

UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Ljiljana M. Vasić

**GENEZA I USLOVI CIRKULACIJE VODA
KOMPLEKSNIH KARSTNIH SISTEMA
KUČAJSKO-BELJANIČKOG MASIVA**

doktorska disertacija

Beograd, 2017

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Ljiljana M. Vasić

**GENESIS AND CIRCULATION OF
GROUNDWATER OF COMPLEX KARST
SYSTEMS OF KUČAJ-BELJANICA MASSIF**

Doctoral dissertation

Belgrade, 2017

Mentor:

Dr Zoran Stevanović, redovni profesor,
uža naučna oblast: Hidrogeologija
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Članovi komisije:

akademik **Dr Vidojko Jović**, redovni profesor,
uža naučna oblast: Geohemija
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Dr Veselin Dragišić, redovni profesor,
uža naučna oblast: Hidrogeologija
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Dr Olivera Krunić, redovni profesor,
uža naučna oblast: Hidrogeologija
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Dr Palcsu Laszlo, viši naučni saradnik,
uža naučna oblast: Nuklearna fizika
Institut za nuklearna istraživanja „Atomki“, Debrecin, Mađarska

Datum odbrane: _____

ZAHVALNICA

Doktorska disertacija „Geneza i uslovi cirkulacije voda kompleksnih karstnih sistema Kučajsko-beljaničkog masiva“ urađena je pod mentorstvom dr Zorana Stevanovića, redovnog profesora Rudarsko-geološkog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, kome se neizmerno zahvaljujem na usmeravanju, saradnji i korisnim sugestijama tokom rada na izradi disertacije. Takođe sam zahvalna svim članovima komisije na stručnim savetima i podršci u radu.

Zahvalna sam akademiku dr Vidojku Joviću, redovnom profesoru Rudarsko-geološkog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, na pomoći i korisnim savetima u okviru hidrogeohemijskih istraživanja.

Za realizaciju stabilnih izotopskih analiza vode i stene i jonskih analiza vode, kao i za datiranje stalagmita, zahvalnost dugujem dr Jinhua Cao i institutu IRCK iz Kine. Takođe, veliku zahvalnost za realizaciju i interpretaciju podataka radioaktivnih izotopa ^3H , $^3\text{H}/^3\text{He}$, ^{14}C i plemenitih gasova dugujem dr Laszlu Palcsu i institutu ATOMKI iz Mađarske.

Zahvaljujem se dr Vladani Rajaković Ognjanović i Maji Đolić sa Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, kao i Dragani Živojinović sa Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, na pomoći oko realizacije dela jonskih analiza i izradi poglavlja multistatističke varijantne analize.

Zahvalna sam Miloradu Kličkoviću na pomoći oko terenskih istraživanja i fotografisanju jednog dela istražnog porstora. Zahvalnost dugujem i kolegi Savi Magazinoviću, na podršci i korisnim informacijama o termalnim vodama na lokaciji Sisevca. Zahvalna sam Branislavu Potkonjaku na izradi velikog broja analiza sadržaja mikroelemenata u vodi.

Najveću zahvalnost dugujem Saši Milanoviću na nesebičnom prenošenju stručnog znanja i iskustva i na velikoj pomoći pri terenskim, laboratorijskim i kabinetskim radovima, kao i na korisnim savetima i usmeravanjima u radu na disertaciji.

Na kraju, želim da izrazim neizmernu zahvalnost Neni, Mikici i Mimi na strpljenju, ljubavi i konstantnoj podršci koju su mi pružali svih ovih godina i bez kojih ne bih uspela da ostvarim sve svoje uspehe u životu.

GENEZA I USLOVI CIRKULACIJE VODA KOMPLEKSNIH KARSTNIH SISTEMA KUČAJSKO-BELJANIČKOG MASIVA

Sažetak

Aktuelnost problematike funkcionisanja karstne izdani, kao i veliki broj metodoloških postupaka koji je primenjen u cilju definisanja zona prihranjivanja i veze između podzemnih i površinskih voda, vremena koje voda provede u podzemlju, pri čemu se formira jedinstven hemijski sastav i temperaturni režim isteklih voda, bili su polazna osnova za usmerenje na istraživanje karsta i definisanje teme doktorske disertacije.

Kučajsko-beljanički masiv se nalazi u istočnoj Srbiji i pripada oblasti Karpato-balkanskog luka i idealan je poligon za istraživanje, obzirom da se u okviru njega nalaze jaka karstna vrela i pojave toplih karstnih izvora na relativno malom rastojanju, što je predstavljalo izuzetan naučni izazov u pogledu definisanja geneze voda i uslova cirkulacije kroz dokazivanje hipoteze da ove vode različite temperature potiču iz „iste karstne izdani“.

U okviru karstnog masiva izdvojeno je 15 kompleksnih sistema, za koje su interpretacijom podataka kvantiteta, zajedno sa rezultatima izotopskih (^{18}O i ^2H , ^{13}C , ^3H , $^3\text{H}/^3\text{He}$ i ^{14}C), jonskih i fizičko-hemijskih analiza voda, dobijeni rezultati o karakteristikama i funkcionisanju sistema izdvojenih u okviru masiva.

Multidisciplinarni pristup istraživanja rezultirao je saznanjima da se u okviru Kučajsko-beljaničkog masiva nalaze vode starosti od nekoliko dana do skoro 6.000 godina, što ukazuje na izraženu vertikalnu zonalnost rasprostranjenja karstnih kanala i na postojanje plitkih kanala, kao i kanala sa veoma dubokom sifonalnom cirkulacijom podzemnih voda. Hidrohemijski podaci svedoče o postojanju veoma složenih geohemijskih procesa koji se odvijaju u podzemlju, postojanju grejnog tela i uticaju prolongiranog kontakta podzemnih voda sa stenama na hemijski i temperaturni režim podzemnih voda.

Na osnovu video-endoskopskih istraživanja i reinterpretacije karotažnih merenja, moglo se zaključiti da se radi o razviću veoma duboke cirkulacije. Takođe, rezultati su ukazali da je karstifikacija u okviru karbonatnog kompleksa razvijena dublje od 500 m od zona primarnih isticanja, što ide u prilog razviću karstno-pukotinskog tipa izdani, u okviru kojih se, pod raznim uslovima, formiraju vode povišene temperature (13 – 36 °C).

Ključne reči: karstni sistemi, geneza podzemnih voda, izotopske metode, starost voda, hidrogeohemijski procesi, dubina cirkulacije podzemnih voda, subtermalne i termalne vode

Naučna oblast: Geološko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Hidrogeologija

UDK: 556.32:54(497.11)(043.3)

GENESIS AND CIRCULATION OF GROUNDWATER OF COMPLEX KARST SYSTEMS OF KUČAJ-BELJANICA MASSIF

Abstract

In order to define recharge zones, groundwater-surface water interaction, mean residence time and groundwater age, as well as genesis of hydrochemistry and temperature regimes of cold and lukewarm water, it was necessary to conduct a large number of different methodological approaches.

Kučaj-Beljanica massifs is located in eastern Serbia and belongs to the Carpathian-Balkan mountain arch and represent an ideal research area, since at some locations at relatively short distances from karst springs with cold and fresh waters, drainage of thermal and sub-thermal water also occurs. This represent remarkable scientific challenge in terms of defining the genesis and circulation of cold and thermal groundwater flows.

The Kučaj-beljanica massif was divided into 15 complex systems, where quantity data, together with the results of the isotopic (^{18}O i ^2H , ^{13}C , ^3H , $^3\text{H}/^3\text{He}$ i ^{14}C), ionic and physico-chemical analysis of the water, gave conclusions about characteristics and system functioning.

According to isotope content, video-endoscopy and re-interpretation of well logging in certain locations it could be concluded that groundwater have very deep circulation, or that the karstification of carbonate complexes developed significantly below the erosion base and below the karst channels within deep siphonal circulation. It can be assumed that the karstification carbonate complex is developed deeper than 500 m from the primary drainage zone.

A multidisciplinary approach has resulted the knowledge that within Kučaj-Beljanica massif groundwater age ranges from a few months to almost 6,000 years, which indicates a vertical zonation of karst channels distribution with shallow channels as well as channels with very deep siphonal groundwater circulation. Hydrochemical data indicate the existence of very complex geochemical processes in the underground, the existence of a heating body (volcanic rock) and influence of prolonged water-hostrock contact on chemical and temperature regime of groundwater.

Key words: karst system, groundwater genesis, isotopic methods, groundwater age, hydrogeochemical processes, depth of groundwater circulation, subthermal and thermal groundwater

Scientific field: Geological engineering

Scientific subfield: Hydrogeology

UDC number: 556.32:54(497.11)(043.3)

SADRŽAJ

UVOD	1
1. CILJEVI DOKTORSKE DISERTACIJE	3
2. DOSADAŠNJA SAZNANJA IZ PREDMETNE PROBLEMATIKE	7
3. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA U OBLASTI KUČAJSKO-BELJANIČKOG MASIVA	12
4. OPŠTE KARAKTERISTIKE ISTRAŽNOG PODRUČJA	18
4.1. Geografski položaj i okonturivanje istražnog prostora.....	18
4.2. Klimatske karakteristike	21
4.3. Hidrografske i hidrološke karakteristike	38
4.4. Geomorfološke karakteristike.....	41
4.4.1. Površinski morfološki oblici	43
4.4.2. Podzemni morfološki oblici	45
4.5. Geološke karakteristike terena.....	57
4.5.1. Prikaz litostratigrafskih jedinica	59
4.5.2. Tektonika terena	71
4.6. Hidrogeološke karakteristike terena	74
4.6.1. Karstni tip izdani	78
4.7. Hidrohemijske karakteristike izdanskih voda.....	89
4.8. Režim izdašnosti karstne izdani	94
5. KONCEPCIJA ISTRAŽIVANJA I PRIMENJENI METODSKI POSTUPCI SA METODOLOGIJOM ISTRAŽIVANJA.....	101
5.1. Konceptija istraživanja.....	101
5.2. Kriterijumi za izdvajanje kompleksnih karstnih sistema koji su predmet analize .	104
5.3. Primljeni metodski postupci	107
5.3.1. Izotopske metode istraživanja.....	108
5.3.1.1. Primena izotopskih metoda u hidrogeologiji	108
5.3.1.2. Pojam i poreklo izotopa.....	110
5.3.1.3. Rasprostranjenje stabilnih izotopa u prirodi	112
5.3.1.4. Kiseonik ¹⁸ O, Vodonik ² H i Ugljenik ¹³ C.....	112
5.3.1.5. Kiseonik i vodonik u padavinama i formiranje Globalne meteorske kriva	117

5.3.1.6. Uticaj izotopskih efekata na sadržaj ^{18}O i ^2H u padavinama.....	123
5.3.1.7. Ugljenik ^{13}C	128
5.3.1.8. Rasprostranjenje radioaktivnih izotopa u prirodi.....	131
5.3.1.9. ^3H - Tricijum (T).....	131
5.3.1.10. Radioaktivni izotop ^{14}C	133
5.3.1.11. Datiranje podzemnih voda.....	134
5.3.1.12. Mlade (moderne) vode.....	137
5.3.1.13. Datiranje starih (paleo) voda.....	141
5.3.1.14. Primjenjene terenske i laboratorijske metode u okviru izotopskog metodološkog postupka.....	146
5.3.2. Hidrohemijske metode istraživanja.....	151
5.3.2.1. Primjenjene terenske i laboratorijske metode.....	153
5.3.3. Negeološke metode - Meteorološki i hidrološki metod istraživanja.....	155
5.3.4. Geohemijske metode istraživanja.....	157
5.3.4.1. Primjenjene terenske i laboratorijske metode.....	158
5.3.5. Videoendoskopija i reinterpretacija karotažnih merenja.....	161
5.3.6. Multivarijantni statistički metod obrade podataka.....	162
6. ODABIR LOKACIJA ZA ISTRAŽIVANJE GENEZE I USLOVA CIRKULACIJE VODA KUČAJSKO-BELJANIČKOG MASIVA.....	165
6.1. Opis odabranih lokacija.....	168
6.2. Izdvajanje karstnih sistema u okviru Kučajsko-beljaničkog masiva.....	193
7. TERENSKA ISTRAŽIVANJA I DOBIJENI REZULTATI.....	198
7.1. Rezultati sadržaja stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H (formiranje LIML) i jonskog sastava u padavinama.....	199
7.2. Rezultati istraživanja na odabranim karstnim sistemima.....	205
7.2.1. Rezultati istraživanja na sistemima sa gravitacionom cirkulacijom na Beljanici.....	205
7.2.2. Rezultati istraživanja na sistemima sa gravitacionom cirkulacijom na Kučaju.....	230
7.2.3. Rezultati istraživanja na sistemima sa ascendentnim tipom cirkulacijom na Beljanici.....	252
7.2.4. Rezultati istraživanja sistema sa ascendentno-gravitacionim	

<i>tipom cirkulacije</i>	274
7.3. Rezultati multivarijantne statističke analize	310
7.3.1. Istočna strana Kučajsko-beljaničkog masiva	310
7.3.2. Vrela sa brzom – gravitacionom cirkulacijom voda Kučajsko-beljaničkog masiva	313
7.3.3. Grupacija termalnih voda	320
7.4. Rezultati petroloških i hidrogeohemijskih istraživanja	325
7.5. Rezultati videoendoskopskih i karotažnih ispitivanja	335
8.0. ANALIZA REZULTATA I ZAKLJUČCI	342
8.1. Opšti uslovi formiranja i cirkulacije podzemnih voda Kučajsko-beljaničkog masiva.....	342
8.2. Intenzitet i baza karstifikacije Kučajsko-beljaničkog masiva	344
8.3. Geneza i starost toplih i hladnih podzemnih voda Kučajsko-beljaničkog masiva.....	347
8.4. Osvrt na potencijal i održivo korišćenje hladnih podzemnih voda Kučajsko-beljaničkog masiva.....	366
8.5. Predlog korišćenja termalnog potencijala karstnih voda.....	368
8.6. Lokacije i ocena dubine zahvatanja toplih voda u okviru pojedinih sistema	370
8.7. Predlog mera zaštite hladnih i toplih voda Kučajsko-beljaničkog masiva.....	371
8.8. Osvrt na značaj i upotrebljivost korišćenih metoda za postavljene ciljeve istraživanja	376
8.9. Predlog daljih istraživanja	379
9. ZAKLJUČAK	381
LITERATURA	

UVOD

Od ukupne vode na planeti, najveći deo pripada slanoj, okeanskoj vodi, dok samo 2.5% pripada malomineralizovanim (slatkim) vodama. Najveći deo (68.8%) ovih voda nalazi se u lednicima Arktika, Antarktika i Grenlanda, 1.1 % nalazi se u površinskim vodama jezera i rečnih tokova, dok 30.1% pripada podzemnim vodama (Lvovič, 1974, Margat & Der Gun 2014).

Podzemne vode predstavljaju izuzetno značajan resurs za korišćenje u različite svrhe, iz razloga što su obnovljive i, delimično ili potpuno, zaštićene od uticaja spoljašnjih faktora, samim tim i zagađenja. Zbog svog „boljeg“ kvaliteta u odnosu na površinske vode, daje im se prednost u iskorišćavanju za bilo koje namene. Međutim, obzirom da se nalaze u podzemlju i da jedan deo voda zaleže veoma duboko, teško ih je ispitivati u smislu utvrđivanja zone prihranjivanja, uslova cirkulacije i kontakta sa različitim stenskim masama i potencijalnim zagađivačima, kao i vremena koje provedu u podzemlju (Vasić, 2015).

Karstne vode predstavljaju jedan od najznačajnijih resursa u svetu, kada je u pitanju vodosnabdevanje podzemnim vodama. Oko 20-25% svetske populacije, kao što je slučaj i u Srbiji, koristi vode akumulirane u okviru karstne izdani (Ford & Williams, 1989, Stevanović *et al*, 2011). Karstne vode predstavljaju vodni resurs, formiran u okviru rastvorljivih stena sa kavernožnom ili disolucionom poroznošću, u čijem se sistemu pukotina, kaverni i kanala akumuliraju, transportuju kroz podzemlje i na kontaktu sa vodonepropusnom barijerom, ponovo ističu na površinu (Milanović P., 1999, Dragišić & Živanović, 2014, Stevanović, 2015).

Vode karstnih izdani imaju po pravilu dobre fizičko-hemijske karakteristike, a unutar karbonatnih stena mogu se akumulirati velike količine podzemnih voda, što je idealno sa aspekta vodosnabdevanje. S druge strane, karakteriše ih izrazita ranjivost na zagađivanja, zbog slabih samoprečišćavajućih svojstava sredine, i velika neravnomernost isticanja. Kako bi se pravilno i održivo upravljalo podzemnim vodnim resursom, neophodno je dobro poznavanje hidrogeološkog sistema, pod kojim se smatraju karbonatne ili

evaporitske formacije sa razvijenom disolucionom poroznošću, koje na osnovu graničnih uslova, primaju ulazne komponente (fluid) i vrše njihov transport i transformaciju u izlazne komponente (Fleming, 1975, Jemcov, 2008).

Najveću nepoznanicu za istraživače predstavlja period koji voda provede u podzemlju. Kada površinske vode uđu u podzemlje, dalje se sistemom pukotina kreću prema zoni koja drenira izdan rapidno, ukoliko su pukotine, kaverne i pećine većih dimenzija, ili lagano kroz sitne pukotine i pore u osnovi stene – matriksu (Goldscheider, 2015). Milanović P. (1999) navodi da čitava karstna izdan ima nagib prema erozionom bazisu koji je drenira i da upravo položaj erozionog bazisa predstavlja glavni faktor koji određuje pravac cirkulacije podzemnih voda. Poznavanjem podzemne morfologije terena, stiču se informacije o rasporedu i pružanju glavnih kanala, na osnovu čega se mogu odrediti mesta budućih vodozahvatnih objekata.

Aktuelnost problematike funkcionisanja karstne izdani, kao i veliki broj metodoloških postupaka koji se mogu primeniti u cilju definisanja zona prihranjivanja i veze između podzemnih i površinskih voda, vremena koje voda provede u podzemlju, kao i njene interakcije sa stenom, pri čemu se formira jedinstven hemijski sastav i temperaturni režim isteklih voda, zatim definisanje različite dubine zaleganja karstnih kanala toplih i hladnih voda, bili su polazna osnova za usmerenje na istraživanje karsta i definisanje teme doktorske disertacije.

Kučajsko-beljanički masiv nalazi se u istočnoj Srbiji i pripada oblasti Karpato-balkanskog luka, koji se kroz Srbiju proteže od granice sa Rumunijom do granice sa Bugarskom (Stevanović, 1991). U okviru ovog masiva, često se na relativno malom rastojanju javljaju hladne vode u vidu jakih karstnih vrela, u čijoj se neposrednoj blizini javljaju i pojave toplih karstnih izvora. Pretpostavke od kojih se pošlo u rešavanju predmetne problematike je da se u okviru ovog karstnog masiva nalazi veći broj kompleksnih karstnih sistema. Na osnovu toga, može se postaviti hipoteza da vode različite temperature sa iste lokacije, potiču iz „iste karstne izdani“, odnosno iz istog kompleksnog karstnog sistema, u okviru jedinstvenog karstnog masiva.

Poseban istraživački izazov predstavlja utvrđivanje dubina zaleganja karstnih kanala hladnih i toplih voda, pri čemu je utvrđivanje starosti ovih voda prvi korak u istraživanju. Činjenica je da vode sa povišenom temperaturom zaležu dublje u podzemlje, gde provode znatno više vremena i gde, usled nekog od faktora stvaranja toplote, kao što su prirodni geotermalni gradijent sa dubinom, hemijski procesi u nekim delovima unutrašnjosti zemlje, mehaničko trenje masa usled velikih orogenih pokreta, raspadanja radioaktivnih elemenata ili jednostavnog javljanja grejnog tela, kao što su magmatiti, dolazi do njihovog zagrevanja (Krunić, 2012).

Vode se na istraživanim lokacijama Kučajsko-beljaničkog masiva javljaju u različitom temperaturnom rasponu, pa tako pored jakih karstnih izvora sa hladnom vodom temperature od 8-11°C, postoji niz pojava voda, uglavnom manje izdašnosti, sa temperaturama od 14-36°C, rasprostranjenih po severnom, zapadnom i južnom obodu istražnog prostora. Ovo ukazuje na zonalnost javljanja voda sa povišenom temperaturom, kao i na različitost stepena karstifikacije po vertikalnom profilu na određenim lokacijama u okviru istražnog terena.

Neki od hladnih izvora ovog masiva su već kaptirani za potrebe vodosnabdevanja (Belosavac, Malo vrelo, Mrljiš, Zlatsko vrelo, Beljevina itd.), a mnogi predstavljaju veliki potencijal pijaće vode, kako na lokalnom, tako i na regionalnom nivou, što ovu lokaciju čini posebno značajnom. S druge strane definisanje dubine zaleganja toplih voda, uslovi mešanja sa hladnim vodama, određivanje njihove starosti, preduslov su i za njihovo održivo korišćenje. Tople vode karsta Kučajsko-beljaničkog masiva predstavljaju značajan geotermalni potencijal, a uz primenu toplotnih pumpi bi se znatno povećao i stepen njihovog korišćenja.

1. CILJEVI DOKTORSKE DISERTACIJE

Osnovni cilj doktorske disertacije predstavlja definisanje geneze podzemnih voda, uslova cirkulacije toplih i hladnih voda, procena dubine zaleganja karstnih kanala i utvrđivanje vremena boravka vode u podzemlju, kao i povezanosti površinskih i podzemnih voda i distribucije voda unutar odabranih kompleksnih karstnih sistema. Stoga se može reći da

je generalni cilj disertacije utvrđivanje funkcionisanja složenih karstnih sistema, formiranja hemijskog sastava i cirkulacije toplih i hladnih podzemnih voda unutar njih. Postavljeni ciljevi doktorske disertacije se generalno mogu podeliti na opšte i uže ciljeve. Opšti ciljevi izrade ove doktorske disertacije bili su:

- definisanje geneze podzemnih voda i vertikalna zonalnost hladnih i termalnih voda,
- izdvajanje kompleksnih karstnih sistema u okviru karstnog masiva,
- definisanje funkcionisanja kompleksnih karstnih sistema,
- održivo upravljanje resursima toplih i hladnih voda,
- podizanje svesti o značaju očuvanja podzemnih vodnih resursa i životne sredine,
- razvoj turizma i poljoprivrede na širem području istraživanja.

Uži ciljevi izrade doktorske disertacije bili su:

- analiza uspostavljene veze između površinskih i podzemnih voda,
- utvrđivanje starosti voda i vremena boravka vode u podzemlju,
- procena dubine zaleganja karstnih kanala,
- utvrđivanje izmene hemijskog sastava voda u pogledu osnovnih fizičko-hemijskih parametara i sadržaja jona od ulaska u sistem do izlaska na površinu terena,
- utvrđivanje intenziteta, dubine i baze karstifikacije,
- definisanje grejnog tela.

