponorima. Do iskopa odvodnog tunela bilo je povremeno poplavljeno. Estavela "jezerce" svake godine djeluje kao povremeni krški izvor, a kao ponor "Jezerce" je funkcioniralo u vrijeme prijašnjih ujezerjenja tek svakih dvadesetak godina samo u vrijeme iznimno velike inundacije polja.

Sliv izgrađuju vapnenci i dolomiti krede, te vapnenci ili fliš paleogena. Dolomiti izgrađuju jezgre antiklinala, a fliš jezgre sinklinala i ujedno uzvišenja (grebene) u reljefu. To pogoduje dobrom poniranju oborinskih voda u vapnence (s njihovih površina nema površinskog otjecanja) i u njima nalazimo znatne rezerve podzemnih voda. Podzemne vode između dviju fliških barijera kreću se općenito paralelno s pružanjem struktura, tj. u smjeru sjeverozapada. Po nestanku fliških barijera one idu najkraćim putem, odnosno putevima najmanjih otpora do mora. Kvartarne gline na desnoj strani Miljašić jaruge vrše funkciju hidrogeološke barijere koja usmjerava podzemne vode iz područja Poljica prema Bokanjačkom blatu. Dijelom je barijera "viseća" i dopušta kretanje vode do izvora Boljkovac u donjem dijelu Miljašić jaruge.

Podzemne vode u području Poljica-Poličnik su

osjetno više nego u području Bokanjca, pa treba uočiti mogućnost istjecanja vode iz područja Poličnika prema spomenutom bočatom izvoru Golubinki i prema Bokanjcu. Razlika u visini vodostaja u području Poličnika i Bokanjca nastala je zbog fliške barijere, koja odvaja uzvodne dijelove ovog terena u dva odvojena sliva, kao i zbog relativne kvartarne barijere nizvodno prema Ninu. Tek nizvodno od spomenute fliške barijere prelijeva se dio vode iz područja Poličnika u područje Bokanjačkog blata. Radi boljeg uvida u karakter kretanja podzemnih voda navest ćemo podatke o prividnim brzinama i to u smjeru paralelnom s pružanjem geoloških struktura i okomito na strukture. U pet mjerenja utvrđene su prividne brzine: paralelno sa strukturama 14, 14, 10, 32 i 81 mm/sek, okomito na strukture 14, 22, 29, 23 i 50 mm/sek. Velike brzine u smjeru gotovo okomito na smjer pružanja geoloških struktura (od Poljica prema Bokanjačkom blatu) inicirane su dijagonalnim rasjedima i padom vodnog lica prema Bokanjcu tek nakon završetka fliške barijere. Propusnost pripovršinskog dijela vapnanaca pokazala se znatno slabijom ili gotovo neznačajnom u odnosu na onu u dubljim zonama, na što



Slika 3 Sliv Bokanjac-Poličnik s karakterističnim hidrogeološkim profilima: 1 - Ponor; 2 - Povremeni krški izvor; 3 - Estavela; 4 - Bočati izvor; 5 - Ustanovljena veza piezometar - izvor.  
Fig. 3 The Bokanjac-Poličnik catchment area with characteristic profiles: 1 -Ponor; 2 -Temporary karst spring; 3 - Estavelle; 4 - Brackish coastal spring; 5 - Direct connection between piezometer and spring.

ukazuje sporija pojava boje na usputnim bušotinama, u plićim zonama. Iz navedenih podataka može se zaključiti da u slivu Bokanjac-Poločnik postoje privilegirani tokovi i sifonska tečenja. Bokanjačko blato nalazi se na sjecištu puteva podzemnih voda koje teku u smjeru sjeveroistoka i voda koje dotječu s istoka, što je dovelo do bogatstva podzemnom vodom, ali i do složenih hidrauličkih odnosa.

Izvor Boljkovac (na koti 3,25 m, udaljen oko 3,5 km od mora) ima rijetku karakteristiku da mu je voda slanija kod velikih nego kod malih protoka. To se tumači time da su pri većem dotoku vode aktivniji niži "sifonski" tokovi, koji su u tijesnijoj vezi s morskom vodom nego tokovi na višoj koti (koji su provodnici malih voda). Porast slanosti primjećen je i pri dugotrajnom crpljenju u Jezercu, udaljenom od mora oko 5 km.