Takođe, ova disertacija pored naučnih ciljeva imala je i praktični cilj, koji se ogleda u definisanju dubine zaleganja karstnih kanala toplih voda, što predstavlja nadogradnju prethodnih istraživanja na istražnom prostoru, i na osnovu čega bi se moglo izvršiti pouzdanije projektovanje istražnih bušotina za zahvatanje toplih voda, u smislu definisanja lokacija i dubina bušenja. Zahvatanje većih količina toplih voda doprinelo bi turističkom razvoju sredine i razvoju poljoprivrede kroz grejanje plastenika i staklenika, a takođe, termalne vode bi se mogle koristiti i za toplifikaciju objekata.

Kako je jedan od opštih i osnovnih ciljeva disertacije bio da se definiše geneza podzemnih voda i vertikalna zonalnost hladnih i termalnih voda, može se reći da je sveobuhvatna analiza dobijenih rezultata dala dobre informacije o uslovima formiranja voda, kao i da je ukazala na jasno izraženu vertikalnu zonalnost prostiranja podzemnih voda, kako hladnih, tako i toplih.

Usvajanjem kriterijuma za izdvajanje kompleksnih karstnih sistema u okviru masiva, izvršena je rejonizacija, odnosno uspešno su izdvojeni sistemi i delimično je utvrđen mehanizam njihovog funkcionisanja. Izotopske analize dale su dobre rezultate po pitanju definisanja starosti podzemnih voda, na osnovu čega je procenjena vertikalna zonalnost cirkulacije. Međutim, kako na istražnom prostoru nema dovoljno dubokih bušotina (preko 400 metara), ne može se sa sigurnošću tvrditi koje su tačno dubine do kojih podzemne vode zaležu, kao ni koje su maksimalne temperature voda na velikim dubinama, pa se može zaključiti da su istraživanja dala samo delimičnu procenu zaleganja karstnih kanala, dok su za utvrđivanje realnih dubina cirkulacija podzemnih voda, neophodna obimna geofizička istraživanja, kao i izrada veoma dubokih istražnih bušotina (dubine 500-1000 m).

Utvrdjivanje postojanja i definisanja grejnog tela, vršeno je kroz hidrohemijska i izotopska istraživanja. Rezultati su pokazali da temperatura podzemne vode delimično zavisi od dubine cirkulacije i vremena boravka u podzemlju, ali je takođe, na osnovu sadržaja mikroelemenata u vodi, potvrdila da na temperaturni režim uticaj mogu imati i stene mladog vulkanizma (daciti). O postojanju grejnog tela svedoči i uporedna analiza starosti i temperature vode, koja ukazuje da voda najvećeg temperaturnog gradijenta nije najstarija voda, odnosno da je voda pri kraćem boravku u podzemlju, stekla veću temperaturu, najverovatnije usled kontakta sa vulkanskim stenama. Ipak, tačno definisanje porekla toplote, postojanja grejnog tela i dubine na kojoj ono zagreva vode, nije utvrđeno sprovedenim analizama. Za ovako precizne informacije, neophodno je analizirati podatke dobijene ispitivanjem voda i sadržaja stenske mase iz većeg broja istražnih bušotina dubine preko 500 m.

Datiranje mladih, hladnih voda u periodu recesije, uspešno je sprovedeno metodom $^3\text{H}/^3\text{He}$, pri čemu su dobijene starosti od nekoliko meseci, do nekoliko desetina godina. Procena zadržavanja voda u podzemlju u periodu izražene vodozamne, izvedena je utvrđivanjem temperaturnih uslova u zoni prihranjivanja, na osnovu rezultata plemenitih gasova u vodi. Međutim, temperaturni uslovi koji su vladali u periodu infiltracije vode u podzemlje omogućavaju samo delimičnu procenu vremena boravka vode u podzemlju, naročito kada su u pitanju hladne vode koje imaju razvijenu vertikalnu zonalnost karstnih kanala kojima voda cirkuliše (pliće i dublje kanale).

Za tačno definisanje srednjeg vremena zadržavanja voda u podzemlju u periodu malih, srednjih i velikih voda, neophodno je izvršiti ciklus mesečnih uzorkovanja podzemnih voda u periodu od najmanje jedne godine, kako bi se definisale varijacije sadržaja stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H u podzemnim vodama i pratile njihove promene u odnosu na lokalnu meteorsku krivu. Savremenim jednačinama, kroz analizu ovako dobijenih podataka, može se relativno pouzdano utvrditi srednje vreme koje voda provede u podzemlju u bilo kom periodu hidrološkog ciklusa. Svakako, ovakva istraživanja su veoma skupa, naročito kada je u pitanju veliki broj pojava i objekata koji se osmatraju, i iz tog razloga nisu bila primenljiva za potrebe izrade disertacije.

Rezultati hidrohemijskih analiza površinskih (ponorskih) i podzemnih voda, koji uključuju fizičko-hemijske parametre, jonski i izotopski sastav vode, ukazali su na njihovu vezu, međutim, ukazali su i da se primarno prihranjivanje karstne izdani ne vrši koncentričnim poniranjem površinskih voda u ponore, već da je u domenu prihranjivanja podzemnih voda, posebno izražena difuzna infiltracija atmosferskih padavina. Upravo su ove informacije doprinos poznavanja veze između površinskih i podzemnih voda. Pored ovih, rezultati su ukazali i na izražene hidrogeohemijske uslove koji vladaju u sistemima, naročito za vode koje duboko zaležu u podzemlje. Na osnovu analiza, praćene su i izmene parametara od ulaska do izlaska iz sistema.

Još jedan od važnih ciljeva disertacije bio je da se utvrdi intenzitet, dubina i baza karstifikacije. Iako su u ovoj analizi korišćeni svi do sada dostupni podaci (rezultati prethodnih istraživanja, reinterpretacija karotažnih merenja, video-endoskopski snimak

bušotine, kao i rezultati izotopskih analiza), tačan odgovor na prostiranje baze karstifikacije nije dobijen. Na osnovu ovih podataka, data je gruba procena baze karstifikacije na određenim lokacijama, koje su raspolagale podacima o izvedenom istražnom bušenju. Kako su ove bušotine relativno plitke (max. 400 m), reinterpretacijom podataka stekao se uvid u karstifikaciju stenske mase do krajnje dubine bušotine. Stoga se izvodi zaključak da je uspostavljanje baze karstifikacije veoma složen zadatak, i da mu se može pristupiti samo interpretacijom podataka velikog broja dubokih istražnih bušotina (do 1000 m).

Iako na neke od postavljenih ciljeva disertacija nije dala precizne i konačne podatke (intenzitet i dubina baze karstifikacije, dubina zaleganja karstnih kanala, vrsta i dubina rasprostranjenja grejnog tela), ipak se može zaključiti da je dala veliki doprinos poznavanju geneze podzemnih voda u kompleksnim karstnim sistemima u okviru Kučajsko-beljaničkog masiva, i proceni dubine zaleganja hladnih i toplih voda u okviru masiva, kao i definisanju vertikalne zonalnosti rasprostranjenja karstnih kanala.

2. DOSADAŠNJA SAZNANJA IZ PREDMETNE PROBLEMATIKE

Funkcionisanje jednog karstnog sistema ogleda se kroz osobine izdani koje su promenljive u vremenu i prostoru, a to su propustljivost i količine voda koje se mogu akumulirati unutar izdani, uslovi i pravci cirkulacije podzemnih voda, proces prihranjivanja i dreniranja izdani, kvalitet podzemnih voda i drugi (Stevanović, 2015).

Izučavanjem karstnih sistema bavili su se mnogi naučnici do sada, koristeći u svojim istraživanjima različite metode, kao što su geološke i geomorfološke, hidrološke, hidrauličke, speleološke, geofizičke, traserske, izotopske i hidrohemijske metode. Međutim, zbog svoje kompleksnosti u odnosu na druge geološke formacije, istraživači u karstu najčešće koriste multiparametarski pristup istraživanja, odnosno više odgovarajućih metodoloških postupaka istraživanja u zavisnosti od svrhe i cilja istraživanja.

Sistematska istraživanja karstne izdani datiraju još od 19. veka, a naš Jovan Cvijić smatra se i osnivačem naučne discipline karstologije (1893). Jedno od prvih mišljenja o podzemnim vodama u karstu iznosi Grund (1903) godine, koji navodi da u okviru karsta postoji jedinstveni horizont, koji naziva izdan, a u okviru kojeg se nalaze dva sloja podzemnih voda, stagnirajuća i karstna voda. Stagnirajuća je zarobljena u pukotinama i kavernama na velikim dubinama i ne kreće se, dok karstna voda, predstavlja tekuću vodu, koja cirkuliše i kreće se prema erozionim bazisima (Milanović P., 1979). Lehmann (1932) smatra da se vode u karstnoj izdani kreću samo kroz pukotine širine veće od 1 mm, dok u manjim pukotinama kretanje izostaje.

Jedno od najvažnijih mišljenja, podržanog od strane mnogih naučnika, o cirkulaciji podzemnih voda u karstu iznosi Cvijić (1918), koji navodi da generalno postoje tri tipa cirkulacije podzemnih voda: suvi deo sa prokapnim vodama, prelazni deo i deo sa aktivnom cirkulacijom podzemnih voda. Suvi deo, zapravo predstavlja potpovršinski deo, koji je najčešće suv, a sastoji se od velikog broja kaverni i kanala, koji u periodu velikih voda, sprovode vodu do prelazne zone. Prelazna zona predstavlja zonu u okviru koje dolazi do formiranja podzemnih voda, dok u zoni aktivne cirkulacije, voda usporeno i sifonalno cirkuliše kroz pukotine. Ovu teoriju kasnije Rižikov (1954) podržava, a zone definiše kao vertikalnu, horizontalnu i sifonalnu cirkulaciju (Milanović P., 1979).

Takođe, jednu od važnijih teorija cirkulacije podzemnih voda uopšte, dao je Toth (1963), koji ističe razliku između lokalnih, srednjih i regionalnih sistema cirkulacije u okviru jednog hidrogeološkog sistema. Na osnovu proračuna, dokazao je da se u okviru jednog sistema može naći više zona prihranjivanja i pražnjenja izdani (slika 2.1.), što je upravo slučaj Kučajsko-beljaničkog masiva, gde se u okviru jednog kompleksnog karstnog sistema javlja više različitih tipova cirkulacije (Krupajske pojave, Krivi Vir).

uključujući i one spore, a što značajno utiče na promenu hemijskog sastava (Younger, 2007). Karstne vode su uglavnom malomineralizovane, što je posledica brze vodozamene i cirkulacije kroz podzemlje. U pogledu kvaliteta, bolje osobine pokazuju karstne vode koje zaležu znatno dublje u podzemlje, gde je svojstvo samoprečišćavanja izdani aktivnije izraženo. Shodno tome, Stevanović (2015) izdvaja tri zone u okviru karstnog sistema, sa aspekta povoljnosti kvalitativnih karakteristika podzemnih voda:

1. Prva zona - zona brze cirkulacije podzemnih voda i najmanje je povoljna sa aspekta hidrohemijskih karakteristika voda, kao i uslova za zaštitu;
2. Druga zona – zona usporene vodozamene sa horizontalnom ili sifonalnom cirkulacijom, a karakterišu je podzemne vode najboljih kvalitativnih karakteristika;
3. Treća zona – zona poremećene razmene vode, gde je razmena vode veoma usporena, pa se ova zona ne definiše povoljnom sa aspekta vodosnabdevanja, obzirom na često povišene temperature i visok sadržaj mikro i makroelemenata u vodi.

Pre manje od jednog veka, otkriće izotopa i radioaktivnosti je praktično promenilo svet. Nuklearna era, odnosno rođenje nuklearne hemije i nuklearne fizike, počela je početkom 1896. godine Bekerlovim pronalaskom spontane emisije energije na fotografsku ploču. Taj pronalazak nazvan je kasnije radioaktivnošću. Otkriće izotopa je vezano za otkriće radioaktivnosti, kao i sastavljanje Periodnog sistema elemenata. Otkriće radioaktivnosti Mariju i Pjera Kiri dovelo je 1898. godine do zaključka da neki elementi mogu imati različite atomske težine. Krajem prve decenije 20 veka došlo je do otkrića da neki od elemenata imaju ista hemijska svojstva, a različita radioaktivna, te se hemijski ne mogu odvojiti jedan od drugog. Na osnovu ovog saznanja, Stremholm i Svedbegr su dali predlog da se ovi elementi postave na isto mesto u Periodnom sistemu elemenata (Miljanić, 2008).

Za otkriće retkih stabilnih (ili blago radioaktivnih) izotopa mnogih elemenata, bilo je potrebno neko vreme, i već u 1929. godini su Giaouque i Johnston otkrili redak izotop kiseonika ^{18}O , zastupljenosti od oko 1500 ppm i ^{17}O oko 500 ppm (Giaouque i Johnston, 1929a i 1929b). Urey, u toku 1932. godine otkriva izotop vodonika sa masom 2, koji naziva deuterijum (^2H ili D) i dokazuje da ovaj izotop postoji u prirodnim vodama sa

zastupljenošću od oko 100 ppm, a što je bilo teško odrediti sa dobrom preciznošću (Urey *et al*, 1932). Obzirom da je bilo poznato izdvajanje izotopa istog elementa ili makar njihovo obogaćenje pomoću klasičnog metoda kao što je frakciona destilacija, bilo je moguće predvideti da isparavanje i kondenzacija vode mogu imati uticaj na rasprostranjenje deuterijuma u prirodnim vodama (Letolle & Olive, 2004).

Letolle i Olive (2004) navode da je 1932. godine, osmišljen specijalni maseni spektrometar za proučavanje izotopa kiseonika, pa su Bleakney i Hipple 1935. godine napravili kratko istraživanje sa ovim izotopima. Otkrivanje radioaktivnih izotopa u vodi započelo je 1937. godine.

Radioaktivni izotop vodonika (tricijum) detektovao je Gross 1922 godine. Obzirom na kratko vreme poluraspada izotopa, svoju primenu našao je u datiranju mlađih voda. Clark & Fritz (1999) navode da su izotop ^{14}C su otkrili Kammen i Ruben 1937. godine, a 1947. je iskorišćen za datiranje arheoloških i geoloških materija od strane Libby-ija (1952). Njegovo veliko vreme poluraspada je korisno za određivanje hronologije poznog kvartara i veoma često se koristi u hidrogeologiji za datiranje podzemnih voda (Clark & Fritz, 1999).

U toku druge polovine 20. veka desio se i značajan napredak u razvoju tehničkih uređaja: bolji elektronski uređaji (preciznost merenja ^3H povećala se sto puta od 1980 godine), nove tehnike merenja (mikromerenja za ^{18}O analize, maseni spektrometar za ^{14}C i druge radioaktivne izotope, kao i razvitak automatskih uzorkivača i analizatora, pomogli su razvoj izotopske i radioaktivne nauke, a samim tim i rešavanju mnogih problema u okviru hidrologije i hidrogeologije (Letolle & Olive, 2004).

Pronalaskom radioaktivnih izotopa vodonika i ugljenika, kao i nalaženjem svrhe njihove primene u hidrologiji i hidrogeologiji, nastala je potreba za istraživanjem drugih radioaktivnih izotopa, koji bi se mogli koristiti za datiranje podzemnih voda, ili kao idealni traseri. Izotop tricijuma se koristio za datiranje mladih voda, dok se izotop ^{14}C koristio za datiranje starih voda, pa je bilo neophodno istražiti izotope drugih elemenata i mogućnost njihove primene pri datiranju voda čije se vreme poluraspada nalazi između

vremena poluraspada tricijuma i ugljenika ^{14}C . Pored navedenih radioaktivnih izotopa, postoji veliki broj drugih izotopa sa kojima je vršen pokušaj korišćenja u hidrološke i hidrogeološke svrhe, kao što su ^{26}Al , ^{39}Ar , ^{10}Be , ^{36}Cl , ^{32}Si , ^{129}I , ^{137}Cs .

Pomenuti izotopi spadaju u veoma retke izotope dobijene nuklearnim reakcijama. U vreme istraživanja ovih izotopa nije bio razvijen precizni maseni spektrometar, pa je tako pri prvom korišćenju izotopa ^{39}Ar bilo neophodno nabaviti uzorak vode težak 30 tona, za čije je analiziranje bio potreban dugačak vremenski period kako bi se dobila odgovarajuća statistička masa za analize.

Primena izotopskih metoda istraživanja u cilju definisanja funkcionisanja jednog sistema, našla je veliku primenu sredinom 20 veka. Zbog mogućnosti primene različitih vrsta izotopa, ova metoda se sve češće koristi za izučavanje uslova cirkulacije podzemnih voda i ujedno i karstnih sistema.

U karstnim terenima, najčešće se koriste analize stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H u svrhu definisanja zona prihranjivanja i utvrđivanje veze podzemnih i površinskih voda (padavine, reke, jezera). Međutim, za utvrđivanje vremena boravka vode u podzemlju, sve češću primenu imaju i radioaktivni izotopi. Obzirom da izotopske metode istraživanja predstavljaju osnovni metodološki postupak primenjen u okviru disertacije, više o izotopskim metodama biće izneto u okviru poglavlja 5.

3. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA U OBLASTI KUČAJSKO-BELJANIČKOG MASIVA

Pri odabiru lokacije za istraživanja, jedan od uslova je bio i dosadašnja dobra istraženost terena, obzirom da je za sveobuhvatnu analizu geneze i uslova cirkulacije podzemnih voda neophodno prikupiti što veći broj podataka prethodnih istraživanja o pojavama, količinama i kvalitetu vode, uslovima cirkulacije i funkcionisanju karstnog sistema.

Na prostoru ovog masiva vršena su obimna geološka, geomorfološka, hidrološka i hidrogeološka istraživanja. Geološka istraživanja započeta su još 1891. godine od strane

A. Boué-a, a kasnije su ih nastavili S. Radovanović, J. Cvijić, V. Petković, R. Jovanović i mnogi drugi. Detaljniji podaci o geologiji terena izneti su u radu o geologiji istočne Srbije, V. Petkovića 1935. godine. Kasnije su se istraživanjem geologije terena bavili stručnjaci Geozavoda, a rezultat njihovog istraživanja je izrađena Osnovna geološka karta razmere 1:100 000 (1970).

Proučavanjem hidrografskih i hidroloških karakteristika istočne Srbije, kao i Kučajsko-beljaničkog masiva bavili su brojni naučnici. J. Cvijić jedan je od prvih naučnika koji je kroz svoje studije "Pećine i podzemna hidrografija u Istočnoj Srbiji" (1895) i "Izvori, tresave i vodopadi u Istočnoj Srbiji" (1896) postavio osnove poznavanja hidroloških i hidrografskih svojstava terena, a pored njega u istoj oblasti istraživanja istakli su se i brojni drugi naučnici kao J. Petrović, D. Gavrilović, D. Dukić, M. Ocokoljić i drugi (Ristić, 2007, Milanović S, 2010).

Kučajsko-beljanički masiv se odlikuje složenim tektonskim sklopom i kao takav izučavan je od velikog broja istraživača. Prva mišljenja o tektonici ovog područja izneo je u okviru studije „Tektonika Balkanskog poluostrva“ Cvijić 1904. godine. On je naveo da južni Karpati tektonski ne pripadaju masivu Balkana. Pored ovog, Cvijić je mišljenja da postoji navlačenje u tektonskoj građi istočne Srbije, kao i da na strukturu planinskih venaca uticaj ima mlađa radijalna tektonika (Stevanović, 1981). Teoriju navlačenja podržava i S. Radovanović (radovi objavljeni u periodu 1891-1925), S. Bončev (1910, 1923), kao i F. Kossmat (1914, 1923,1924) i L. Kober (1914, 1929).

Dalje, V. Petković razvija ideju o postojanju intenzivnih horizontalnih kretanja i navlaka, pa u svojim radovima "O tektonskom sklopu Istočne Srbije" (1930) i "Geologija Istočne Srbije" (1935), piše o alpskoj strukturi istočne Srbije, gde se ovim pokretima formiraju strukturni oblici (kraljušti i navlake, polegale bore) vezani za hercinsku i alpsku orogenezu (Milanović S, 2010).

O orogenim i epirogenim pokretima koji su usledili po stvaranju navlaka, a koji su praćeni radijalnim rasedanjima ponavljanim u više navrata, piše M. Luković 1938. godine. On navodi da su prvi snažni pokreti tokom donjeg oligocena izazvali stvaranje jezerskih

basena (Bogovinski basen), u drugoj orogenoj fazi početkom miocena nastaje kraljušasto navlačenje, dok u trećoj fazi, krajem pliocena dolazi do novih rasedanja (Stevanović, 1981).

Početkom 50-ih godine XX veka javljaju se i prva oprečna mišljenja da u okviru Karpatobalkanida nema većih navlačenja, pa tako B. Milovanović 1950. godine iznosi mišljenje da ne postoje snažna horizontalna kretanja, već daje značaj vertikalnim kretanjima i manjim pojavama navlačenja. Da su navlačenja i pojave reversnog rasedanja lokalnog karaktera, mišljenje 1956. godine iznosi i I. Antonijević. Mišljenje o nepostojanju velikih horizontalnih kretanja i navlačenja navodi 1959. godine i Grubić, koji u kasnijim radovima prihvata tezu o velikim horizontalnim kretanjima.

Postojanje navlake "Rtnja i Kučaja" podržava i B. Maksimović (1952), u okviru koje izdvaja zapadni krečnjački pojas Kučaja - pojas "ravaničkih krečnjaka", pojas crvenih pešćara, i istočni krečnjački pojas Kučaja - pojas "brezovičkih krečnjaka" (Stevanović, 1981).

Geomorfološka građa istražnog prostora je dosta složena, pa je shodno tome i privlačila veliki broj istraživača, kako u prošlosti, tako i danas. Među prvim radovima treba istaći istraživanja Cvijića, koji pored pomenutog rada u kojem vrši morfološku analizu i klasifikaciju podzemnih karstnih oblika, iznosi i rezultate geografskih istraživanja karstnih terena u okviru rada „Geografska ispitivanja u oblasti Kučaja u istočnoj Srbiji (1893). Cvijić detaljno analizira uslove formiranja vrtača, odnosno glavnog angensa koji učestvuje u procesu formiranja vrtača, pri čemu postavlja osnov teorije “erozije tekuće i atmosfere vode” (Stevanović, 1997, Milanović S, 2010).

Geomorfološka saznanja o podzemnim i površinskim karstnim oblicima izneo je J. Petrović u okviru sitnetskih radova “Krš istočne Srbije” i “Jame i pećine SR Srbije” (1974-1976). D. Petrović opisuje u studijama geomorfološke karakteristike sliva Zlatske reke (1954) i sliva Crnog Timoka (1970), a pored toga u brojnim radovima daje opise nekih speleoloških objekata, uvala i krečnjačkih dolina na Kučajskom masivu. Brojna istraživanja sprovedena su i od strane Č. Milića, D. Gavrilovića i R. Lazarevića. Detaljan

opis geomorfoloških karakteristika karbonatnog i nekarbonatnog dela Kučajsko-beljaničkog masiva daje Stevanović (1981), a neke od značajnih rezultata istraživanja istočnog dela masiva daje Dragišić (1989), u monografiji „Hidrogeološke karakteristike šire okoline Bora“.

Rezultati brojnih speleoloških istraživanja prikazani su u elaboratima o speleološkim istraživanjima na listovima OGK “Žagubica” i OGK "Boljevac" (Mandić 1988-1990), pri čemu su detaljno prikazani značajni podzemni karstni oblici masiva. Podaci o ovim oblicima su vremenom upotpunjeni i kompletirani od strane drugih speleoloških organizacija, pk AS i ASOS (Milanović S, 2010).

Novija istraživanja (uključujući i speleoronička) karstnih oblika, sa posebnim akcentom na vrtače, pećine, jame i karstne kanale sprovedena su na Beljaničkom masivu od strane S. Milanovića (2010) za potrebe izrade fizičkog modela karstne izdani u okviru doktorske disertacije.

Prva hidrogeološka istraživanja koja su rezultirala klasifikacijom izvora u istočnoj Srbiji na "obične izvore koji izbijaju iz pećina ili pukotina", vrela i jezera, odnosno vodom ispunjene basene i potajnice iz kojih "voda na mahove teče i prestaje", vrši Cvijić (1896), koji u svojoj studiji "Izvori vodopadi i tresave u istočnoj Srbiji" daje opis 159 izvora sa nazivima, lokacijama, nadmorskim visinama, temperaturom vode i tipom stena iz koje vode ističu (Milanović S, 2010).

Detaljnija hidrogeološka istraživanja uglavnom su vršena u cilju iskorišćavanja podzemnih voda za potrebe vodosnabdevanja, kao i za dobijanje većih količina termalnih voda. Istraživanja hidrogeoloških karakteristika sliva Crnog Timoka vršena od strane J. Nikolića 1969. godine, dok su istraživanja za vodosnabdevanje borskih rudnika i naselja sproveli J. Nikolić i A. Vukovića 1971. godine. Lj. Palavestrić se 1972. godine bavio istraživanjem zapadnog Kučaja i Beljanice za potrebe izrade elaborata regionalnih hidrogeoloških istraživanja istočnog sliva Velike Morave, dok su istraživanja za utvrđivanje ovodnjenosti rudnika 1974. i 1975. godine i sproveli A. Vuković i drugi autori Geozavoda.

Hidrogeološkim istraživanjima za potrebe utvrđivanja povezanosti površinskih i podzemnih voda, odnosno veze između ponora i izvora, bavili su se brojni naučnici, prilikom čega je izvršen veći broj opita obeležavanja (J. Petrović 1953. veza ponor Rečke-Veliko i Malo vrelo; 1974. grupa stručnjaka Geozavoda veza ponor Busovata-Veliko vrelo; Geozavod 1970. veza Nekudovo-Crnica, Velika Brezovica-Radovansko vrelo, i mnogi drugi). Pored ovih, značajna istraživanja hidrogeoloških karakteristika Kučajsko-beljaničkog masiva sproveli su stručnjaci Departmana za hidrogeologiju, tadašnje OOUR grupe za hidrogeologiju Rudarsko-geološkog fakulteta u Beogradu. O prethodnim istraživanjima vršenim za potrebe utvrđivanja veze ponor-izvor, više će biti reči u poglavlju o hidrogeološkim karakteristikama karstne izdani.

Doprinos poznavanju hidrogeoloških karakteristika podzemnih voda Kučajsko-beljaničkog masiva dao je N. Milojević sa drugim autorima, koji je u periodu 1962-1980. godine, izvršio ispitivanje podzemnih voda, što je rezultiralo izradom brojnih radova. Veoma značajna istraživanja podzemnih voda u cilju zahvatanja termalnih vodosprovedena su od strane B. Filipovića, N. Dimitrijević, Z. Stevanović i drugih. Godine 1978. B. Filipović i grupa autora bavili su se ispitivanjem Krivovirske kotline i južnog Kučaja, dok su ispitivanja za potrebe zahvatanja većih količina toplih voda u selu Milanovac (Krupajsko vrelo i Banjica), vršili '80-ih godina B. Filipović, N. Dimitrijević i Z. Stevanović. U ovu svrhu izvršena je izrada nekoliko istražnih bušotina (maksimalno 400 metara na Krupajskom vrelu, međutim, samo je u Sisevcu, izradom bušotine od 216 metara dobijena voda više temperature, nego što je iznosila na toplom izvoru u neposrednoj blizini (Martinović, 2009).

Obimna hidrogeološka istraživanja istočnog i jugoistočnog dela Kučaja izvedena su za potrebe vodosnabdevanja grada Bora i Boljevca, od strane stručnjaka Departmana za hidrogeologiju i Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ u periodu 1990-2002. godina. Istraživanja su rezultirala otvaranjem izvorišta Mrljiš, koje se trenutno sastoji od tri bunara, od kojih su dva bunara konstantno u funkciji vodosnabdevanja (Stevanović, 2010).

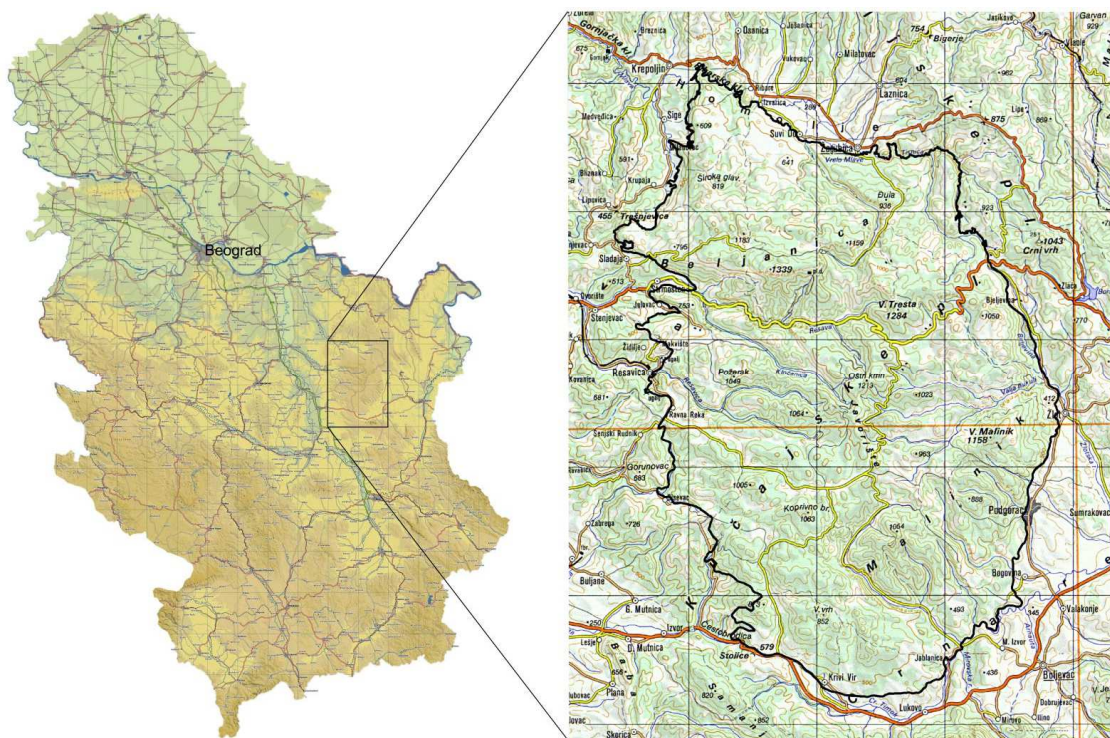
Značajnim istraživanjima po pitanju rejonizacije masiva, odnosno izdvajanja slivova i karstnih sistema u okviru masiva bavili su se Z. Stevanović, V. Ristić i S. Milanović. Stevanović (1981) u svom magistarskom radu „Hidrogeološke karakteristike karsta Kučajsko-beljaničkog masiva sa aspekta mogućnosti korišćenja izdanskih voda za vodosnabdevanje“ vrši podelu u okviru celog masiva na ukupno 12 ležišta izdanskih voda na osnovu uslova cirkulacije i isticanja podzemnih voda. U okviru ovih 12 ležišta dalje vrši podelu na potencijalna eksploataciona polja. Takođe, V. Ristić (2007) i S. Milanović (2010) u okviru svojih doktorskih disertacija se bave podelom slivova Beljaničkog masiva primenom različitih metoda.

Generalno, na osnovu pregleda prethodnih istraživanja sprovedenih u okviru masiva, može se zaključiti da je masiv veoma dobro istražen, te da postoji veliki broj podataka o kako o geološkim i geomorfološkim, tako i o hidrogeološkim karakteristikama terena, a koji su bili od velikog značaja pri sadašnjem istraživanju geneze i uslova cirkulacije toplih i hladnih podzemnih voda.

4. OPŠTE KARAKTERISTIKE ISTRAŽNOG PODRUČJA

4.1. Geografski položaj i okonturivanje istražnog prostora

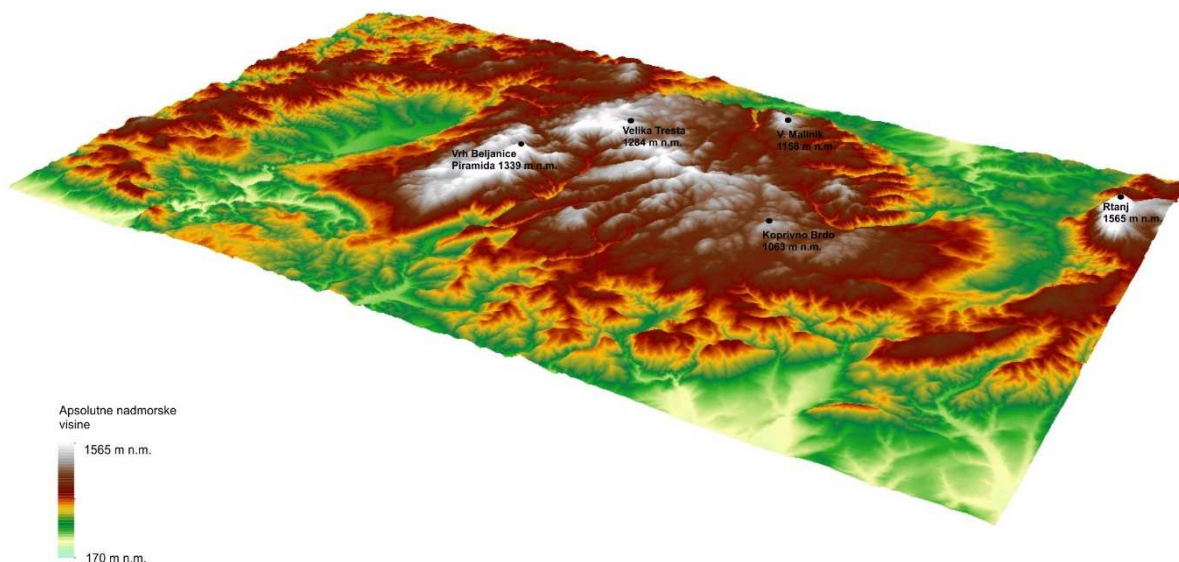
Kučajsko-beljanički masiv nalazi se u istočnoj Srbiji (slika 4.1.), pripada oblasti Karpato-balkanskog luka, koji se kroz Srbiju proteže od granice sa Rumunijom do granice sa Bugarskom (Stevanović, 1991). Planinski kompleks sačinjen od dve planine, Kučaja i Beljanice, jedan je od najvećih planinskih masiva istočne Srbije i proglašen je parkom prirode.



Slika 4.1. Geografski položaj istražnog terena sa granicom Kučajsko-beljaničkog masiva

Sa severne strane masiv je ograničen Žagubičkom kotlinom, koja ga deli od Homoljskih planina, dok južnu granicu predstavlja Crnorečka, odnosno Krivovirska kotlina (OGK, 1970), koja ga zajedno sa Čestobrodicom odvaja od planinskog masiva Rtanj. Zapadnu granicu masiva predstavlja dolina Morave, a obod se prostire od Krepoljina do Donje Mutnice, dok se na istoku masiv prostire od južnih padina Crnog Vrh na severu, preko Podgorca do Bogovine na jugu (Stevanović, 1981).

Za potrebe izrade disertacije, izvršeno je okonturivanje terena, čija površina iznosi oko 1076 km². Masiv se karakteriše brdsko-planinskim reljefom (slika 4.2.), sa razvijenom hidrografskom mrežom koja pripada slivu Mlave, Resave, Morave, Crnog Timoka, odnosno slivu Dunava. Prosečna nadmorska visina kreće se između 800 i 900 m u centralnim delovima masiva, dok se obodni deo karakteriše nižim nadmorskim visinama, u proseku od oko 300 m. Najviša kota se nalazi na Beljanici (Piramida) i iznosi 1339 m (Milanović S, 2010), dok je najviša kota Kučaja planinski vrh Velika Tresta i iznosi 1284 m. Pored karstnih izvora, masiv se odlikuje i većim brojem jama i pećina, vodopada i kanjona.



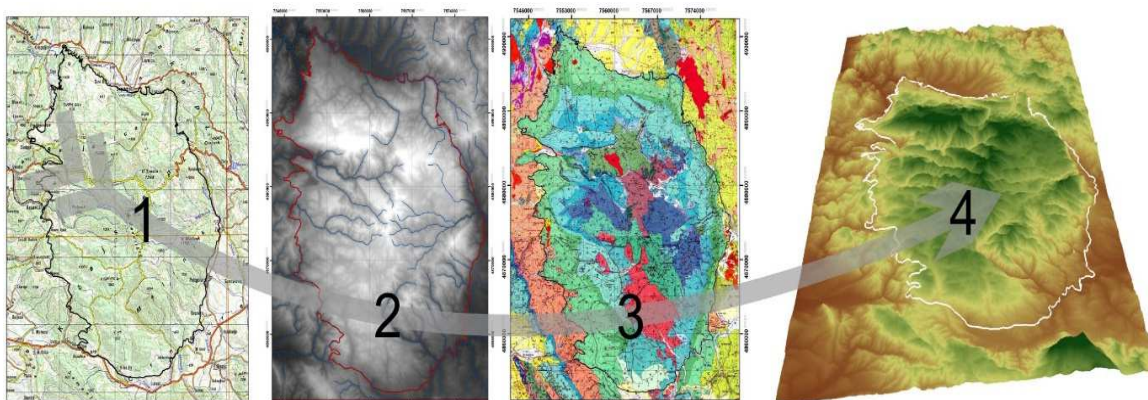
Slika 4.2. 3D prikaz šire zone istraživanog terena sa glavnim planinskim vrhovima

Istražni prostor obuhvata 5 opština: Žagubica, Despotovac, Bor, Boljevac i Paraćin. Većina ovih opština (npr. Žagubica i Bor) za vodosnabdevanje koristi vode koje se dreniraju po obodu Kučajsko-beljaničkog masiva u vidu jačih i slabijih karstnih vrela, kao i manjih izvora subtermalnih voda.

Kučajsko-beljanički masiv povezan je lokalnim putevima sa regionalnim saobraćajnicama, koje su povezane sa auto-putem Beograd-Niš. Masivu se, generalno, može prići regionalnim putevima Požarevac – Petrovac – Krepoljin – Žagubica – Bor, Čuprija – Sisevac, Paraćin – Boljevac – Zlot – Bor. Takođe, po samom masivu nalaze se manji asfaltni putevi koji povezuju lokalna sela, dok su planinski delovi terena povezani

zemljanim ili makadamskim putevima, što olakšava pristup ponorskim zonama koje se nalaze uglavnom na udaljenim delovima terena u hipsometrijskim višim zonama istraživanja.

Za potrebe definisanja granica Kučajsko-beljaničkog masiva izvršena je prostorna analiza po različitim parametrima, a koji su usaglašavanjem kroz iterativni postupak dali konture kasnije usvojene za granice Kučajsko-beljaničkog masiva. Podloge koje su korišćene za definisanje granice masiva su: topografske podloge, DEM šire zone istraživanog terena, hidrografske podloge i delineacija slivnih površina, kao i geološke i hidrogeološke podloge. Svaka od ovih podloga je dala jedan ili više parametara. U prvom koraku granica je definisana na osnovu topografije terena i osnovnih morfoloških karakteristika masiva. Nakon toga je izvedena analiza korišćenjem 3D modela terena, odnosno digitalnog elevacionog modela terena sa analizom hidrografske mreže (slivova i podslivova). Treći korak je ujedno bio i najvažniji, budući da je za analizu imao geološke i hidrogeološke karakteristike terena. Kroz prostorne podatke o kontaktima, npr. crvenih permskih peščara ili neogenih naslaga, sa krečnjacima, te njihovo uslovljavanje pojave karstnih vrela i izvora sa korišćenjem prethodno definisanih morfoloških i topografskih karakteristika, omogućeno je finalno definisanje granica ovog masiva. Generalni prikaz koraka u okonturivanju Kučajsko-beljaničkog masiva je dat na slici 4.3.



Slika 4.3. Prikaz glavnih podloga (koraka) u okonturivanju granica Kučajsko-beljaničkog masiva. 1 – topografska podloga, 2 – DEM terena i hidrografska mreža, 3 – geološke i hidrogeološke karakteristike terena, 4 – završni prikaz okonturene granice Kučajsko-beljaničkog masiva

4.2. Klimatske karakteristike

Na istražnom prostoru zastupljena je umereno-kontinentalna klima, gde se u višim, planinskim predelima javlja prelaz prema planinskoj klimi (preko 800 m n.m.). Odlika ovog klimata su duge i hladne zime, sa velikim količinama snega, dok su leta relativno topla.

Elementi klimatskih karakteristika istražnog područja su prikazani u cilju sagledavanja uticaja na opšti vodni bilans i hidrogeološke karakteristike oblasti. U ovom poglavlju korišćeni su podaci Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije, srednje mesečnih i godišnjih vrednosti temperature, padavina, vlažnosti vazduha i visine snežnog pokrivača na KS Crni Vrh i KS Žagubica za period 1961-2012. godina.

Takođe, u ovom poglavlju su prikazani i podaci dnevnih vrednosti temperature, padavina, vlažnosti vazduha i visine snežnog pokrivača na KS Crni Vrh i KS Čuprija za period 2014-2015 godina, odnosno za period terenskih istraživanja za potrebe izrade disertacije, a u cilju bolje interpretacije rezultata izotopskih, hidrohemijskih i kvantitativnih karakteristika voda Kučajsko-beljaničkog masiva. Za analizu dnevnih vrednosti navedenih parametara korišćeni su podaci preuzeti sa websajta „OGIMET“ – profesionalne informacije o meteorološkim uslovima u svetu. U okviru poglavlja su obrađeni i prikazani podaci sa novopostavljene stanice za digitalno praćenje padavina i temperature na vrelu Belosavac (294 m n.m.) kod Žagubice, a čiji podaci su korišćeni za korelaciju između padavina merenih u Čupriji (123 m n.m.) i na Crnom Vrh (1027 m n.m.)

Temperatura vazduha

Temperatura vazduha predstavlja važan klimatski element koji se menja u vremenu i prostoru, a ima uticaj na isparavanje, rečni oticaj, topljenje snega. Na istražnom prostoru temperatura je važna sa aspekta procene temperaturnih režima vladanja u momentu infiltracije površinskih voda u podzemlje, na osnovu čega se može izvršiti procena perioda prihranjivanja podzemnih voda. Takođe, visina temperature direktno je

proporcionalna veličini stepena isparavanja, a što može imati uticaj na smanjenje proticaja površinskih tokova koji poniru u podzemlje i utiču na hidrološki ciklus.

Vrednosti srednje mesečnih i godišnjih temperatura vazduha za period 1997-2012. godine na KS Crni Vrh (°C) prikazane su u tabeli 1. Prosečne srednje godišnje temperature vazduha za KS Crni Vrh kreću se od 5.8 do 8.1°C, a višegodišnji prosek (1997-2012. godina) iznosi 7.1°C. Za posmatrani period 1997-2012. godina, najhladniji je mesec januar ($T_{sr} = -3.3^{\circ}\text{C}$), dok je najtopliji mesec avgust, sa srednjom temperaturom $T_{sr} = 17.6^{\circ}\text{C}$. Zaključak je da su temperaturni minimumi tokom zimskih meseci, decembar-februar, kada su mesečni proseki ispod 0°C , a maksimumi tokom jula i avgusta.

Tabela 1. Prikaz srednje mesečnih i godišnjih temperatura vazduha za KS Crni Vrh (°C) period 1997-2012. godine (RHMZ Srbije)

God.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	T_{sr}
1997	-2.6	-0.8	-0.1	1	12.2	15.3	15.1	14.8	10.4	4.7	1.6	-1.7	5.8
1998	-0.1	1.3	-1.4	7.9	10.5	16	17.1	17.4	10.6	8.3	-1.5	-5.2	6.7
1999	-1	-3.5	2.2	7.4	11.2	15.1	16.8	17.6	14.1	7.3	0.6	-0.5	7.3
2000	-6.6	-1.4	1.4	9.3	13.4	16.4	18	20	11.7	7.8	6.3	1.7	8.2
2001	-2.1	-1	5.2	5.7	11.9	12.9	17.2	18.6	11.5	10.3	0.3	-6.8	7
2002	-3.4	3.1	3.8	5.3	13	16	17.9	15.4	11.7	7.7	4.4	-4.8	7.5
2003	-4.1	-8.2	0.3	4.5	15.2	18.1	16.9	20.5	11.4	5.2	4	-1.7	6.8
2004	-5.8	-2.4	1	7	9.5	14.2	16.9	16.6	11.9	9.7	2	-1.1	6.6
2005	-3.1	-5.8	-0.9	6	11.5	13.7	16.8	15.2	12.8	6.7	1.3	-2.1	6
2006	-6.5	-3.5	0.5	7	11.6	14.4	18	15.8	12.5	9.5	3.5	0.8	7
2007	2	0.1	2.7	8.6	12.7	17.3	20.6	18.4	10.8	6.6	-0.3	-2.9	8.1
2008	-3	-0.4	2.8	7.7	12.3	16	16.6	18.1	10.9	8.9	2.4	-2.3	7.5
2009	-3.6	-3.9	0.4	8	12.9	14.9	17.7	17.5	14	6.9	5.6	-1.2	7.4
2010	-5.9	-3.1	0.5	6.5	11.4	15.1	17.1	18	12	3.7	7	-2.6	6.6
2011	-2.4	-4.6	1	6.3	11	14.9	17.1	17.8	16.6	6	0.6	0.1	7.0
2012	-4.6	-9.3	3.2	8.3	11.4	17.9	20.8	20.2	15.7	9.7	4.2	-3.5	7.8
T_{sr}	-3.3	-2.7	1.4	6.7	12.0	15.5	17.5	17.6	12.4	7.4	2.6	-2.1	7.1
σ	2.4	3.3	1.8	2.0	1.3	1.4	1.4	1.7	1.8	1.9	2.5	2.2	0.7
C_v	-0.7	-1.2	1.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.9	-1.1	0.1
T_{max}	2.0	3.1	5.2	9.3	15.2	18.1	20.8	20.5	16.6	10.3	7.0	1.7	8.2
T_{min}	-6.6	-9.3	-1.4	1.0	9.5	12.9	15.1	14.8	10.4	3.7	-1.5	-6.8	5.8

T_{sr} – srednja mesečne i godišnje temperature vazduha, σ – standardna varijacija temperature, C_v – koeficijent varijacije temperature, T_{max} – maksimalne temperature vazduha, T_{min} – minimalne temperature vazduha

Dnevne vrednosti temperature vazduha značajne su sa aspekta utvrđivanja temperaturnih režima vazduha koji su vladali u periodu infiltracije vode u podzemlje, odnosno radi definisanja nadmorske visine na kojoj se izvršila infiltracija voda. S tim u vezi, u tabelama 2 i 3, prikazane su srednje dnevne temperature vazduha za KS Crni Vrh, a u tabelama, 5 i 6 za KS Ćuprija za 2014. i 2015. godinu. Podaci su preuzeti sa internet stranice www.ogimet.com.