#### 4.3. RAZVITAK RECENTNOG RELJEFA I OKRŠAVANJA

Sifonska tečenja i privilegirani podzemni putevi u ovom niskom priobalnom terenu mogu se objasniti jedino genezom tih najaktivnijih podzemnih tokova u vrijeme nižeg stanja razine mora (erozijske baze) nego što je današnja. Poslije glacijala Würm-a, a prije taloženja glina u Bokanjačkom blatu i istočno od Nina, razina mora bila je blizu 80 m niža od dna današnjeg Bokanjačkog blata, koje je tada bila povremeno ili stalno plavljena depresija u krškom terenu. Istjecanje ujezerenih voda odvijalo se kroz ponore, a ponorna voda je otjecala zajedno s ostalim podzemnim vodama u smjeru zapada prema tadašnjim priobalnim izvorima. Prema registriranim podacima najveći zamah okršavanja i razvitka privilegiranih podzemnih puteva voda zbio se je kada je razina mora bila niža za 30-40 m od današnje. U vrijeme postupnog uzdizanja razine mora, kada je razina dosegla visinu privilegiranih tokova podzemnih voda nizvodno od Jezerca i Boljkovca, počelo je u širem području intezivnije taloženje glinovitih taloga. Uzrokovano procesom dizanja razine mora postupno su sve više morem "prigušivani" hipsometrijski najniži privilegirani putevi podzemnih voda i istodobno intenzivnije kolminira kalcitom i glinom. U opisanim okolnostima postupno se je povećala aktivnost izvora Jezerce i Boljkovca i oni postaju glavni "odušak" već razrađenih privilegiranih puteva kretanja podzemnih voda. Na osnovi iznijetog zaključuje se da su ranije aktivni privilegirani putevi od Jezerca i Boljkovca u smjeru mora postupno "prigušeni" i danas su neaktivni. To na svoj način potvrđuje i fenomen Jezerce. Naime nizvodno od Jezerca raniji putevi podzemnih voda bili su donedavno povremeno aktivni, ali samo kod izuzetnih velikih nivoa ujezerene vode (svakih oko 20 godina) kada je Jezerce proradilo kao ponor. Nakon iskopa tunela, kojim se odvode ranije poplavne vode, Jezerce više ne funkcionira kao ponor, već samo kao povremeni izvor. U sušnom razdoblju nivo vode padne ispod nivoa terena pa mjesto izvora poprima oblik jezera.

Na osnovi opisanih pretpostavki o razvitku recentnog

okršavanja i puteva kretanja podzemnih voda bilo je za očekivati da je sa "uzvodne" strane Jezerca i Boljkovca sačuvana velika poroznost (i akumulativnost) vapnenaca koja osigurava dobru izdašnost vode i mogućnost upravljanja podzemnim vodama. Nakon probnog crpljenja to je i potvrđeno pa su izvedeni zahvati vode i već se desetak godina na mjestu estavele Jezerce koristi preko 100 l/s vode, a na mjestu izvora Boljkovac, koji je ljeti imao kapacitet 2-3 l/s, nešto manje. Prigušenje ranijih nizvodnih tokova od izvora prema moru omogućuju da samo u kritičnom sušnom razdoblju godine navedene količine zamalo prelaze salinitet dozvoljene granice, ali se i tada voda koristi, jer se miješa sa slatkom vodom iz drugih izvorišta.

#### 5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je istaknuti korisnost analize razvitka reljefa i okršavanje za rješavanje praktičnih problema. Nužnost takvih proučavanja terena je dosada isticana, ali radova gotovo nema.

Zainteresiranima se napominje da se kao sastavni dio ove problematike mogu tretirati slijedeći objavljeni radovi koji obrađuju Dinarski krš.

Tako FRITZ (1972) analizira razvitak rijeke Zrmanje, koja je u prvoj fazi svog postojanja bila pritoka rijeci Krki. Krajem pleistocena došlo je do skretanja tog toka i otjecanja rijeke u Novigradsko more. Tada se usjekao u paleoreljef i dio doline opisan u toč. 3. Na kraju rada se zaključuje da je u gornjem toku Zrmanje dio doline relativno povoljan za ostvarenje vododržive akumulacije.

PAVIČIĆ & FRITZ (1986) unutar karbonatnih stijena analiziraju razvitak rijeke Krčić i izdašnog izvora Krka. U zaključku se ističe da dno i bokovi doline nizvodno od izvora nisu znatnije okršeni recentnim podzemnim tokovima. Taj dio doline je najpogodniji za izvedbu pregrade radi ostvarenja akumulacije koja će potopiti i spomenuti krški izvor.

FRITZ (1984) obrađuje razvitak kriptodepresije Vranskog jezera kod Biograda na moru u kojoj je jezero s malo bočatom vodom. Jezero razdvaja od mora greben izgrađen iz vapnenca širine svega 1 do 2,5 km. Analiza razvitka reljefa pokazala je da je kriptodepresija nastala krajem pleistocen. Depresija je najprije funkcionirala kao krško polje s površinskim tokom i ponorima u nizvodnom dijelu polja, sve dok se razina mora nije uzdigla do dna tadašnjeg polja. Nakon tog razdoblja nastalo je jezero. U toku svog razvitka uzvodni dio vapnenačkog grebena nije razrađivan ponornim vodama iz jezera (depresije), jer je bio sačuvan uskom zonom danas potopljenim nepropusnim stijenama fliša. Usvojeno je da se u tom dijelu jezera može ostvariti uspor vode od nekoliko metara, što zadovoljava planirane potrebe za vodom.