Tabela 2. Srednje dnevne vrednosti temperature vazduha ($^{\circ}\text{C}$) za 2014. godinu po mesecima za KS Crni Vrh (preuzeto sa: Ogimet.com)

Srednje dnevne vrednosti temperature vazduha ($^{\circ}\text{C}$) za 2014. godinu po mesecima za KS Crni Vrh												
Dan	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	0	-18.7	-1.4	9.7	8.6	5.8	14.1	15.5	15.2	13.5	1.6	-5.1
2	-3.7	-15.7	-2.5	8.6	8.3	6.7	11.9	14.8	14.9	13.1	2.2	-7.2
3	-2	-11.1	-0.8	6.1	9.6	8.4	15.8	19	15.6	10.1	2.5	-6.1
4	5.1	-8.8	-0.6	4.3	9.2	10.1	12.9	20	14.1	6.7	0.6	-3.7
5	5.2	-9.6	-1.4	11.8	4.7	13.3	14.1	19.4	13.2	6.2	3.9	-3.2
6	3	-9.1	-0.2	6.2	3.3	14.2	16	19	11.7	6.2	7.1	-3.1
7	5.9	-3.1	1.1	0.7	5.9	15.6	18.5	14.9	11.1	5.7	8.9	-2.4
8	8.2	2.7	1.2	6.4	8.5	17.4	20.2	16.3	13.9	7.3	11.3	-1.6
9	6.9	5.5	2	10.7	8.6	19.3	18.9	16.5	15.3	7.9	9.9	-1.1
10	5.1	4.4	1.7	5.5	11	20	17.8	17.8	15.6	9	7.4	-1.8
11	4.6	2.9	-2.6	2.3	12.2	20.4	16.7	19.7	16.9	10.4	9.7	-2.8
12	4.2	3	0.6	1.7	15.1	20	11.8	22.2	15.7	11	7.4	-1.8
13	2.1	4.7	3.2	3.8	7.4	19.2	13	23.6	14.1	13.4	2.3	-1.6
14	3.8	0.7	5.2	5.9	8.7	17.1	16.8	23	14.2	15	4.6	2.6
15	-2.1	2.7	6.2	8.4	6.9	11.9	16.2	21.7	13.1	16.2	4.9	5.4
16	-0.2	1.9	8.2	1.2	3.2	11.1	16.3	14.8	11.9	16.9	1.3	5.7
17	1.5	10.7	3.3	-0.7	4.5	10.9	15.5	14.1	9.7	13.3	0.1	4.3
18	4.8	11.1	8.2	3	7.2	12.1	15.9	11.6	9	13.5	1.7	4
19	7.7	6.9	10.3	5.4	8.6	12.4	16	14.3	11.2	8.3	2.7	1
20	4.5	8.4	7.8	4.1	12.5	10.8	17.5	17.1	12.4	9.6	3	3.8
21	2.6	8.7	5	5.6	13.5	12.2	19.6	17.8	14.2	13.4	1.7	3.9
22	0	2.4	9	8.9	15.5	9.9	21.3	17.9	14.4	14.3	0	-0.8
23	0.2	1.4	10.6	11.2	15.1	14.1	16.3	16.6	11.7	6.2	-0.8	1.1
24	1.7	1.3	11.5	12	15.3	19.1	15	16.3	5.1	0.3	-1.2	5.9
25	-5.1	-2.3	7.2	9.9	14.8	17.6	15.7	13.9	7.2	1.4	-1.9	8.8
26	-9.7	-3.4	1	6.8	15.4	16.3	17.5	12.7	8.9	-2.2	-4.3	2.3
27	-11.8	-1.1	4.4	6.6	15.5	12	19	16.4	6.7	-3	-5.6	-2.6
28	-8.5	3.7	4.1	7.5	15.3	12.9	17.6	17.7	7.1	-2.8	-6.8	-7.8
29	-11.3		4.3	7.2	13.4	15	14.6	10.3	8.7	-2.6	-1.8	-8.5
30	-10.9		6.7	8.5	11.7	16.4	16.4	13.8	11.8	-1.6	-1.1	-10.3
31	-12.8		7.1		9		17.3	15		1.7		-12.8

Tabela 3. Srednje dnevne vrednosti temperature vazduha (°C) za 2015. godinu po mesecima za KS Crni Vrh (preuzeto sa: Ogimet.com)

Srednje dnevne vrednosti temperature vazduha (°C) za 2015. godinu po mesecima za KS Crni Vrh												
Dan	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1		0.5	3.2	5.3	7.7	16.4	13.7	14.1	23.4	5.3	1.7	0.3
2	-14	-1.6	3.1	0.9	11.5	16.3	15	15.4	23.5	7.6	-0.6	4
3	-7.4	-2.1	4.7	1.3	9.5	17	17.2	17.9	23.6	8.3	7.6	1.3
4	-2.8	-3.3	-0.2	-3.1	12	18.5	17.8	19	22.7	10.8	11.5	3.6
5	-2.5	-2.6	1.1	0.9	15.3	18.4	18.5	20.9	23.2	14.7	11.7	3
6	-6.6	-0.6	-2.6	0.2	17.8	16.7	19.8	23.1	21.9	13.2	9.8	2.3
7	-8.9	-4.5	-3.3	-1.3	19.7	15.9	21.4	22.8	12.2	10.1	6.8	6.1
8	-12.5	-5.6	-4.6	-0.7	13.2	16.3	23.8	22.7	9.5	10.4	4.8	2.7
9	-6.5	-6.7	-4.2	-0.4	13.3	15.6	23.9	21	8.7	2.3	7.6	1.5
10	-0.5	-8.8	-3	2.8	13.3	17.9	15.5	19.9	11.2	5.6	10.5	-1.7
11	3.7	-7.3	-2.4	7.4	11.7	15.9	12.5	21.6	10	5.5	9.8	-2.2
12	4.8	-6.7	-1.3	12	7.9	18.2	14.9	23.7	9.5	5.1	10.4	-2.2
13	-3.6	-6.1	-1.8	11.6	12.1	19.9	18.2	24.2	11.5	3.3	10.1	-1.3
14	2.7	-2.2	-2.5	11.3	15.3	20.7	19	23	12	3.4	10.2	4.9
15	7.2	-2.1	-0.6	6.5	15.6	21.5	15.7	22.5	13.9	3.1	7.1	1.3
16	-0.6	-3.3	0.4	8.5	13.1	19.8	18.4	21.9	14.9	5	6.7	-0.4
17	1	-5.8	0.4	14.9	13.7	14.5	21	22.2	15.7	5.5	7.4	-2.1
18	3.7	-10.2	0.4	14	13.4	13.1	23.4	16	19.7	7.6	11.2	-3.2
19	5	-9.1	-0.2	5.4	15.6	9.8	24.6	16.1	23.2	9.4	11	-0.7
20	4.1	-5.3	-3.5	1.6	17.2	13	24.2	16.6	21.3	8.9	12.6	1.6
21	3.8	-0.8	-2.1	3.5	15.7	10	24.1	11.4	15.3	4.6	10.8	4.5
22	2.2	-0.6	3.5	4.8	16	9.2	23	10.1	10.5	1.9	9.8	6.9
23	0	-0.5	6.5	7.5	14.4	12.4	23.9	9.8	11.9	2.1	2.7	4.6
24	-1	0.5	0.5	8.4	13.4	15.5	23	11.5	13.8	3.1	-0.6	10.1
25	-0.7	2	-0.5	12.2	12.5	10.9	21.9	14.7	15.2	2.9	-0.9	4.2
26	-3.5	2.3	3.6	11.6	9.6	7.9	22.5	16.9	13.5	7	-2.1	3
27	-4.5	0	7.2	14.8	9.9	9.1	18.9	19.4	10.1	6.9	-2.3	5.2
28	-3.4	1	5.5	15.7	7.2	13.4	20.2	19.6	9.1	4.6	-2.6	11
29	-4.4		1.7	9.9	4.6	12.7	18.8	20.9	6.2	2.6	-3.5	6.1
30	-3.8		0.8	3.3	7.7	14.5	23.2	23.5	6	2.4	-2.9	-0.1
31	-1.8		4.5		13.1		20.9	22.9		2.7		-9.3

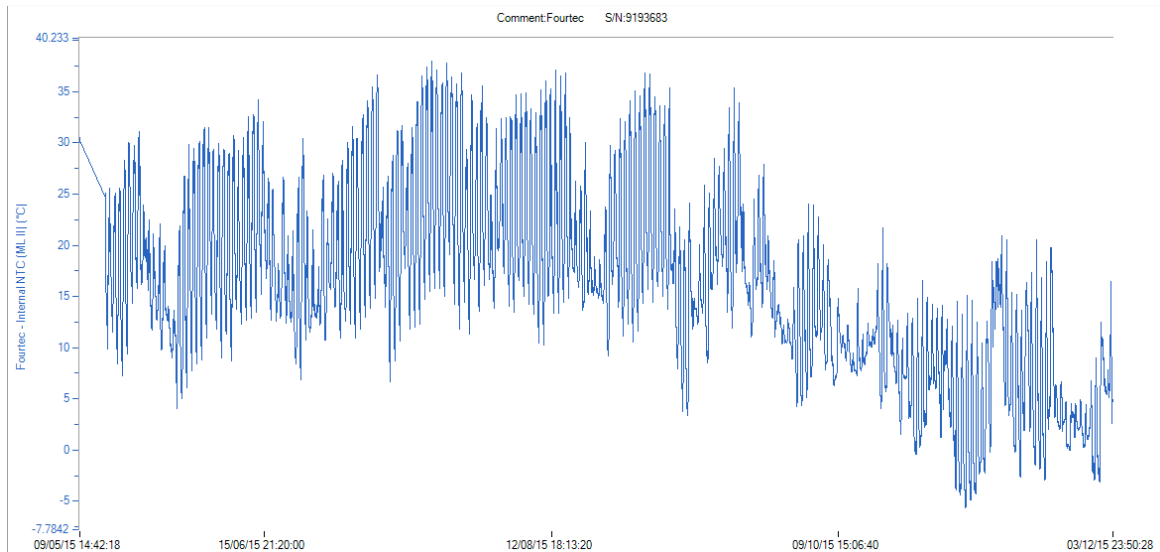
Pregled statističkih parametara srednje mesečnih i godišnjih vrednosti temperatura vazduha za KS Žagubica za period 1997-2012. godine, prikazan je u tabeli 4.

Tabela 4. Prikaz srednje mesečnih i godišnjih temperatura vazduha za KS Žagubica (°C) period 1997-2012. godine (RHMZ Srbije)

god.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	T _{sr}
2000	-4.2	1	4.5	11.6	15.8	18.1	20.4	19.4	13.5	10.1	6.8	0.7	9.5
2001	0.3	3.1	8.7	9.9	16	17.2		21.4	14.8	12.8	3.2	-4.4	9.5
2002	-2.1	4.8	7.6	9.2		20.1	21.5	19.4	14.3	9.8	6.9	-1.8	9.5
2003	-1.2	-5.8	3.3	8.1		20.5	19.6	22.5	14.6	8.3	6.3		9.5
2004	-2.4	0.3	5.7	12.8	14.5	19.6	20.9	19.4	14.1	12.8	6.1	1.9	9.5
2005		-2.1	3.6	10.3	15.5	17.2	20.1	18.7	16			1.4	9.4
2006	-2.8	-0.2	4.5	11.6	15.4	18.6	21.5	19.4	16.4	12.3	5.6	1.3	9.3
2007	3.7	4	7.4	11.5	17.1	20.8	23.2	21.8	14.3	9.9	3.6	-0.3	9.2
2008	-0.1	2.4	6.9	11.4	16.5	20.4	21.3	22.2	14.4	11.9	6.5	2.5	9.0
2009	-0.9	0.6	5.5	13.1	16.9	19.7	21.2	21.1	17	10.9	6.8	2.1	8.7
2010	-1.1	1.2	5.6	11.4	15.9	19.9	21.8	21.8	15.6	8.3	10.3	-0.7	8.4
2011	-0.8	-1.6	4.9	11.5	15.4	19.7	21.4	21.5	18.8	9.2	2.3	2.1	8.1
2012	-0.4	-4.6	6.5	12.8	15.8	21.9	24.3	21.5	18.9	11.8	7.6	-1	7.7
T_{sr}	-1.0	0.2	5.7	11.2	15.9	19.5	21.4	20.8	15.6	10.7	6.0	0.3	9.0
σ	1.9	3.1	1.6	1.5	0.7	1.4	1.3	1.3	1.8	1.6	2.2	2.0	0.6
Cv	-1.9	13.2	0.3	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	6.4	0.1
T_{max}	3.7	4.8	8.7	13.1	17.1	21.9	24.3	22.5	18.9	12.8	10.3	2.5	9.5
T_{min}	-4.2	-5.8	3.3	8.1	14.5	17.2	19.6	18.7	13.5	8.3	2.3	-4.4	7.7

Može se zaključiti da je prosečna srednje godišnje temperature vazduha za KS Žagubica za period 1997-2012. godina, od 7.7 do 9.5°C, dok višegodišnji prosek iznosi 9.0°C. Za posmatrani period 1997-2012. godina, najhladniji je mesec januar sa srednjom temperaturom -1.0°C, dok je najtopliji mesec u proseku jul sa srednjom temperaturom 21.4 °C.

Takođe, prilikom analize temperature vazduha, korišćeni su i podaci sa meteorološke stanice Belosavac oformljene u maju 2015 god. gde se mere temperature na satnom nivou, a čiji su podaci bili posebno značajni u fazi analiziranja podataka radioaktivnih izotopa uzetih u septembru 2015 god. Na slici 4.4. je prikazan grafik oscilacije satnih temperatura merenih na vrelu Belosavac u periodu maj – decembar 2015 godine. Kako srednje dnevne vrednosti temperature vazduha na KS Žagubica nisu bile dostupne za duži vremenski period, dalje su u tekstu analizirane srednje dnevne vrednosti temperature vazduha na KS Ćuprija (tabele 5 i 6), koja se nalazi na nižoj nadmorskoj visini, kao i KS Žagubica, a takođe pripadaju istražnom prostoru.



Slika 4.4. Prikaz oscilacije temperatura na satnom nivou za period maj – decembar 2015 god.

Tabela 5. Srednje dnevne vrednosti temperature vazduha ($^{\circ}\text{C}$) za 2014. godinu po mesecima za KS Čuprija (preuzeto sa: Ogimet.com)

Srednje dnevne vrednosti temperature vazduha ($^{\circ}\text{C}$) za 2014. godinu po mesecima za KS Čuprija (preuzeto sa: Ogimet.com)												
Dan	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1		-8.4	7	11.2	14.1	12.3	20.7	19.7	21.3	13.9	8.4	3.1
2	3.5	-5.8	5.8	11.3	13.9	14.1	18.8	20.4	21.4	14	7.7	1.7
3	4.2	-2.2	5.6	12.2	14.4	14.7	20.2	22.4	20.4	14.5	6.4	1.4
4	4.7	0.1	7.8	13.9	15.8	15.7	18.1	23.7	20	14.9	8.1	4.3
5	4.8	-0.9	7.6	16.5	10.3	16.4	18.9	22.4	19.7	14.2	10.4	4
6	7.4	-0.1	6	15.6	10.5	17.6	22	22.6	18.9	13.9	11.6	4.8
7	8.7	2	7.2	9.2	12.5	19.3	24	20.7	17.7	12.3	14.3	3.8
8	6.5	4.2	8.9	10.9	16.4	21.2	24.7	21.9	19.5	13.8	15.8	4.6
9	4.7	8.8	9	12.5	15	21.8	25.4	22.4	18.6	14.4	15.3	4.4
10	3	10.6	6.3	8.9	14.7	22.4	24.2	22.6	18.8	15.7	12.7	4.4
11	7.1	9.4	4.7	8.4	15.7	23.4	22.2	23.2	20.1	16.2	11.4	2.1
12	4.2	13.7	5.2	6.7	19.8	24.3	17.8	24.4	22	16.9	10.4	3.5
13	2.4	12.9	5.9	9	12.7	22.5	19.7	25.2	22	16.6	10.4	2.8
14	1.2	5.6	5.7	10.4	13.7	22.1	20.8	26.7	20.5	17.3	11.2	2.6
15	4	6.4	6.4	11.7	12	17.6	21.2	25.8	18.3	18.4	10.5	2
16	7.1	5.5	10	8.2	8.6	17.1	18.6	20	16.6	18.3	9	3.2
17	4.4	9.6	11	5.7	11.6	17.1	18.5	19.6	16.7	16.3	8	8.1
18	6.8	12.7	13.9	6.9	12.8	18.9	20.8	18	16.5	18.2	9.3	8.8
19	9.4	6	10.5	9.9	14	17.6	21.3	17.8	17	14.4	9.7	6.3
20	9.7	13	8.7	11.4	15.9	17.7	22.4	20.6	18.9	12.9	10.2	5.4
21	10.8	10	7.6	13.5	16.8	17.3	23.6	21.8	19	13	8.2	3.4

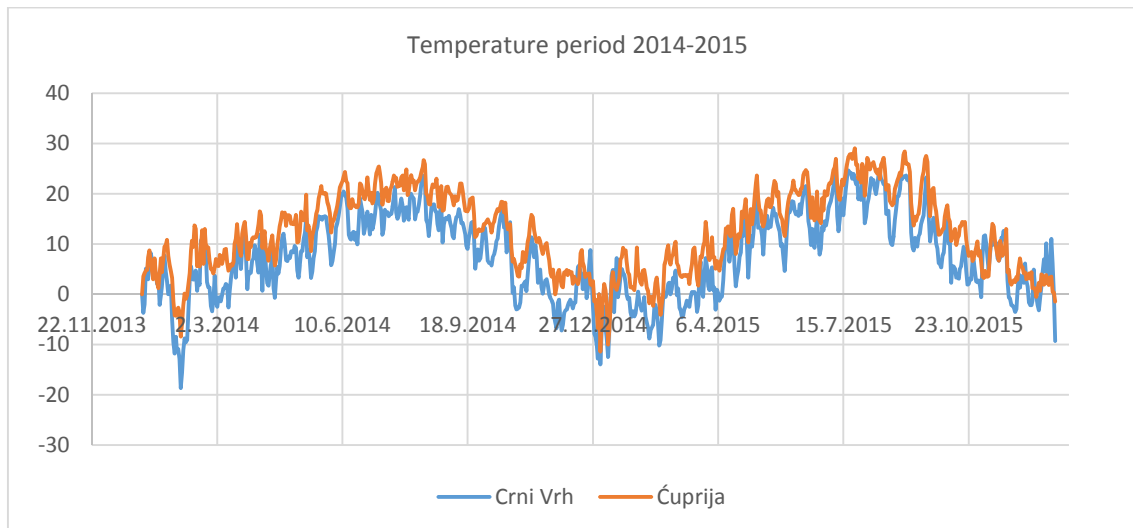
22	7.6	9.2	12.1	14.7	19.1	17.3	23.3	21.3	19.2	13.9	6.8	3.9
23	5.9	9.3	13.5	16.3	20.2	18.1	23.1	21.6	16.1	9.2	4.3	3.8
24	4.6	6.6	14.4	15.4	21.5	22	21.4	23	11.4	6.5	3.5	4.1
25	3.2	5.1	11.5	16.2	20.1	21.7	21.7	20.4	11.7	7	4.9	2
26	-1.4	4.9	7	13.6	20	20.4	21.6	17.4	12.6	5.9	2.7	1.8
27	-4.2	4.1	7	15.7	20.2	19.1	23.2	20.2	12.9	5	0	2.6
28	-4.3	5.3	10.2	15.7	20	18.9	23.6	21.5	12.6	3.7	1.4	-1.4
29	-3.1		9.4	15.5	18.3	20.3	20.7	16.6	12.6	3.5	4.2	-1.1
30	-2.7		11	14	17.5	23.2	23.3	16.8	12.7	5.9	4.8	-3.8
31	-3.6		11.3		16.1		24.8	19.6		5.2		-6.8

Tabela 6. Srednje dnevne vrednosti temperature vazduha ($^{\circ}\text{C}$) za 2015. godinu po mesecima za KS Čuprija (preuzeto sa: Ogimet.com)

Srednje dnevne vrednosti temperature vazduha ($^{\circ}\text{C}$) za 2015. godinu za KS Čuprija												
Dan	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1		4.6	7.9	11.3	12.9	18.4	19.6	19.6	27.7	12.3	8.6	2.9
2	-11.4	3.6	9.5	7.4	16.9	19.6	19.7	22.4	28.4	12.9	6.3	5.4
3	-5.6	2.4	10.4	7.4	13.9	20.1	21.6	27.1	26	13.1	3.5	7.1
4	-0.7	1.9	6.3	5.1	16	20.9	22.1	26.2	26	15.4	3.2	5.5
5	2	4.6	5.7	6.6	19.4	22.6	22.1	24.8	25.8	16.8	4.6	5.4
6	0.8	4.8	4.2	5.9	22.1	20.8	23.1	25.8	24.3	17.7	3.5	4.2
7	-1.8	3.3	3.6	4.7	23.6	20.7	24.6	25.9	18.2	15.1	3.5	4.3
8	-10	1.3	3.4	6.5	19.2	20.1	25.2	26.3	15.6	14.4	3.6	3
9	-7.2	0.6	3.8	7.5	16.8	19.7	26.9	25.3	13.7	10.6	8	3.1
10	-2.4	-1.8	3.8	8.9	16.6	19.8	21.7	24.4	15.4	11.4	11.3	4.1
11	2.3	-0.7	3.6	9.1	14.4	20.9	19.5	24	14.6	12.1	14	3.1
12	4.4	-0.5	3.8	13.1	13.5	21.2	18.8	24.8	15.6	13	13.5	4.4
13	1.9	-2.3	3.8	13	14.5	23.6	21	23	16	9.8	10.6	1.2
14	1.4	0.2	2	13.5	17.3	24.3	22.8	25.7	17.8	11	9	1.2
15	0.9	2.2	4.4	12.1	18.8	24.7	21.7	26.3	21.2	11.6	7.6	1.1
16	2	3.3	5.9	11.5	19	24.3	22.8	27.1	23.3	13.4	6.7	-0.5
17	3.1	0.9	8.9	15.8	17.4	21.5	24.4	24.9	24.4	13.6	10.6	1
18	6.9	-1.6	9.3	17	17.3	18.5	26	20.8	26.8	14.4	9.5	2.3
19	7.4	-4.1	6.4	11.7	18.2	15.2	27.3	20.8	27.5	13.9	7.6	0.7
20	9.2	-1.9	3	8	21	19.3	27.8	21.7	26.3	14.4	8.1	3.9
21	8.2	0	1.7	9.6	22.5	16.6	27.9	18.6	19.2	10.9	8.8	3.6
22	8.7	5.8	4.4	11.9	22	14.7	26.9	18.1	15.5	9.1	13	1.9
23	6.5	6.7	7.5	11.3	19.5	16.2	27.8	17.7	18.2	7.6	4.4	2.5
24	4.4	8.7	7.4	12.5	20.3	20.4	29	18.1	20.8	7.9	4.8	3.8
25	3.9	9.7	9.4	16.4	16.1	15	25.8	20.9	21.1	8.4	2.5	2.2
26	1.4	7.4	10.3	15.2	15.4	14.6	25.8	21.7	17.8	6.6	1.9	1.8
27	1.3	5.9	14.4	17	14.9	14.1	23	22.6	16.5	7	2.5	3.3
28	1.4	7.4	12	18.9	12.7	19.1	24.3	23.3	14.1	8.2	2.8	3.5

29	0.8		7.5	14.5	11.6	16.7	22.2	24.2	11.8	9.2	2.4	0.5
30	3.6		6.8	10.3	13.1	20.5	25.9	23.6	11.9	10.5	3.4	0.3
31	9.3		7.9		16.5		25.1	25.2		7.7		-1.5

Na slici 4.5. je dat grafički prikaz oscilacija dnevnih temperatura za KS Crni Vrh i KS Čuprija za period izvođenja istraživanja.



Slika 4.5. Prikaz srednje dnevnih oscilacija temperatura za KS Crni Vrh i Čuprija

Padavine

Najbitniju ulogu u prihranjivanju i, uopšte, kod režima karstnih izdanskih voda, imaju padavine. Upravo iz tog razloga je bilo neophodno prikupiti kvalitetne podatke, kako iz prethodnih perioda, tako i za sam period istraživanja odnosno 2014. i 2015. godine. Prosečne višegodišnje sume padavina (za period 1967-2012) iznose 800 mm za kišomernu stanicu Crni Vrh (Tabela 7). Minimalne višegodišnje padavine iznose 508 mm, dok maksimalne višegodišnje padavine iznose 1096 mm. Najmanje količine padavina na godišnjem nivou javljaju se u avgustu mesecu, dok je u proseku najkišniji juni mesec.

Tabela 7. Pregled mesečnih suma i statističkih parametara serija mesečnih i godišnjih suma padavina za KS Crni Vrh period 1967 – 2012 (preuzeto RHMZ)

god.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ΣP
1967	25.6	23.7	70.6	75.3	105.5	158.5	42.4	47.4	53.8	12.8	31.7	81.5	728.8
1968	51.5	29.8	36.9	30.2	131	35.2	115	143.7	98.8	15.5	79	32.5	799.1

1969	27.3	49.6	42.7	18.4	41	378.1	106	39.5	44.1	3.4	26.2	104.8	880.8
1970	32	61.6	63.5	84	128.1	112.7	159	79.2	27.3	57.7	38.6	29.9	873.5
1971	58.8	67.9	94.8	33.7	102.7	122.5	97	21.1	129.3	18.1	24.9	25.1	795.9
1972	39.3	42.8	11.4	107.8	66.3	58.2	212	88.1	185.3	186	34.8	4.4	1036.2
1973	35.9	31.4	31.3	92	104.3	83.5	57.7	20.5	73.9	52.5	43.9	35.1	662
1974	31.1	30.1	28.9	54	207.9	149.9	102	89.5	65	143.9	85.6	108.9	1096.6
1975	23.9	14.9	48.4	61.8	137.8	156.9	92.5	111.4	35.5	125.8	81.2	17.3	907.4
1976	97.4	16.7	34.6	80.1	89.6	194.3	138	92.5	85.8	60.1	140	50.9	1079.8
1977	45.8	77.2	88.7	71.9	62.1	81.2	139	37.1	61.1	24.6	52	59.7	800.7
1978	19.9	76.1	84.7	80.2	133.6	235.1	37	30.4	132.9	15.4	19.1	60.3	924.7
1979	72.1	39.9	39	47.7	135.6	143.5	62.2	119	21.1	55.8	78.9	51.5	866.3
1980	50.1	40	48.2	53.6	193.98	114.2	73.5	29.9	45.2	98.2	67	72.6	886.48
1981	44.8	23.5	82.3	66.3	121.1	164.1	36.9	58.5	105.5	60.2	74.9	58.4	896.5
1982	25	34.3	49.9	57.5	15.8	97.4	214	131	29.1	86.4	30	65.3	835.3
1983	38.5	42.8	16	40.6	67.5	86.5	80.5	31.9	70.9	27	25.3	33	560.5
1984	53.9	70	60.4	57.1	62.6	27.5	47.8	29.6	20	21.1	44.8	26.9	521.7
1985	50.9	81.4	34.1	67.4	57.4	77.2	30.6	182.3	4.3	14.2	140.6	31.4	771.8
1986	62.1	99.8	43.6	44.4	40.8	90.2	212	24.8	8.4	34.8	8.2	29	698
1987	74.1	13.9	61.9	74.1	178.7	60.4	10.1	62.1	10.8	22.7	75.8	51.3	695.9
1988	38.1	58	98.3	57.6	55.5	76.8	6.6	45.5	73.6	41.2	58.9	32.8	642.9
1989	12.1	37.2	52.9	104.1	168.2	175.1	74.5	60	89.2	81.2	72.1	25.5	952.1
1990	12.7	68.4	28.3	68	57.5	58.1	19.8	40.4	28.7	34.9	8.2	83	508
1991	12.3	27.9	59.5	76.1	87.5	41.6	104	96.4	12.3	69.6	50.7	40	677.9
1992	14.9	45.4	12.8	79.2	39.8	129.4	38.9	0.1	48.1	108.4	61.8	64.5	643.3
1993	31.7	13.1	60.6	35.1	60.1	44.5	26.4	57.6	54.8	66.6	63.6	55.1	569.2
1994	34.9	45.3	26.5	77.5	46.4	69.1	61.8	56.5	33.2	70.8	15	49.5	586.5
1995	57.2	23.6	35.3	68.9	71.3	61.3	29.9	101.8	101.8	26	57.1	101.1	735.3
1996	45.1	58.3	89	39.4	128.4	15	14.8	31.5	174.2	20.2	100.7	76.2	792.8
1997	27	22.6	59.1	106.6	44.7	138.5	104	92.2	24.3	89.7	23.2	88.1	819.7
1998	79.2	12.5	23.8	77	92.9	79	67.3	48.5	133.1	106.5	71	26.3	817.1
1999	17.7	49.5	25.6	117.2	52	143.1	114	7.2	71.7	45.8	80.9	94.3	818.9
2000	83.7	24.9	66.1	69.3	47	35.1	52.5	18	110.2	17.9	42.5	33.5	600.7
2001	38.5	56.5	65.9	79.6	65.1	138.5	16.2	11.2	170.9	19.5	41.3	22.9	726.1
2002	20.2	5.9	23	64.6	80.4	70.4	166	141.7	91.7	104.1	43.3	80.9	892.6
2003	60.9	43.2	15.7	91.7	80.7	57.7	87.6	9.8	82.1	144.3	41.9	43.5	759.1
2004	100.3	85.4	45.2	62.7	70.8	159.4	54.5	38.3	58.8	92.4	147.2	29.8	944.8
2005	67.9	69.3	51.8	71.7	102.7	42.7	137	164.6	88.6	78.5	46.3	102.9	1024.3
2006	56	66.6	67.5	93.2	62	201.2	67.6	109.5	40	23.8	65.1	53.3	905.8
2007	69.2	55.6	45.6	18	131.4	80.6	5.2	83.9	47.8	161.4	141.4	31.8	871.9
2008	56.9	14.6	68.5	105.1	33.2	84.6	52.5	38.4	130.3	54.5	47.2	177.6	863.4
2009	60.5	59.9	99	23.1	42.8	156.9	62.8	90.4	31.5	129.5	141.6	90.3	988.3
2010	80	88.2	36.2	106.7	139.7	125.9	58.3	47.4	90.1	139.9	29.4	82.6	1024.4
2011	25.4	52.4	38.9	29.1	63.7	41.1	200	18.3	31.6	41.9	8.9	38.9	590.2
2012	86.1	65.4	15.4	116.1	173.4	33.4	56.5	13.9	11.7	67.8	50.1	69.3	759.1
P_{sr}	46.7	46.0	49.6	68.1	90.8	106.2	81.3	62.8	68.2	64.6	58.9	57.0	800.7
σ	23.4	23.4	24.0	26.0	46.6	66.6	56.6	44.7	46.2	45.8	36.8	32.3	150.5
C_v	0.50	0.51	0.48	0.38	0.51	0.63	0.70	0.71	0.68	0.71	0.63	0.57	0.19
P_{max}	100.3	99.8	99.0	117.2	207.9	378.1	214.0	182.3	185.3	186.0	147.2	177.6	1096.6

P_{min}	12.10	5.90	11.40	18.00	15.80	15.00	5.20	0.10	4.30	3.40	8.20	4.40	508.00
------------------------	--------------	-------------	--------------	--------------	--------------	--------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	---------------

P_{sr} – srednje vrednosti padavina, **σ** – standardna varijacija, **C_v** – koeficijent varijacije, **P_{max}** – maksimalne sume padavina, **P_{min}** – minimalne sume padavina

Za utvrđivanje bilansa podzemnih voda Kučajsko-beljaničkog masiva, kao i za definisanje sadržaja stabilnih izotopa u padavinama, neophodno je pratiti periode izlučivanja padavina na dnevnom nivou, te su u tu svrhu razmatrani podaci dnevnih padavina na KS Crni Vrh i Čuprija za 2014. i 2015. godinu, čiji su podaci prikazani u tabelama 8-11.

Tabela 8. Dnevne padavine (mm) za 2014. godinu za KS Crni Vrh (preuzeto sa: Ogimet.com)

Dnevne padavine (mm) za 2014. godinu za KŠ Crni Vrh												
Dan	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	0	0.1	0.4	0	6	3.3	10.5	44	0	0	0	6.6
2	0	0.4	0.8	0	2	8.1	0.2	21	0.1	0	0	3
3	0	1.2	10.5	0	1	21	0	0.3	0	0.6	0	4.5
4	0	0.6	2	0	10	0.9	3	0	19	1.8	0	3.9
5	0	0.9	3	0	14	0.6	0	0	21.9	0	0	0.6
6	1.1	0.9	5.6	2	1	0	0	13	14.6	0	0	0.1
7	0	0.2	6.5	1.9	0	0	0	28	2.5	11	0	5.7
8	0	0	2	0	0	0	0	0	0	6.4	0	2.2
9	0	0	6.3	0.2	0	0	0	0.2	0.6	1.4	0	6.7
10	0	5	5	0.7	0.1	0	0	0.2	0.2	1.9	0.2	21
11	0	1	4	0	0	0	2	0	0	0.3	0.1	11.1
12	0	0	0	0.8	0	0	2.1	0	3	0.2	0.1	0.1
13	0.3	0.4	0	0	2	0	2.4	0	0	0.2	0.9	0
14	0	0.2	0	0	15	0	0	0	11.5	0	4.2	0
15	0.1	0.4	0	0	48	0.7	0	0	15.3	0	2.1	0
16	1.5	0	1	1.6	26	3.6	0.2	0.1	21	0	1.6	0
17	0.1	0	1.2	21.5	1.3	6.8	3	0.3	22	11	5.2	0.5
18	0	0	0	22	1.4	5.2	0	0.6	1.8	12.2	7.3	0
19	0	0	0	14	2	13.5	0	0	0	0	7.7	0.4
20	5.8	0.2	0.8	15	0	10.3	0.1	0	0	0	2.4	0
21	1.4	0	0.1	0.5	0	2.1	0	0	4.1	0	3	0
22	1.6	0.3	0	12.1	0	0	0.6	0	2	0	0.9	0.5
23	0.9	3.4	0	4	0	0	15.8	0.8	7.2	10	0.4	0
24	0	1.3	0	22.8	0	0	29	0	4	9	0	0
25	3	0.4	5.1	10	0	8	2	0.2	0	2.4	0.1	0
26	4.8	0.1	0.1	4.3	0.7	30	0.1	0	0	2.6	0.1	0
27	2.7	0.1	3	3	10	1.1	0	0	0.4	0.4	0.3	9

28	0	0	4.1	0	2	0	6.2	2.3	0.1	0.1	1.1	1.5
29	0.8		5.1	0	2	0	0.6	0	0	0.4	1	8
30	1.3		0.2	6	12	0	0	0	0	0.1	3	1.6
31	0.5		0		0.9		5.5	0		0.6		0.5

Tabela 9. Dnevne padavine (mm) za 2015. godinu za KŠ Crni Vrh (preuzeto sa: Ogimet.com)

Dnevne padavine (mm) za 2015. godinu za KS Crni Vrh												
Dan	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	---	1	0	2	0	0	0	5.6	0	1.1	0	0
2	0	7	0.5	6.5	1	0	2	0	0	0.1	0	0.3
3	0.1	2	5	2.1	8.1	0	0	1	0	0	0	2.1
4	0.3	1	2	5	0	0.5	0	0	0.1	0	0	0
5	1.2	0.8	0	0	0	0	0.1	0	0	0.3	0	0
6	1.1	1.1	16	6	0	0	0	0	0.8	3.3	0	0
7	0.5	10	7	14	0	0	0	5	5.6	0	0	0
8	0.2	2.4	6.4	4	0.2	0	0	0	0	10	0	0
9	0.4	2.4	0.7	0	0.2	0	0	0	0	23	0.2	0
10	0	2.8	1	0	0	8	0	0	0.1	3.6	0.3	0.3
11	21	0	3.2	0	0.4	3	0.6	0	82.9	33.4	0	0.2
12	1.2	0	0.7	0	4.1	0	0	0	0.2	22	0	0
13	1.2	0	0.1	0	0	0	0	0	0.1	2.8	0.4	0
14	0	0	0.4	0	0	1	0	4.1	0.1	0.2	0.2	0
15	0	0	0	0.5	0	1.1	0.1	0	0.1	2.8	0	0
16	0	0	0.2	0	0.4	3	0	0	0	3.3	0	0
17	0	0.2	0.2	0	0	15	0	6	0	11	0.5	0
18	0	0.4	0	0	0	0.2	0	14	0	7.4	0.1	0
19	0.1	0	0	3.7	0	11.9	0	0	0	0.3	0	0
20	0.4	0	9.2	0.3	0	0.1	0	14	0	3.3	0	0
21	0.2	0	0	0	0	3.3	0	10	1	3	0	0
22	0	0	0	0	0	0.1	0	2.4	0.6	0	0.1	0
23	1	5.5	0	0	0.5	0.1	0	7	0	11.1	4	0
24	10.1	3.2	0	0	6.9	0	0	1	0.1	1	7.1	0
25	7.3	0.8	0.1	0	19.2	3.5	0	0.2	0	0	13.9	0
26	2	6.6	1.1	0	25	2.5	0	0.2	3.9	0	7.9	0
27	0.3	8	0	0	0.5	7.6	0	0.3	0.3	0	2.7	0
28	4.8	0.2	13	0	6.7	0.1	1	0	12.6	0	13.3	0
29	0.1		4.2	10	0	0	1	0	2.1	0	0.5	0
30	0.3		0	1.5	0	0.1	0	0	6.1	0	0.2	0
31	2.2		3.1		0		0.1	0		0		0

Tabela 10. Dnevne padavine (mm) za 2014. godinu za KS Čuprija (preuzeto sa: Ogimet.com)

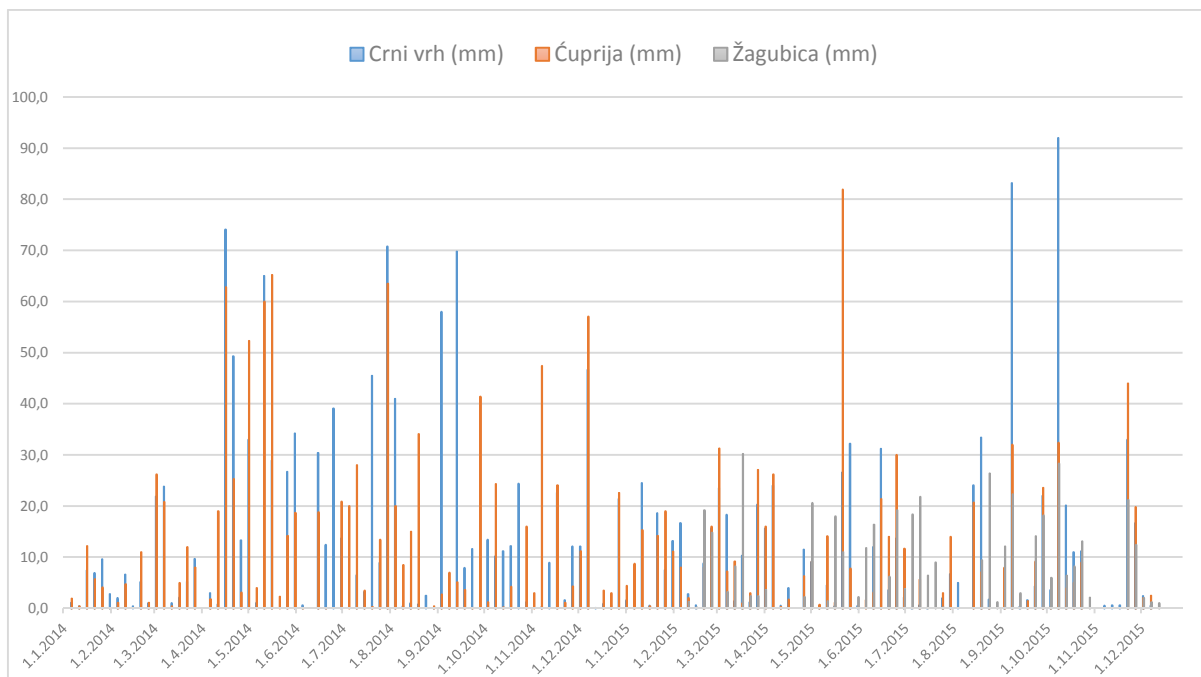
Dnevne padavine (mm) za 2014. godinu za KS Čuprija												
Dan	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	0	-8.4	0.8	0	0.2	1.6	2.2	10.5	0.5	0	0	5
2	0	-5.8	0	0	12	6.1	1	1.5	4.6	0	0	6
3	0	-2.2	10.2	0	0.1	11	0	0	0.3	0	0	0.2
4	0	0.1	0	0	11	0	0.3	5.1	1	0.2	0	0
5	0	-0.9	0	0	29	0	0	1	1.1	0	0	0
6	1.8	-0.1	16	0	4	0	0	27	0.3	0	0	0
7	0	2	2	0	0	0	0	1	0.9	4	0	23
8	0.1	4.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.8
9	0	8.8	13	0	0	0.1	0.3	0	0.1	0	0	9.3
10	0	10.6	2	1.8	0	0	0	0	0	0	0.2	18
11	0	9.4	3.8	1.6	0	0	0.8	0	0	0	0	5
12	0	13.7	0	15.4	0	0	11.6	0	0	0	0	0
13	0.4	12.9	0	2	6	0	0.6	0	0.4	0	0	0
14	0	5.6	0	0	11.5	0	0.4	0	7	0	0.2	0
15	0	6.4	0	0	42.5	2.5	3.1	0	15	0	2.3	0
16	10	5.5	0.4	3.8	56	2.4	58	0	10	0	0	0
17	0	9.6	0	19.3	2.3	2.2	2	0.4	9	16	2.2	0.3
18	0	12.7	0	26	6.6	7.8	0	0	0	1	11.1	0.4
19	0	6	0	10	0.3	6	0.4	0	0	2	2	2.8
20	2.2	13	5	3.7	0	12	0	0	0	0	7	0
21	0.6	10	0	0.2	0	6	0	0	1	0	1.8	0
22	2.6	9.2	0	4.5	0	2	1	1	0.2	0	1	3
23	2.4	9.3	0	3.5	0	0	9.5	1.7	11	20	0.1	0
24	0	6.6	0	15.1	0	0	10.5	0	9	25.2	0	0
25	0.1	5.1	12	2	2.3	4	0.5	0	0	0	0	0
26	1.7	4.9	0	2.9	0	19	0	0	0	2.2	0	0
27	1.5	4.1	2	0	5	4.3	0	0	4.3	0	0	7.4
28	0	5.3	4	0	8	0.7	7	7	0.2	0	0.3	0.7
29	0.4		2	0	1.2	0	1	0	0	0	0	10.5
30	0.5		0	0.2	0	0	0	0	0	0	4	3.8
31	0.1		0		0		3	0		0		0.2

Tabela 11. Dnevne padavine (mm) za 2015. godinu za KS Čuprija (preuzeto sa: Ogimet.com)

Dnevne padavine (mm) za 2015. godinu za KS Čuprija												
Dan	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	0	0	0	2	0.1	0	10.4	5	0	1.2	0	0
2	0.1	3.1	0.3	12	0.9	0	0.1	0	0	0	0	0
3	0	4	9	0.5	8.2	0	0	0	0	0	0	1.6

4	0.3	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	4	0.1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
6	6.5	0.2	19	5	0	0.6	0	0	2	0.4	0	0.4
7	2.2	5	3.3	19	0	0	0	0	6	0	0	0
8	0	2.3	0	2.2	0.7	0	0	0	0	2	0	0
9	0	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0.4	0	0
10	0	1.7	1.5	0	0	2	0	0	0	0.1	0	0.3
11	11	0.3	2.4	0	12.1	1.1	0.6	0	31	16.2	0	2.2
12	2.3	0	0.1	0	0	0	0	0	1	13.7	0	0
13	2	0	7.1	0	0	0	0	0	0	3	0	0
14	0	0	2	0	0	0	5	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0.3	2	0.4	0	0	0	0.5	0	0
16	0	0	0	0	1	11	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0.1	7	0	15	0	0.4	0	0
18	0.1	0	0	0	0	0	0	5.7	0	2	0	0
19	0.3	0	0	1.7	0	3	0	3.3	0	0	0	0
20	0	0	1	0	0	0	0	3	0	4	0	0
21	0.1	0	0	0	0	5	0	0.8	0.2	2.6	0	0
22	0.6	0	0	0	0.6	9	0	0	1.2	0	0	0
23	0	3	0	0	0.6	0	0	0	0	5.5	13	0
24	1.2	5	0	0	0.7	0	0	0	0	3.5	3	0
25	12.3	0	0	0	80	4.5	0	0	5	0	19	0
26	7	7	3	0	3	2.5	0	0.1	4	0	9	0
27	7.6	9	0	0	2.6	2	0	0	0.2	0	4.8	0
28	3.6	0	9	0.3	1.8	0	2	0	15.8	0	14	0
29	0.8		16	4	0.4	21	1	0	2	0	1	0
30	0		0	2	0	1.2	0	0	4.6	0	0	0
31	4		2.1		0		9	0		0		0

Pored gore navedenih podataka o padavinama, korišćeni su i podaci dnevnih padavina, za analizu režima podzemnih voda, sa kišomera postavljenog na izvoru Belosavac, a čiji su podaci prikazani na slici 4.6., zajedno sa podacima o padavinama stanica Crni Vrh i Ćuprija. Takođe, korišćen je histogram petodnevnih padavina, u svrhe jasnijeg definisanja zavisnosti izdašnosti karstnih vrela od padavina.



Slika 4.6. Histogram padavina kišomernih stanica (Crni Vrh, Čuprija i Žagubica) za period 2014 – 2015 god.