Kako je u uvodu istaknuto, nakon što se sprovedu "standardni" geološki, hidrogeološki i sve prisutniji neotektonski istražni radovi ostaje još otvorenih pitanja

vezanih uz rješavanje zahvaćanja voda u kršu. Na temelju u radu iznesenih primjera smatramo da odgovore na dio tih pitanja daje proučavanje razvitka recentnog reljefa predmetnog područja pa se ti radovi ne bi smjeli izostaviti iz programa istražnih radova potrebnih za projektna rješenja.

## 6. LITERATURA

- BAHUN, S. (1973): Odnos krškog procesa i fluvijalne erozije u području Like (Relationship between karstification and fluvial erosion in the region of Lika - central Croatia). *Carsus Jugosl.*, 8/5, 81-100, Zagreb
- BAHUN, S. & FRITZ, F. (1987): Postanak izvora u Dinarskom orogenskom akumuliranom kršu (The origin of springs in Dinaric orogenic accumulated karst). -*Carsus Jugosl.*, 12/2, 27-37, Zagreb
- CVIJIC, J. (1926): Geomorfologija II (Morphologie terrestre), Beograd
- FRIGANOVIĆ, M., (1961): Polja gornje Krke (les poljes de la Krka superieure) - *Radovi Geograf. inst.*, 3, 1-164, Zagreb
- FRITZ, F. (1972): Razvitak gornjeg toka rijeke Zrmanje (Morphological evolution of the upper Zrmanja course) -*Carsus Jugosl.* 8/1, 1-16, Zagreb
- FRITZ, F. (1978): Hidrogeologija Ravnih Kotara i Bukovice (Hydrogeology of Ravni Kotari and Bukovica). -*Carsus Jugosl.* 10/1, 1-43, Zagreb
- FRITZ, F. (1980): Hidrogeološke rajonizacije priobalnog krša Hrvatske u svijetlu novijih saznanja (Hydrogeologic zoning of the coastal karst of Croatia in the view of recent studies). - *Geol. vjesnik*, 31, 327-336, Zagreb
- FRITZ, F. (1984): Postanak i starost Vranskog jezera kod Biograda na moru (The origin and age of the Lake near Biograd na moru, Croatia). -*Geol. vjesnik* 37, 231-243, Zagreb
- FRITZ, F. & STOJIC, P. (1986): Akumulacija HE Zrmanja (Storage basen of the HE Zrmanja). -*Saopštenja JDVB*, 389-395, Mostar
- HERAK, M. (1977): Tecto-genetic approach to the classification of Karst terrains. - *Carsus Jugosl.*, 9/4, 227-238, Zagreb
- PAVIČIĆ, A. & FRITZ, F. (1986): Postanak i razvoj doline Krčića i izvora Krke (The origin and development of the Krčić river valley and Krka spring, Croatia - Dalmatia). - *Acta Carsologica*, 14/15 (1985/86), 163-172, Ljubljana
- PAVLIN, B. & FRITZ, F. (1978). La protection du systeme des sources karstiques de Golubinka contre la contamination par la mer. *SIAMOS*, 1, 227-235, Granada
- ŠEGOTA, T. (1968): Morska razina u holocenu i mlađem Würmu. - *Geografski glasnik*, 30, 15-39, Zagreb

## THE INFLUENCE OF THE RECENT KARSTIFICATION ON WATER EXTRACTION

F.Fritz

It is a common practice to carry out geological and hydrogeological mapping in order to evaluate, in karst terrains, the impermeability of valleys or groundwater intake feasibilities. Wide areas are first mapped and then followed by detailed explorations of smaller areas. To explain the groundwater flow system and estimate amounts of water that can leak from surface storages, a detailed field observation of fault tectonics, particularly of the discovery of recentmost faults, was carried out. After such explorations, had been performed, a lot of unknown data were still needed for the solution of problems in practice. However, by studying the recent morphological evolution and karstification process of the explored areas, some valuable additional information could be obtained (frequently). The aim of this paper is to try to demonstrate to the explorers the usefulness and necessity of such studies by describing several study cases.

The author of this paper thinks that, under the terms "recent relief" and "recent karstification", the last phase of stream cutting into the land should be considered. In coastal areas (in the places where the sea level was erosion basis) it is necessary to analyse the period of time since the last glacial. Namely, this is the period

of the last continual cycle of erosion and karstification lasting till nowadays and having a crucial impact on the present groundwater flow and on the ground impermeability (FRITZ, 1978).

The Čikola river dries up gradually till its highest upstream ponors (swallow holes) in the dry season (Fig. 1). Springs appear only downstream of the part of the valley studied for a surface storage construction. The river is a torrent one. The recorded zones of ponors are hardly noticeable in their activity. It is assumed that their total swallowing capacity is relatively low, several hundred liters per second only. The ponor sites are associated with faulting tectonics and they together control general flows of the neighbouring groundwater. Having analysed wide areal characteristics, it was concluded that the evolution of these general groundwater flows had occurred before the Čikola river cut its bed into the Northern Dalmatian plateau. It occurred when a karst polje near the town of Drniš was a lake with ponors along its southwestern border. By the Čikola river cutting, the lake was disappearing gradually. Nowadays only the lowest ponors are active and it happens only during the wet season. There are neither terraces nor travertine occurrences in the Čikola river valley. The

valley was cut away during one phase (a monophasic erosion) and this process is still being active. It means that the canyon is young, a recent one. The canyon, through its erosion, has just started to increase the permeability of rocks into which it was cut. It happened only near a fault. Therefore, higher rates of leakage from the storage should not be expected. Explorations were programmed to estimate the rate of leakage.

The second case is represented by the Zrmanja river middle course which is the erosional base for surrounding karst groundwater. It results with the occurrence of several permanent and intermittent springs in the river valley (Fig. 2). The terrain is built of calcareous breccias and limestones in which there are occasional Plio-Pleistocene marly clays. The clays occur only within the lowest local tectonic blocks.

According to features of sites where the clays occur, one may conclude that they were deposited in a paleopression and they surpassed the altitude of the designed storage. During Pleistocene time, these clays had role of a hydrogeological barrier. During a latter erosion, because of tectonic deformations and a rapid cutting of the present Zrmanja river valley into the paleodepression that took place by the end of Pleistocene time (FRITZ, 1972), the barrier has been decreased gradually to its present remains. Simultaneously with that process, springs, occurring along the edge of the old barrier, have sunk gradually till the present site. Valuable information on the valley bottom permeability during Holocene time were obtained by reconstructing the lake formation process on the basis of recorded remains of travertine and river terraces (Fig. 2 - cross section). The terrains having different hydrogeological functions were separated within limestones and calcareous breccias by using all exploration data. Furthermore, the optimal backwater head was suggested and the zones of possible water leakage from the storage were forecasted. An attempt to estimate the leakage rate was also made (FRITZ & STOJIC, 1986).

The third case relates to a coastal area composed of permeable limestones and impermeable flysch rocks (Fig. 3). The relief is gently undulated with ridges (reaching not more than 120 meters above sea level)

built of impermeable rocks making possible the sinking of most precipitations and the accumulation of large amounts of groundwater in the limestones. Water table is considerably higher in the Poličnik-Poljica area within a small karst polje, the Bokanjačko Blato, and at the Boljkovac spring. By groundwater tracing and monitoring of tracer appearance in boreholes, "privileged" (major) flows with apparent velocities of up to 8 cm/s were recorded as well as siphonal flows whose conduits extend below the present sea level.

The development of these aquifers may be explained only by their formation when the sea level (i.e. the erosion base) was lower than the present one. Such conditions occurred from after Würm glacial till near the end of Pleistocene time. After that period, the lowermost part of those aquifers was smothered gradually by the sea level rise and later by the colmatation with mainly clayey material. In the Bokanjačko Blato, the Jezerce estavelle activity as a spring was increasing simultaneously and the permanent Boljkovac spring appeared. Groundwater flows are smothered (become inactive) downstream the mentioned springs in the present time. This results in a considerably decreased negative sea water influence upon the quality of fresh groundwater in the hinterland (Fig. 3, cross-sections). Good connections and permeability of the underground flow conduits upstream an estavelle, the Jezerce, and the Boljkovac spring make feasible to extract for water supply over 100 l/s of water from the Jezerce and slightly less from the Boljkovac spring. The Jezerce lost its estavelle function after excavating a tunnel for flood water draining. Earlier, before the construction of intake structure, the Boljkovac spring discharged a slightly brackish water during the rainy season whilst it discharged several litres per second of fresh water during the dry season.

Some already published articles (FRITZ, 1972, 1984; PAVIČIĆ & FRITZ 1986) may be considered as constituent parts of this synthesized paper. As a conclusion, it should be taken into consideration that in the programmes of necessary exploration, aimed to solve various water intake tasks in karst areas, it is necessary to include also the study of recent relief evolution explored areas.