Vlažnost vazduha

Prosečne godišnje veličine vlažnosti vazduha na KS Crni Vrh kreću se od 73 do 83 %, sa maksimalnim mesečnim prosecima tokom perioda oktobar-februar, kada vlažnost retko pada ispod 80%. Minimalne vlažnosti vazduha su beležene tokom jula i avgusta kada su proračunate srednje mesečne veličine relativne vlažnosti vazduha ispod 50%. Kako vlažnost vazduha nema direktnog uticaja na utvrđivanje starosti i geneze podzemnih voda, neće posebno biti razmatrane dnevne i srednje mesečne vrednosti ovog parametra.

Visina snežnog pokrivača

Poznavanje visine snežnog pokrivača od velikog je značaja za određivanje bilansa podzemnih voda. Srednje višegodišnje visine snežnog pokrivača za period od 1961. godinu, zaključno sa 2012. godinom, je 80.28 cm (KS Crni Vrh). Za nadmorske visine preko 800 m najveća debljina snežnog pokrivača na mesečnom nivou je prisutna uglavnom u februaru i ide do 26.12 cm (KS Crni Vrh). Sneg se na prostoru Kučajsko-beljaničkog masiva zadržava i do 6 - 7 meseci godišnje.

Kako je poznavanje perioda formiranja i utvrđivanje visine snežnog pokrivača značajno sa aspekta utvrđivanja bilansa podzemnih voda, a time i geneze podzemnih voda preko definisanja sadržaja stabilnih izotopa snega, u tabelama 12-15 će biti prikazani podaci formiranja snežnog pokrivača na KS Crni Vrh i Ćuprija za 2014. i 2015. godinu.

Tabela 12. Dnevne snežne padavine (cm) za 2014. godinu za KS Crni Vrh (preuzeto sa: Ogimet.com)

Dnevne snežne padavine (cm) za 2014. godinu za KS Crni Vrh						
Dan	Januar	Februar	Mart	April	Oktobar	Decembar
1	7	37				
2	7	36				1
3	6	36	8			5
4	4	37	11			10
5	4	37	14			10
6	2	38	14			10
7	1	36	9			10
8	1	30	7			9
9	0	24	3			9
10		19	4			30
11		11	6			42
12		7	4			38
13		5	1			36
14		4				35
15		0				34
16		0	1			31
17			1	18		26
18				14		20
19						18
20						18
21						14
22						18
23						16
24					6	12
25	6				2	8
26	24				0	6
27	31				1	16
28	32				1	36
29	32					39
30	36					46
31	35					136

Tabela 13. Dnevne snežne padavine (cm) za 2015. godinu za KS Crni Vrh (preuzeto sa: Ogimet.com)

Dnevne snežne padavine (cm) za 2015. godinu za KS Crni Vrh						
Dan	Januar	Februar	Mart	April	Novembar	Decembar
1	46	11	16			26
2	44	23	12			19
3	41	27	7	2		11
4	37	28	0	8		2
5	31	28		4		
6	31	26	25	4		
7	32	37	51	18		
8	32	56	59	18		
9	31	57	58	11		
10	30	61	55	6		
11	17	58	56			
12	8	53	52			
13	9	50	49			
14	8	46	47			
15	6	43	43			
16	6	39	38			
17	5	38	35			
18	4	38	31			
19	3	37	28			
20	2	36	31			
21		35	30			
22		33	24			
23		33	20			
24		30	17			
25	7	28	16		10	
26	11	24	14		22	
27	12	24	9		22	
28	15	21			26	
29	19				32	
30	19				31	
31	16					

Na osnovu tabela može se zaključiti da se snežni pokrivač na KS Crni Vrh, odnosno u planinskim oblastima formira uglavnom u prva 4 meseca godine (januar-april), kao i u poslednjih 2-3 meseca u godini (oktobar-decembar). S tim u vezi, može se zaključiti da se prihranjivanje podzemnih voda u planinskim predelima vrši pretežno od voda nastalih otapanjem snežnog pokrivača, te je realno očekivati da će se sadržaj stabilnih izotopa

snežnog pokrivača, odraziti na sadržaj stabilnih izotopa voda koje ističu na izvorima u prvoj polovini godine.

Tabela 14. Dnevne snežne padavine (cm) za 2014. godinu za KS Čuprija (preuzeto sa: Ogimet.com)

Dnevne snežne padavine (cm) za 2014. godinu za KS Čuprija		
Dan	Januar	Decembar
26	2	0
27	3	0
28	2	0
29	1	6
30	1	15
31	0	14

Tabela 15. Dnevne snežne padavine (cm) za 2014. godinu za KS Čuprija (preuzeto sa: Ogimet.com)

Dnevne snežne padavine (cm) za 2015. godinu				
Dan	Januar	Februar	Novembar	Decembar
1	41			
2	9			18
3	9			
4	8			
5	6			
6	5			
7	11			
8	11	1		
9	10			
10	8	2		
11	6	1		
12	3			
25				1
26				2

Na nižim nadmorskim visinama formiranje snežnog pokrivača je ređe, i pretežno se vrši u januaru i decembru, pa se uticaj izotopskog sastava snežnog pokrivača na izotopski sastav podzemnih voda gotovo može zanemariti, ili se može osetiti blagi uticaj u prvom kvartalu godine.

4.3. Hidrografske i hidrološke karakteristike

Kučajsko-beljanički masiv se odlikuje gustom rečnom mrežom. U centralnim delovima masiva na vodonepropusnoj podlozi javljaju se manji rečni tokovi, koji uglavnom poniru na kontaktu sa kračnjačkom stenom, dok se po obodu masiva formiraju veći rečni tokovi isticanjem podzemnih voda preko jakih karstnih izvora. Veći deo masiva izgrađen je od vodopropusnih stena, te se konstatuje da rečna mreža na karstnim terenima gotovo izostaje, odnosno da na Beljanici ima oko 170 km² bez rečnih tokova, dok je na Kučaju površina terena koja se odlikuje odsustvom rečnih tokova oko 150 km² (Dukić, 1975, Stevanović, 1981).

Ponornice koje se formiraju na centralnom paleozojskom kompleksu nastaju primarno od padavina, kao i od manjih izvora formiranih u okviru slabe pukotinske izdani zelenih škriljaca i veoma su značajne sa aspekta prihranjivanja podzemnih voda u karstu. Količine voda ovih tokova, njihov hemijski i izotopski sastav, važni su za sagledavanje bilansa, uslova cirkulacije, kao i geneze podzemnih voda. Maksimalni proticaji ovih tokova su u prolećnom periodu, kada se pored otapanja snežnog pokrivača, javljaju i jake kiše. Period niskih voda vezan je za letnje i jesenje mesece, a naročito za mesece od septembra do novembra, kada dolazi do najvećeg opadanja nivoa podzemnih voda usled relativno slabih retencionih svojstava karbonatnih stena, i kada prihranjivanja nema, jer je ovo ujedno period sa najnižim vrednostima izlučenih atmosferskih taloga (Milanović S, 2010). Neki od ovih najznačajnijih tokova bili su i predmet istraživanja za potrebe disertacije (Busovata, Rečka, Suvodolska reka, Nekudovska reka, Velika Brezovica, Vojal, Gajine Mlake) (Slika 4.7.).

Krupajska reka. Režimska osmatranja vodostaja na vrelu Mlave otpočela su 1949. godine od strane Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije (RHMZ Srbije), međutim, u osmatranjima postoje brojni prekidi. Pored ovih, 2009. godine osmatranja većih vrela Beljaničkog masiva uspostavljena su i od strane stručnjaka Departmana za hidrogeologiju, Rudarsko-geološkog fakulteta u Beogradu. Prema do sada prikupljenim podacima srednji višegodišnjih proticaji na izvoru Mlave iznose oko $1.73 \text{ m}^3/\text{s}$, a najveći maksimum na izvoru izmeren je u maju 2014. godine i iznosio je $16.55 \text{ m}^3/\text{s}$, dok nizvodno, nakon ulivanja pritoka sa leve i desne strane, proticaj Mlave nije meren. Najizraženiji poplavni talas registrovan je u junu 1969. godine, kada je bio poplavljen veći deo naselja Žagubice (Stevanović, 1981). Dukić (1975) navodi da je “iz vrela Mlave izbijala tolika količina vode, da je ubrzo preplavila mali dvorni most i prilaz ka restoranu i levoj strani reke... Voda je poplavila i deo Žagubice do 150 m od obale Tisnice. Bliže mostu visina vode u kućama je dostizala do 1 m”.¹

Krupajska reka nastaje od Krupajskog vrela u selu Milanovac, u koju se uliva veći broj manjih potoka formirajući ovaj vodotok. Krupajska reka teče oko 7 km, kada se uliva u Mlavu, čineći jednu od njenih većih pritoka. Maksimumi na Krupajskom vrelu su takođe zabeleženi u maju 2014. godine, kada je na Krupajskom vrelu procenjen proticaj od oko $31 \text{ m}^3/\text{s}$.

Resava se formira na centralnom delu Kučajsko-beljaničkog masiva od Beljaničke i Zlotske reke, a kasnije nizvodno prima veći broj manjih planinskih tokova, do izlaska iz krečnjačkog kanjona, gde se u Resavu ulivaju vode Velikog i Malog vrela. Na profilu kod manastira Manasija, za period 1961-2000. godina, utvrđena je srednja vrednost proticaja za Resavu koja iznosi $3.69 \text{ m}^3/\text{s}$. Najveća pritoka reke Resave je Resavica, koja se u nju uliva kod Dvorišta. Resavica izvire u centralnom delu masiva na nadmorskoj visini od 1144 m. Najveća pritoka Resavice, pre ulivanja u Resavu, je Ravnorečki potok.

Reka Crnica nastaje u naselju Sisevac od istoimenog vrela koje na površinu izbija iz razbijenog izvorišta na nadmorskoj visini od 348 m. U samoj izvorišnoj zoni, reka Crnica prima veći broj manjih potoka nastalih isticanjem iz izvora (Jablanički i Jeremijski potok,

¹ D. Dukić: “Hidrografske osobine Istočne Srbije”, str. 62

Daršljivica itd). Prema podacima RHMZ-a, srednji višegodišnji proticaj Crnice iznosi 3.44 m³/s.

Reka Grza nastaje od istoimenog vrela i potoka Ivanštice, kojima se nešto nizvodnije pridružuje i Velika Čestobrodica.

Crni Timok ima veoma razgranatu rečnu mrežu, a zajedno sa Belim Timokom formira Timok. Crni Timok nastaje u selu Krivi Vir, gde od istoimenog jakog karstnog vrela otiče prema istoku, pri čemu se u njega uliva veliki broj većih i manjih pritoka sa leve i desne strane. Srednji proticaj Crnog Timoka iznosi 7.27 m³/s (Stevanović, 1981). Radovanska reka predstavlja najveću pritoku Crnog Timoka, koja izvire iz istoimenog vrela na nadmorskoj visini od 1053 m. Pored Radovanske reke, jednu od većih pritoka Crnog Timoka predstavlja i Zlotska reka, koja se formira od voda Beljevine i Lazareve reke i dugačka je svega 30 km.

Obzirom da se radi o rečnim tokovima koji uglavnom nastaju od najvećih karstnih vrela raspoređenih po obodu masiva, to maksimumi i minimumi proticaja zavise od punjenja i pražnjenja karstne izdani. Maksimumi se javljaju uglavnom u prolećnom periodu, dok su minimumi zabeleženi uglavnom u poslednjem kvartalu godine (septembar-decembar).

4.4. Geomorfološke karakteristike

Geomorfološka građa terena se odlikuje različitim tipovima morfoloških oblika i posledica je složene geološke građe istražnog terena i geomorfoloških procesa. Reljef masiva je dosta raščlanjen, veliki deo terena odlikuje se planinskim vrhovima višim od 1000 m, dok se najviši vrh sa nadmorskom visinom od 1339 m nalazi na južnom delu planine Beljanice, i izgrađen je od gornjojurskih krečnjaka.

Nekarbonatne tvorevine su zastupljene u centralnim i jugoistočnim delovima Beljaničkog masiva, dok su na Kučaju zastupljene na severozapadnom i jugoistočnom delu masiva i formirane su u okviru krisalastih škriljaca, permskih pešćara, vulkanogenog gornjokrednog kompleksa, tercijarnih sedimenata i aluvijalnih nanosa. Reljef masiva je

blago ustalasan zbog intenzivne erozije, a razvijena rečna mreža je radijalno usmerena od centralnih delova masiva ka obodu izgrađenom od karbonatnih stena.

Obzirom na strme padine vodonepropusnih kristalastih škriljaca, u ovim oblastima je izraženo površinsko oticanje, prilikom spiranja materijala dolazi do formiranja jaruga i dolina. Ovi procesi su izraženi i u formacijama crvenog permskog peščara, gde se takođe javljaju jaruge, a pored njih, usled izražene tektonike, javljaju se i strmiji planinski nagibi. Gornjokredni vulkanogeni kompleks timočkog andezitskog rova je gotovo zaravnjen, sa zastupljenim manjim kupastim uzvišenjima usled andezitskih izliva. Blago ustalasan teren prisutan je u tercijskim naslagama i aluvijalnim nanosima, sa izraženom pojavom rečnih terasa.

Karbonatne tvorevine istražnog prostora se odlikuju velikim brojem površinskih i podzemnih morfoloških oblika. Na osnovu speleoloških istraživanja, kao i rezultata bušenja, konstatovana je intenzivna i duboka karstifikacija karbonatnih tvorevina na celom području karsta Kučajsko-beljaničkog masiva.

Stevanović (2010) navodi da je proces karstifikacije duboko zahvatio karbonatni kompleks stena u okviru Kučajsko-beljaničkog masiva. Intenzitet tog procesa neravnomeran je pojedinim delovima terena, ali se može konstatovati da je u određenim zonama spušten duboko u odnosu na lokalni erozioni bazis. To se pre svega odnosi na već utvrđene pojave sifonalne cirkulacije u zonama isticanja pojedinih vrela, kao i na pojave pojedinih suvih pećinskih kanala. Takođe, Stevanović navodi da : „S obzirom na položaj najviših kota izgrađenih od karbonatnih stena, može se uzeti da ukupna dubina karstifikaciji iznosi i preko 800 m“.²

Kako su karbonatne tvorevine predmet sagledavanja procesa karstifikacije, uslova cirkulacije i geneze toplih i hladnih podzemnih voda, to će se posebno usmeriti pažnja na površinske i podzemne oblike formirane u okviru karbonatnih tvorevina.

² Z. Stevanović : Regulacija karstne izdani u okviru regionalnog vodoprivrednog sistema “Bogovina”, str.38

4.4.1. Površinski morfološki oblici

Površinska morfologija karstnih oblika na Kučajsko-beljaničkom masivu je jako razvijena, pa su tako gotovo zastupljeni svi površinski oblici, izuzev karstnih polja. Od površinskih mikro oblika najviše su zastupljene škrape, kamenice i muzge, dok su od makro oblika zastupljene vrtače, prerasti, uvale i suve doline. Svi oblici formirani u karbonatnim tvorevinama, nastali su hemijskom i mehaničkom erozijom, dejstvom površinskih i podzemnih voda.

Mikro oblici su najčešće formirani na ogolićenim karstnim površinama. Neki od najzastupljenijih oblika su škrape (slika 4.8.), čiji se nastanak vezuje za proširenje već postojećih pukotina erozionim dejstvom vode. Zev škrapa može biti cm do dm dimenzija, a od tipova najčešće su zastupljene mrežaste i rebraste škrape.



Slika 4.8. Škrape na istražnom prostoru

Sitna i plitka udubljenja ovalnog oblika, odnosno kamenice, formiraju se na krečnjačkim blokovima i uglavnom su manjih dimenzija (cm). Takođe su na istraživanom terenu konstatovane i muzge čije se formiranje vezuje za strme odseke masivnih i bankovitih krečnjaka, pa su uglavnom izražene u kanjonskim predelima.

Vrtače su najzastupljeniji karstni površinski oblici na istraživanom terenu, a rasprostranjenje im je pretežno uslovljeno rasednim strukturama. Uglavnom su to

levkasta udubljenja (slike 4.9. i 4.10.) koja nastaju koncentrisanim rastvaranjem krečnjaka, i mogu biti metarskih do dekametarskih dimenzija. Linearna raspoređenost vrtača može da ukaže na postojanje podzemnih kanala. Dna vrtača su najčešće pokrivena zemljom (crvenicom).



Slike 4.9. i 4.10. Vrtčače na Kučajsko-beljaničkom masivu

Depresije većih dimenzija predstavljaju uvala, koje su rasprostranjene po visoravnima, a uglavnom se duž njih javljaju manji i/ili povremeni rečni tokovi. Neke od najvećih uvala Kučajsko-beljaničkog masiva su uvala Rečke, Busovate, Velika i Mala Brezovica i Gajine Mlake (slika 4.11.).



Slika 4.11. Uvala Busovate

Suve doline vezane su za karstnu eroziju, koja se odvija brže od fluvijalne. Na suvim dolinama nema formiranih površinskih tokova, što ih razlikuje od uvala sa ponornicama.

Razvijanjem procesa karstifikacije i spuštanjem nivoa podzemnih voda, dolazilo je do preraspodele voda u određenim slivovima, pa su često doline ostajale u potpunosti suve (Stevanović, 1981). Podizanjem pojedinih tektonskih blokova, dolazi do izdvajanja aktivnih dolina i presecanja tokova, čime one postaju suve ili slepe, završavajući se ponorima ispred visokih pregrada (kao što je slučaj sa Gajinim mlakama). Jedna od najvećih suvih dolina u okviru masiva je dolina Brezovice, a pored nje su i donji deo kanjona Suvog dola, Garska padina, Turina padina.

Prerasti su kameni mostovi, nastali urušavanjem tavanica nekadašnjih pećinskih objekata. U okviru Kučajsko-beljaničkog masiva nalazi se samo jedna veća prerast Samar (slika 4.12.).



Slika 4.12. Prerast Samar (foto: S. Milanović)

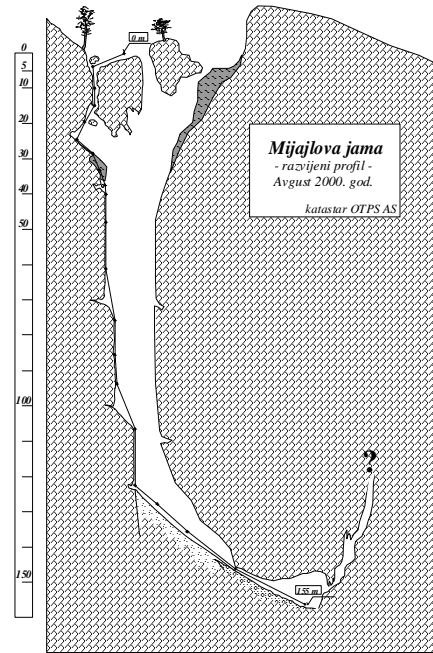
4.4.2. Podzemni morfološki oblici

Svi tipovi podzemnih morfoloških oblika razvijeni su u okviru karsta Kučajsko-beljaničkog masiva, i jame i pećine. Poznavanje podzemne morfologije terena od velike je važnosti za definisanje baze karstifikacije, kao i uslova cirkulacije i dubine zaleganja karstnih kanala.

Takođe, u okviru ovog masiva zastupljeni su i potopljeni speleološki objekti kao i objekti u nivou podzemnih voda, što je izuzetno značajno pri istraživanju podzemnih voda u neposrednim zonama isticanja ili kolebanja nivoa podzemnih voda. Kako na istraživanom terenu, odnosno na Kučajsko-beljaničkom masivu postoji veliki broj do sada istraženih speleoloških objekata (preko 130 jama i pećina) neće se ulaziti u njihovo detaljno prikazivanje, već samo onih objekata koji su imali direktnu vezu sa izvedenim istraživanjima tj. koji su bili deo monitoring mreže tokom izrade ove disertacije.

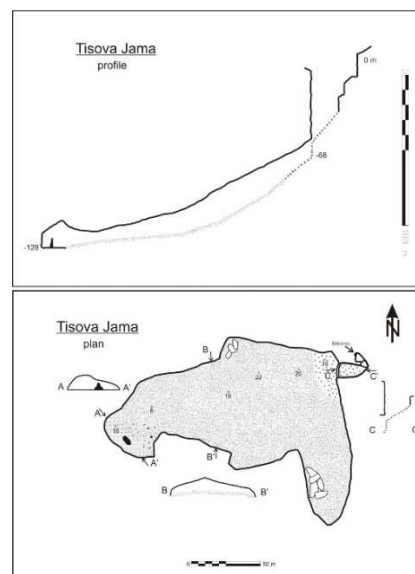
Jame, odnosno objekti nastali mehaničkim i hemijskim dejstvom vode duž pukotina i raseda mogu biti vertikalni ili subvertikalni, a u okviru masiva se javlja veliki broj ovih, kao i sličnih objekata, kao što su okapine, zvekare i ledenice (Stevanović, 1981).

Jedna od većih jama koja se nalazi u zapadnom Kučaju, u zaseoku Bigar, je Mihajlova jama (slika 4.13.). Mihajlova jama je po tipu kolenast fosilni ponorski vertikalni speleološki objekat sa ukupnom dužinom istraženih kanala od 230 metara. Sva merenja se odnose na nulti nivo ulazne tačke bočnog otvora na južnoj strani objekta. Dubina jame iznosi 155 metara, a prosečna širina vertikalnog grotla, koje se ka dnu sužava, iznosi 15 metara. Vertikalno grotlo se završava ledenim siparom velikog nagiba (42°). Temperatura na vrhu ledenog sipara je izuzetno niska i iznosi 0° - 5° stepena. Na dnu sipara se nalazi prostrana dvorana trougaonog oblika, maksimalne visine oko 20 metara. Temperatura u dvorani iznosi 3° - 8° C.



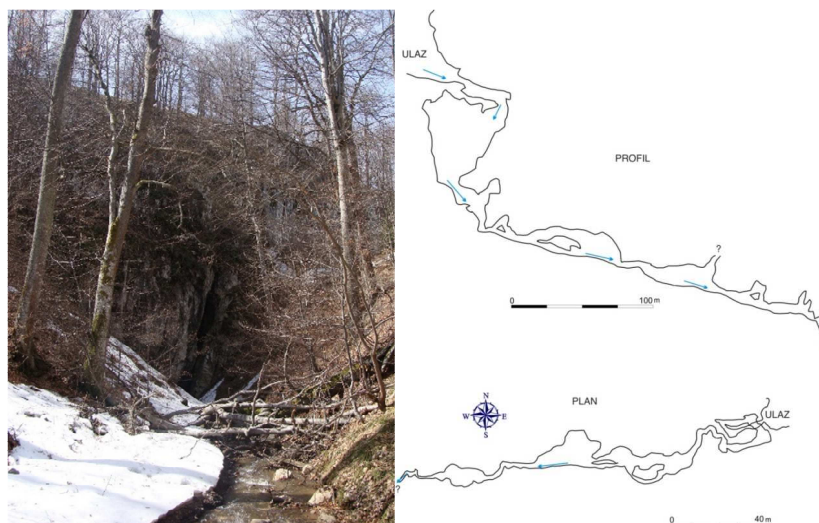
Slika 4.13. Profil Mihajlove jame (katastar OTPS AS, 2000)

Značajan jamski objekat je i Tisova jama (slika 4.14.), koja se nalazi na Beljaničkom masivu između Ravnog Glavičorka na jugu, vrha Ravne Glave (1027 m n.m.), Malog Glavičorka na severu i vrha Velike glave (1028 m n.m.) na istoku. Jama se nalazi u dnu jedne od najvećih vrtača na masivu prečnika oko 150 m, a od jamskog otvora koji se nalazi na dnu vrtače duboka je 128 m (Milanović S, 2005, 2010).



Slika 4.14. Plan i profil Tisove jame (preuzeto: Milanović S, 2010)

Jama Ivkov ponor (slika 4.15.), nalazi se u uvali Rečke i predstavlja stalno aktivan ponor koji prima vode Rečke, koje teku preko platoa Beljanice na dužini oko 4 km, i dalje sistemom podzemnih kanala teku do Malog vrela, (utvrđena veza opitom bojenja). Voda ponire u otvor u krečnjačkom odseku, predisponiranim pukotinskim sistemom i rasedom pravca pružanja I-Z. U objektu se nalaze 4 dvorane koje se kaskadno spuštaju prema dnu objekta, dubina do sada istraženih kanala jame je 165 m, a ukupna dužina kanala iznosi 360 m (Milanović S, 2012).



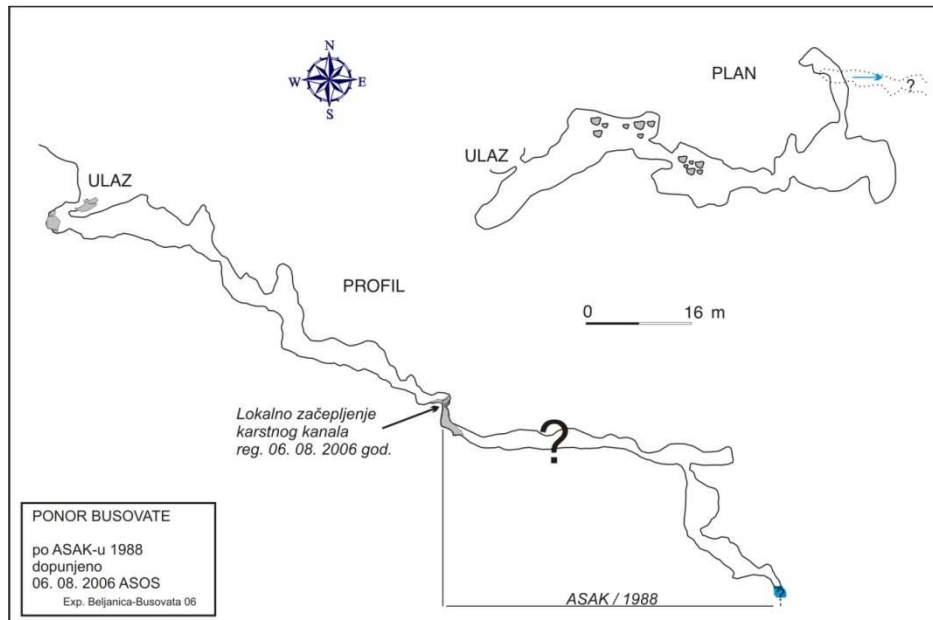
Slika 4.15. Jama Ivkov ponor. Slika levo - ulaz u ponor; Slika desno - plan i profil ponora (preuzeto: Milanović S, 2010, 20102)

Ponor Busovate se nalazi u istoimenoj uvali. Potok koji površinski teče kroz uvalu Busovate se formira od slabih izvora u okviru serije zelenih škriljaca, i u potpunosti se gubi u ponorskoj zoni. Ponor je formiran ispod krečnjačkog odseka visine oko 10 metara, na kontaktu zelenih škriljaca prekrivenih deluvijalno-proluvijalnim naslagama i srednjih i gornjojurskih krečnjaka. Pored ovog ponora se nalazi još jedna zona sa ponorskom funkcijom (slika 4.16.) manjih dimenzija, u koju ponire voda u periodu niskih voda. U periodu velikih voda, kada manji ponorski kanali ne mogu da prime svu vodu koja protiče uvalom ($Q > 50 \text{ l/s}$), veći ponor preuzima funkciju gutanja preostale vode. Jamski objekat je dugačak 150 metara, sa istraženom dubinom do 55m (slika 4.17.).



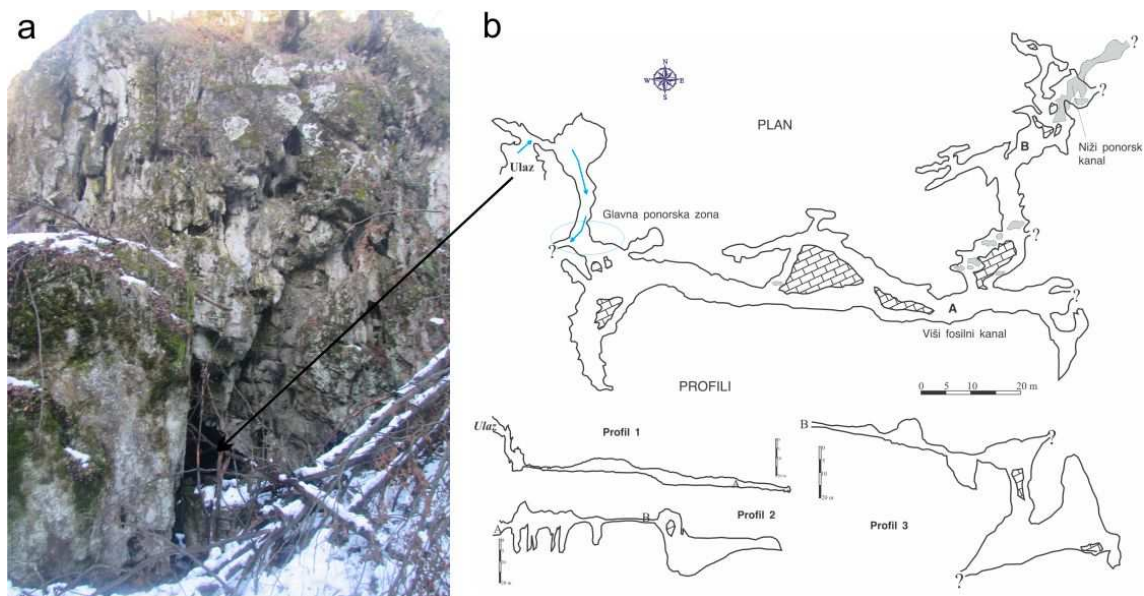
Slika 4.16. Uzorkovanje vode u ponorskoj zoni koja je aktivna u periodu malih voda; u pozadini krečnjački odsek u podnožju kojeg se nalazi ponor Busovate (foto: S.

Milanović)



Slika 4.17. Plan i profil ponora Busovate (Milanović S, Kličković, 2006)

Jama Ponor Vojala (Slika 4.18 a) je jedna od većih jama sa funkcijom ponora. Ponor predstavlja kolenasti speleološki objekat koji je snimljen do dužine od 560 m. Dubina ovog objekta iznosi 68 m, a odlikuju ga pojave lonaca i akumuliranog materijala, koji se javljaju u gornjem nivou jame. Na nastanak ovog objekta, najveći uticaj imala je tektonika terena. Plan i profil jame prikazani su na slici 4.18 b.

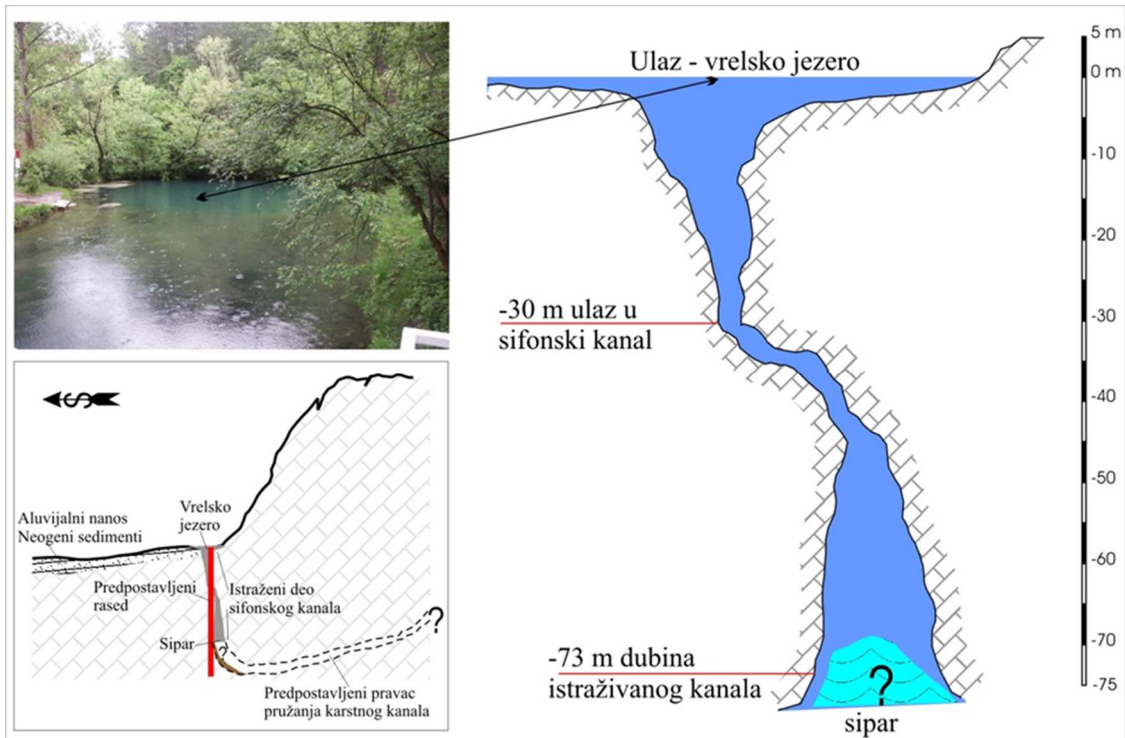


Slika 4.18. Ulaz u ponor Vojala (a); Plan i profil ponora Vojala (b) (preuzeto: S. Milanović 2012)

Pored prethodno prikazanih ponora, sa hidrogeološkog stanovišta su interesantne i jame sa funkcijom ponora Nekudova i Kločanice, pri čemu je ponor Nekudova bio deo monitoring mreže za potrebe izrade ove disertacije.

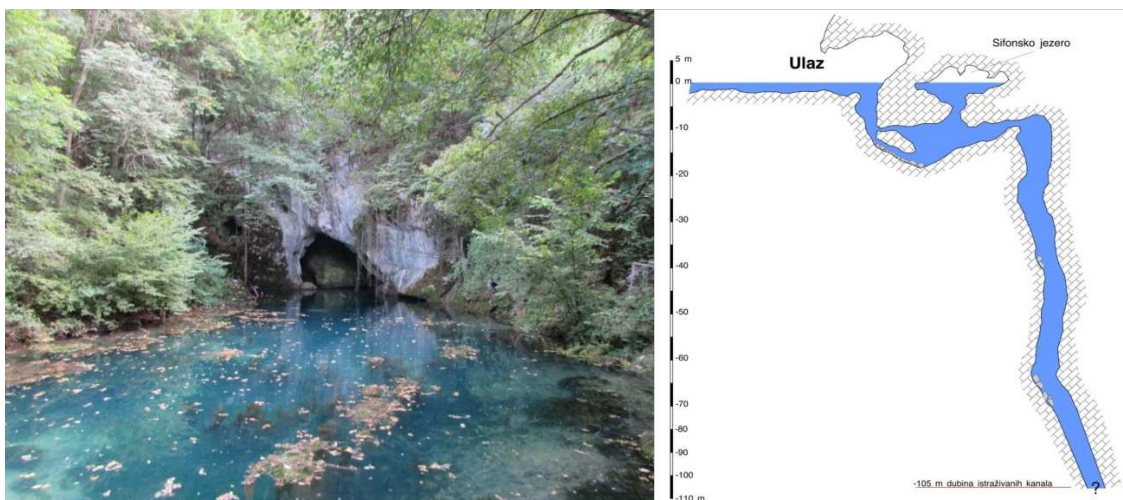
Pored jamskih objekata sa ponorskom funkcijom, najznačajniji istraživani speleološki objekti su karstna vrela. Vrelo Mlave (slika 4.19.) predstavlja podzemni morfološki oblik jamskog tipa, sa konstantnim isticanjem vode na površinu terena na koti 305 m n.m. Ovo vrelo je jedno je od prvih osmatranih vrela u Srbiji. Cvijić ga je još 1896. godine opisao kao vrtačasti vodeni basen sa stalnom otokom vode.

Ipak, najvećem poznavanju morfologije karstnog kanala vrela Mlave doprinela su speleoronilačka istraživanja sprovedena od strane brojnih ronilačkih ekipa (SRK Aqua Mont-a, ASOS-a, RK Tritona i DHG-CKH-a). Brojnim zaronima istražen je karstni kanal do dubine od 73 metra. Samo jezero duboko je oko 30 m, nakon čega se kroz kolenast karstni kanal ulazi u skoro vertikalni kanal, koji se zatim širi u levkast kanal na dubini od 43 m (Milanović S, 2010). Profil vrela po S. Milanoviću dat je na slici 20.



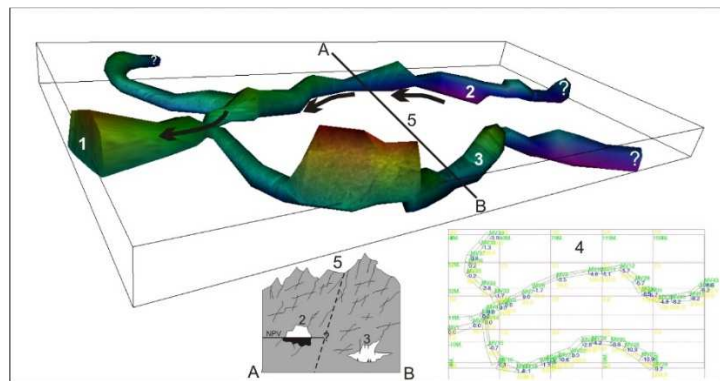
Slika 4.19. Profil vrela Mlave (preuzeto od S. Milanović 2010)

Krupajsko vrelo (slika 4.20. a) je još jedno jako vrelo koje drenira Beljanički masiv na nadmorskoj visini od 220 m. Voda izbija iz pećinskog otvora, čiji su kanali predisponirani rasedom SI-JZ. Plići kanali zaležu do dubine od 20 m, a nakon 70 metara dužine izlaze u suhu sifonsku dvoranu. Dublji kanal je vertikalalan i speleoronilačkim istraživanjem istražen do dubine od 133 m (slika 4.20. b). Krupajsko vrelo je jedno od najdublje istraženih karstnih vrela u Srbiji.



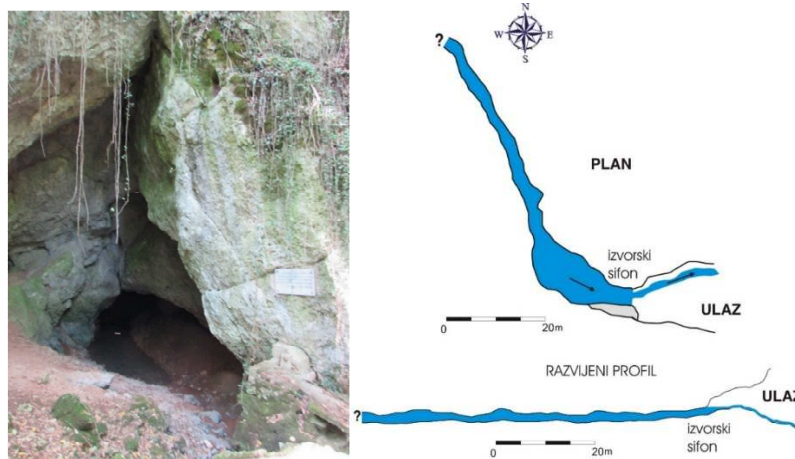
Slika 4.20. a) Krupajsko vrelo b) sifonalni kanal vrela (preuzeto od S. Milanović, 2010)

U karakteristične istražene speleološke objekte u samoj zoni dreniranja karstnih vrela, spada i Malo vrelo. Malo vrelo nalazi se u neposrednoj blizini sela Strmosten. Pećinski kanal je ispitan do 145 m dužine i svega 5 m dubine. Novija speleološka i speleoronilačka istraživanja sprovedena su za potrebe formiranja 3D modela karstnih kanala (slika 4.21.), a u funkciji analize mogućnosti zahvatanja podzemnih voda u karstu. Formiranjem ovakvog modela i njegovom analizom moguće je predvideti dalje rasprostranjenje karstnih kanala i njihovo funkcionisanje (Milanović S. *et al*, 2012).



Slika 4.21. 3D karstnog kanala Malog vrela (preuzeto od S. Milanović *et al*, 2012)

Vrelo Crnog Timoka izvire u selu Krivi Vir iz pećinskog otvora (slika 4.22.), odnosno kanala koji su predisponirani rasedom pravca pružanja SZ. Vrelo se nalazi na 410 m n.m. Pećinski kanal je razvijen u vidu manjeg sifona, koji se dalje pruža horizontalno, a plan i profil pećinskog kanala prikazani su na slici 4.22. b.



Slika 4.22. a: Vrelski pećinski otvor; b: plan i profil vrelske pećine Crnog Timoka (S. Milanović, 2012)

Velika Peć na ponorima predstavlja razgranat speleološki objekat sa aktivnom hidrogeološkom funkcijom (slika 4.23.). Obzirom da je u većem delu godine protočna, a nalazi se na zapadnoj strani Beljaničkog masiva u neposrednoj blizini kontakta krečnjaka i crvenih premiskih prešćara, ovaj speleološki objekat je uvršten u monitoring mrežu za izradu disertacije.



Slika 4.23. Pećina Velika peć na ponorima – aktivan tok u pećini

Ukupna dužina pećinskih kanala Velike Peći je 360 m, a visinska razlika od ulaza do kraja pećine je +10 m. Od ulaza, koji je širine 2 m i 3 m visine, se prostire glavni kanal ka jugozapadu, od kojeg se na više mesta javlja račvanje. Kanal je celom dužinom blago uzlazni, bez većih pregiba. Na 189 m od ulaza dolazi se do većeg račvanja (slika 4.24.). Kanal u pravcu jugoistoka se završava jezerom, odakle dalje nije bio prohodan u vreme istraživanja (slika 4.25.).



Slika 4.24. Račvanje kanala u pećini (foto: S. Milanović)



Slika 4.25. Sifonsko jezero na kraju kanala (foto: S. Milanović)

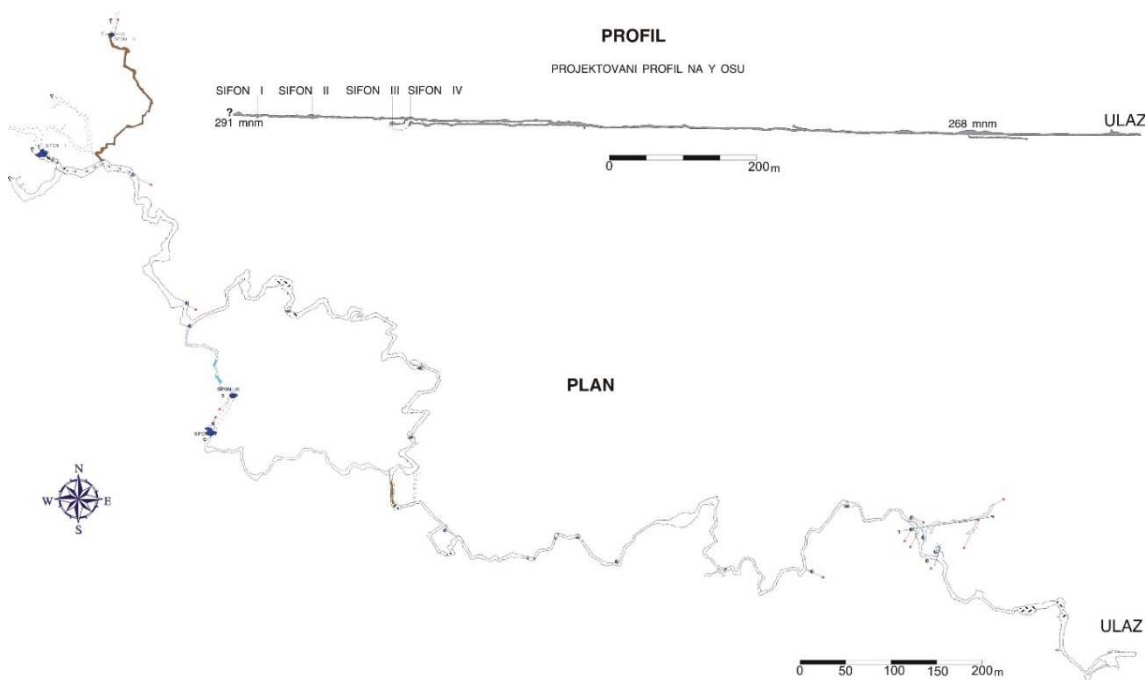
Bogovinska pećina se nalazi na oko 4 km od centra sela Bogovina. Ulaz u pećinu je na koti 266 m. n.m. (slika 4.26.), i ona spada u red najvećih pećina Srbije i predstavlja jedan od najimpozantnijih karstnih podzemnih morfoloških oblika. Pećina spada u razgranate - etažne speleološke objekte meandarskog tipa, sa generalnim pružanjem karstnih kanala u pravcu JI-SZ. Sastoji se od glavnog kanala dužine 2496 m i više sporednih kanala, koji se uglavnom završavaju sifonima sa vodom. Hipsometrijska razlika ulaza i sifona na kraju glavnog kanala je 24,7 m (Milanović S, 2012). Plan Bogovinske pećine prikazan je na slici 4.27.



Slika 4.26. Ulaz u Bogovinsku pećinu

Stevanović (1981) navodi: „Bogovinska pećina nastala je hemijskom i mehaničkom erozijom izdanskog toka koji je u vidu vrela izbijao na vjehledu koji se nalazi na 32 m od današnjeg ulaza, a na visini od 24 m. Sa razvojem karstnog procesa ulogu vrela preuzeo

je pećinski ulaz, predisponiran pukotinom pružanja I-Z, da bi vremenom i on skoro potpuno izgubio svoju funkciju. Izdanski tok, koji je u pećini usekao seriju terasa od 0.5-6.5 m, ponire na oko 100 m od ulaza duž vertikalnih kaverni u Ponorski kanal, kojim stalno protiče izdanski tok, na oko 12 m ispod poda Glavnog kanala. Na kraju pećine nalazi se sifonsko jezero širine oko 6 m sa visinom tavanice od oko 1 m. Ono se mrežom kanala produbljuje dalje prema zapadu“.³



Slika 4.27. Plan i profil Bogovinske pećine (Milanović S, 2012)

Zlotska, odnosno Lazareva pećina je najduži speleološki objekat u Srbiji. Ulaz u pećinu se nalazi na 291 m n. v., a u pećini se nalaze tri nivoa kanala od kojih je prvi suv, drugi povremeno aktivan, i treći stalno aktivni nivo kanala. Plan Lazareve pećine prikazan je na slici 4.28. Najnovijim istraživanjima sprovedenim do kraja 2015. godine, otkriveni su novi nivoi kanala, a trenutna dužina Lazareve pećine iznosi 12 850 metara (najduža u Srbiji), i ima dva poznata ulaza (Mišić, 2015).

³ Z. Stevanović: "Hidrogeološke karakteristike karsta Kučajsko-beljaničkog masiva sa aspekta mogućnosti korišćenja izdanskih voda za vodosnabdevanje", str. 94, 95

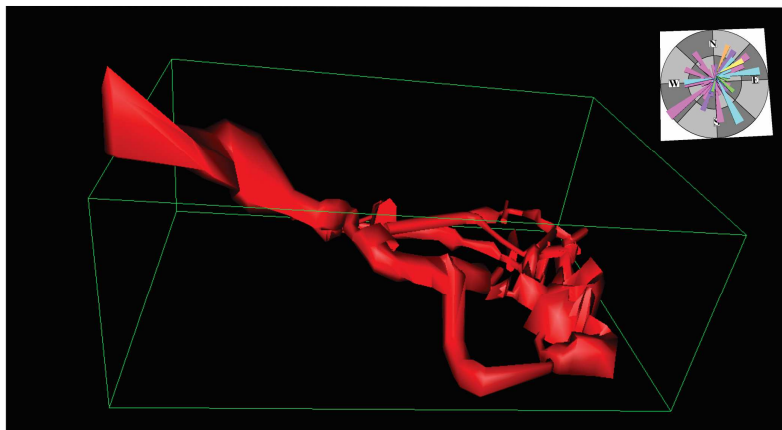


Slika 4.28. Plan Lazareve pećine (Mišić, 2015)

U grupu većih i značajnijih speleoloških objekata ubraja se i Resavska pećina. Ona je jedan od najatraktivnijih speleoloških objekata u istočnoj Srbiji i uređen za posetioce (slika 4.29.). Na osnovu najnovijih detaljnih istraživanja pećine, utvrđena je dužina od ukupno 580 m kanala, bez susednih speleoloških objekata, koji takođe pripadaju ovom pećinskom sistemu, ali za sada nisu fizički povezani sa samom pećinom (odnosno prolazi nisu prohodni za speleologe). Zapremina svih istraženih pećinskih kanala je 17 278 m³. Prikaz 3D modela Resavske pećine dat je na slici 4.30. (Milanović S & Vasić, 2014).



Slika 4.29. Detalj kanala Resavske pećine – uređena za posetioce



Slika 4.30. Prikaz 3D modela Resavske pećine sa rozetom pružanja karstnih kanala
(Milanović S & Vasić, 2014)

4.5. Geološke karakteristike terena

Kučajsko-beljanički masiv predstavlja zapadni deo geološki jedinstvenog Karpato-balkanskog luka geosinklinalne strukture severnog dela Alpskog orogena. Planinski venac Karpato-balkanida dugačak je 1500 km, izdiže se na području severne Slovačke i južne Poljske, a preko Ukrajine, Rumunije i Srbije, svoje rasprostranjenje završava Starom planinom, koja se u Bugarskoj blago spušta prema Crnom moru (Stevanović, 1991). Na području ovog luka postojali su različiti uslovi sedimentacije, sa čestim bočnim i vertikalnim smenjivanjem. Česte vulkanske aktivnosti, magmatske intruzije i stvaranje efuziva, praćeno kontaktnim i regionalnim metamorfizmom, pratile su sedimentacioni ciklus koji se odvijao u Tetiskom okeanu.

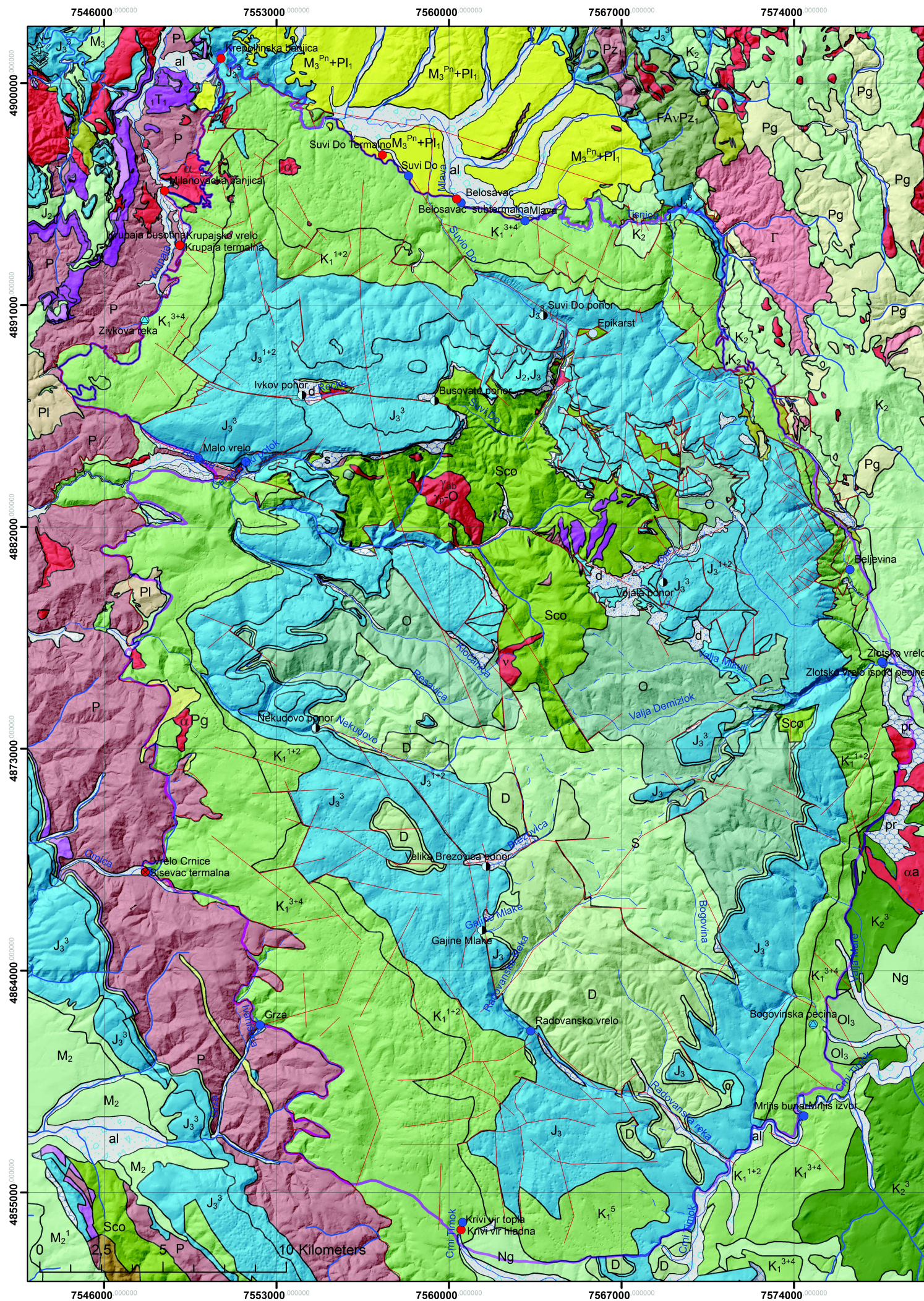
Kučajsko-beljanički planinski venac je antiklinorijum, složene geološke građe i složenih tektonskih karakteristika, sa pravcem ose pružanja SSZ-JJI. Najveći deo ovog masiva izgrađen je od kompleksa karbonatnih stena mezozojske starosti, ali se u njegovom jezgru nalaze i najstarije tvorevine prekambrijske i paleozojske starosti. Na području masiva i u njegovoj široj okolini, zastupljene su tvorevine od najstarijih, prekambrijskih, pa sve do najmlađih, kvartarnih. Krupne rasedne dislokacije oivičavaju, odnosno odvajaju, masiv sa svih strana i predstavljaju granicu prema obodnim mlađim tvorevinama, pa tako severnu granicu predstavlja Mlavski rased, istočnu Zlotski, Lukovski rased južnu granicu, dok zapadnu granicu predstavlja navlaka crvenog permskog pešara (Stevanović, 1981).

Pažnju brojnih istraživača privukla je geologija ove oblasti, pa su kao rezultat tih istraživanja proizašla dva mišljenja o autohtonosti masiva u celini. Stevanović (1981) navodi da su po tom pitanju formirana dva osnovna shvatanja o tektonskoj građi kompletne istočne Srbije, uključujući i Kučajsko-beljanički masiv. Pristalice jedne teorije podržavaju shvatanja S. Radovanovića i V. Petkovića o postojanju velikih horizontalnih kretanja i krupnih navlaka, dok se druga teorija („autohtona“) bazira na zastupanju ideje o pretežno vertikalnim kretanjima stenskih masa, čime se negira postojanje krupnih regionalnih navlaka. Tako se i u interpretaciji tektonike terena pri izradi geoloških karata, sreću i dva modela strukturne građe, zavisno iz koje grupe dolaze sami autori.

Geološki sastav terena u Srbiji najvećim delom je izučen pri izradi OGK SFRJ, a područje Kučajsko-beljaničkog masiva obuhvata dva lista 1 :100 000: list Žagubica (K 34-140) i list Boljevac (K 34-8).

Metamorfiti magmatskog i sedimentnog porekla čine osnovu Kučajsko-beljaničkog masiva, a preko njih leže tvorevine paleozojske starosti, predstavljene formacijama škriljaca ordovicijuma, silura i devona. Prekid u sedimentaciji nastaje posle devona i traje do kraja perma. Tokom trijasa i donje jure stvaraju se formacije terigenog ili karbonatnog karaktera, ali se najdeblje formacije karbonatnih tvorevina stvaraju u periodu nakon dogerske transgresije. Sedimentacioni ciklus se završava krajem gornje krede, u toku alba. U toku tercijara odvija se sedimentacija u izolovanim jezerskim basenima, dok se u kvartaru, razgranjavanjem rečne mreže, formiraju aluvijalne naslage, čija debljina retko prelazi 5 metara. Pored aluvijalnih naslaga, tokom kvartara formiraju se i drugi morfološki oblici, kao rezultat geoloških i geomorfoloških procesa. Tokom dugog perioda od dogera do kraja tercijara se odvijala i jaka tektonska aktivnost, koja je rezultirala stvaranjem magmatskih intruzija i izlivima vulkanita (Stevanović, 1981).

Geološka karta terena prikazana je na slici 4.31., a dalje u tekstu su opisane litostratigrafske jedinice po periodima u kojima su se razvijale (Veselinović *et al*, 1970, Antonijević *et al*, 1970, Stevanović, 1981).



Legenda geoloških oznaka

- al, Aluvijon
- d, Deluvijum
- i, Izvorski bigar
- pr, Proluvijum
- s, Sipar
- t, Terasa
- M_{1,2}, Klastiti miocena
- M_{3^{Pn+Pl}}, Šljunkovi i peskovi
- Ol₃, Laporci i bigroviti krečnjaci
- Pg, Hidrotermalno izmenjene stene- kaolinisane
- Pg, Skarnovi
- αPg, Dacito-andeziti
- α, Daciti
- αa, Aglomeratični augit-hornblenda andezit
- K_{2³}, Konglomerati peščari laporviti krečnjaci
- K_{1¹⁺²}, Bankoviti i slojeviti krečnjaci
- K_{1³⁺⁴}, Bankoviti i masivni krečnjaci
- K_{1⁴}, Peščari i glinci
- K_{1⁵}, Glaukonitski krečnjaci
- J_{3³}, Masivni i bankoviti sprudni i subsprudni krečnjaci
- J_{3¹⁺²}, Slojeviti krečnjaci sa rožnacima i mermerima
- J₃, Neraščlanjeni krečnjaci gornje jure
- J_{2,3}, Dolomiti i dolomitični krečnjaci
- J₂, Konglomerati i peskovito šljunkoviti krečnjaci
- 1T₁, Beli konglomerati i metamorfisani peščari
- P, Formacija crvenih peščara
- D, Konglomerati peščari sa proslojcima argilošista
- O, Metamorfisani kvarcni peščari

- v, Metamorfisani gabrovi
- Sse, Sericitski škrljici i metapeščari
- Sco, Zeleni škrljici i metamorfisani vulkaniti
- γ_{ab}, Plagiograniti
- Γ, Skarnovi
- FAvPz₁, Filiti i argilofiliti

Legenda strukturnih oznaka

- Eroziona granica aproksimativno locirana
- Eroziona granica utvrđena
- Geološka granica aproksimativna
- Geološka granica utvrđena
- Granica magmatskog tela
- Granica magmatskog tela aproksimativno locirana
- Osa antiklinale
- Osa sinklinale tone
- Postepen litološki prelaz
- Postepen prelaz aproksimativno lociran
- Rased pokriven
- Rased pretpostavljen
- Rased utvrđen
- Vertikalni rased

Slika 4-31. Geološka karta Kučajsko-beljaničkog masiva

4.5.1. PRIKAZ LITOSTRATIGRAFSKIH JEDINICA

PREKAMBRIJUM

U jezgru Kučajsko-beljaničkog masiva zastupljene su najstarije tvorevine predstavljene kristalastim kompleksom. Kompleks se sastoji iz dva nivoa, odnosno dve serije. Donja vulkanogeno-sedimentna serija, metamorfisana do facije zelenih škriljaca, pripada stenama prekambrijumske starosti (najverovatnije rifeju i proterozoiku) i predstavljena je metamorfisanim bazičnim stenama, keratofirima i keratofirskim tufovima, granitoidima, hloritskim i hloritsko-sericitskim škriljcima i metamorfisanim pešćarima. Gornja serija, koja transgresivno leži preko donje, pripada starijem paleozoiku, koji je predstavljen ordovicijumom, silurom i devonom.

Serija vulkanogenih sedimenata zastupljena je u dva nivoa, donji nivo predstavljaju metamorfisane bazične stene, metagabrovi i metadijabazi, sa keratofirima, kvarc-keratofirima i tufovima. Gornji nivo predstavljen je „zelenim škriljcima Beljanice“ (po autorima OGK Žagubica), odnosno albitsko-hloritskim škriljacima (po autorima OGK Boljevac) (slika 4.32.). Intruzije granitoidnih stena i plagiogranita javljaju se mestimično, a po vremenu stvaranja odgovaraju vremenu stvaranja keratofira.



Slika 4.32. Zeleni škriljci centralnog Beljaničkog jezgra (uvala Busovate)

(B) Metamorfisane bazične stene – nalaze se u najdubljim nivoima serije, a predstavljeni su metagabrovima, metadijabazima, kao i amfibolitima. Strukture su masivne i škriljave,

a u mineralni sastav ulaze albit, amfibol, hlorit, piroksen, epidot, sekundarni kvarc. Na površini terena se pojavljuju u okviru serije zelenih škriljaca Beljanice.

(γab) Plagiograniti – pripadaju alkalnim granitima sa visokim sadržajem natrijuma. U mineralni sastav ovih stena ulaze kvarc, albit i hloritisani biotit, apatit, sfen i epidot sa ortitom. Najveće rasprostranjenje plagiogranita nalazi se u južnom delu Beljaničkog masiva, u okviru serije škriljaca.

(Sco) Zeleni škriljci Beljanice, odnosno albisko-hloritski škriljci, javljaju se u vidu hloritskih, i sericitsko-hloritskih i najmanje zastupljenih sericitskih škriljaca. Hlorit-sericitskih škriljci su izgrađeni od kvarca, hlorita, sericita, albita, cirkona, turmalina, limonita, hematita, i neprovidnih minerala. Sericitski škriljci su najmanje zastupljeni, a u mineralnom sastavu se sastoje od kvarca, sericita, hlorita, epidota i neprovidnih minerala. Hloritski škriljci mestimično sadrže trake magnetita, a izrazite su tamnozeleno boje. U njihov mineralni sastav ulaze hlorit (često i do 70%), kvarc, albit, epidot, hematit, limonit i neprovidni minerali (Antonijević *et al*, 1970).

(Sse) Niskokristalasti škriljci Omaniša i Velike treste i metamorfisani peščari – Oblast ovih tvorevina nalazi se u okviru severnog Kučaja, gde metamorfisani peščari zauzimaju najveću površinu. U mineralni sastav ulaze: kvarc, plagioklas (vrlo redak), sericit, obojeni biotit, turmalin, sfen, cirkon i neprovidni minerali, a boje su sive ili zelenkaste. Hlorit-sericitski škriljci su podređeni, i grade slojeve i proslojke u peščarima. Kvarciti su sivi i beli, u čiji sastav ulaze kvarc, turmalin (retko), sfen, plagioklas, mikroklin, liskuni, cirkon i neprovidni minerali. Na terenu su otkriveni na nekoliko lokacija uglavnom zapadno od Velike Treste i oko Bote.

(v) Gabroidne stene – Rasprostranjene su na više mesta u jugoistočnom i južnom delu Beljanice i severnim delovima Kučaja. Najviše ih ima na Velikoj Tresti (gde se javljaju u više skoro paralelnih zona pružanja SSI—JJZ), na Omanišu i severno od Male Rašice. Među njima su najzastupljeniji uralitsko-sosiritski gabrovi i gablo-amfiboliti, dok su gablo-porfiriti (mikrogabrovi) i gablo-dijabazi žičnoga tipa neznatnog rasprostranjenja. Starost gabroidnih stena nije tačno utvrđena. One probijaju metamorfisane peščare i

hlorit-sericitske škriljce, a u konglomeratima iz paleozojske serije nisu nađene. Često se stene iz kristalastog kompleksa masiva upotrebljavaju se za lokalne potrebe (nasipanje šumskih puteva) (Antonijević *et al*, 1970).

STARIJI PALEOZOIK

U okviru starijeg paleozoika javljaju se tvorevine ordovicijuma, silura i devona, pri čemu su tvorevine silura paleontološki dokazane, dok su tvorevine ordovicijuma i devona pouzdano utvrđene na prostoru centralnog i južnog Kučaja. Klastične tvorevine ovog perioda javljaju se u oblasti severnog Kučaja, dok se na Beljanici javljaju ispod Beljaničke kape, u vidu izolovane partije.

Ordovicijum

Tvorevine ordovicijuma su rasprostranjene u severoistočnom delu lista OGK Boljevac. Procena debljine ovih tvorevina iznosi oko 700 metara, a sastoje se iz donjeg i gornjeg horizonta. Donji ordovicijum leži transgresivno preko prekambrijumskih tvorevina, a predstavljen je peščarima, kvarcitima, konglomeratičnim peščarima, argilofilitima i metamorfisanim glincima. U gornjem ordovicijumu preovlađuju glinoviti sedimenti, dobro uslojeni i sa pojavom piritских konkrecija. Predstavljani su argilofilitima i metamorfisanim glincima. Stene ordovicijuma su jako izrasedane i ispucale, pa se u okviru ovih tvorevina javlja veći broj izvora male izdašnosti.

Silur

Tvorevine silura zastupljene su u jezgru Kučaja, a na površini terena otkrivene su u gornjim tokovima reka Nekudovo, Resavica i Valja Demizlok. Debljina ovih slojeva, čija je starost procenjena na osnovu graptolita iz grupe *Monograptidae*, iznosi maksimalno do 400 m. Predstavljani su peščarima, argilošistima, lilitima i metamorfisanim glincima. Takođe, javljaju se i krečnjaci, znatno ubrani na određenim lokalitetima. Na istražnom prostoru utvrđena su sva tri kata silura: landoveri, venlok i ladlo.

Devon

Tvorevine devonske starosti nisu paleontološki konstatovane na Beljanici, dok se na teritoriji Kučaja javljaju na više mesta. Uzrok odsustva devona na Beljanici može biti posledica epirogenih pokreta jakog inteziteta (gornji silur – srednji devon). Stene koje se naizmenično smenjuju u devonu predstavljene su peščarima, peskovitim glincima, konglomeratima. Debljina slojeva devonske starosti se procenjuje od 400 m pa preko 1000 metara i kao takve predstavljaju podlogu na kojoj se istaložio mezozojski karbonatni kompleks.

MLAĐI PALEOZOIK

Na obodu Kučajsko-beljaničkog masiva, tvorevine mlađeg paleozoika zastupljene su u okviru gornjeg karbona i perma. Debljina sedimenata *gornjeg karbona* procenjena je na 50-80 metara. Njihovo postojanje konstatovano je na maloj površini, dužine 1.5 km i širine oko 250 metara, južno od Samanjca i sastavljen je od konglomerata, kvarcnih peščara i glinaca sa slojevima poluantracita i antracita.

(qC) Hidrotermalne kvarcne žice – U oblasti masiva zastupljene su samo u oblasti Kučaja, kao proboji škrljaca ordovicijuma, ponegde silura, a postanak im se vezuje za varcijski magmatizam. Manjih su dimenzija, od nekolikoliko santimetara pa do 3 metara. Sadrže mlečno beli kvarc i pirit (Antonijević *et al*, 1970).

Stene permske starosti predstavljene su kontinentalnom facijom - *crvenim permskim peščarima* (slika 4.33.), koji su tako nazvani zbog svoje karakteristične crvene boje i pripadaju gornjačkoj zoni, odnosno „gornjačkom parahtonu“. Na Kučajsko-beljaničkom masivu pružaju se njegovim zapadnim obodom u dva pravca, prvo do Senjskog rudnika pravcem S-J, a zatim povijaju pravcem SZ-JI. Širina permske navlake iznosi između 2-8 km, a debljina, prema grupi autora “Geozavod” – Beograd, ide i preko 1000 m. Crveni permški peščari su bankoviti, tankoslojeviti do listasti, gde u donjim slojevima formacije dominiraju srednjezrni peščari uz proslojke konglomerata i krupnozrni peščara, dok su u gornjim slojevima formacije zastupljeni sitnozrni peščari.



Slika 4.33. Otkriveni profil crvenih permskih peščara (Sisevac)

(χ P) Kvarcporfiri-Paleorioliti – Javljaju se kao manji proboji tvorevina ordovicijuma, silura i devona, a predstavljaju vulkanite koji su posledica intenzivne magmatske aktivnosti, koja se odvijala u vreme hercinske orogeneze. U mineralnom sastavu izgrađeni su od kvarca, kalijskog feldspata, plagioklasa i dosta sericita, sa sitnim liskama biotita.

MEZOZOIK

Mezozojske tvorevine na istražnom terenu su najznačajnije sa aspekta problematike ove disertacije, jer je u njima formiran karstni tip izdani. Predstavljene su delimično trijaskim, a dominantno srednje i gornjajurskim, kao i donjokrednim tvorevinama. Rasprostranjenje karbonatnih tvorevina ujedno zauzima najveću površinu istražnog prostora.

Trijas (T)

Trijaski sedimenti u okviru Kučajsko-beljaničkog masiva nisu zastupljeni u značajnoj meri. Prekid u sedimentaciji na najvećem delu masiva trajao je od devona.

Ovi sedimenti konstatovani su severozapadno od masiva (šira zona istraživanja) u oblasti "zapadnog krečnjačkog pojasa", gde prate formaciju crvenih peščara i tonu ka zapadu. Na osnovu superpozicionih odnosa i faune utvrđeno je da je trijas zastupljen samo donjim i srednjim delom, dok prisustvo gornjeg trijasa paleontološki nije utvrđeno.

Jura (J)

Jurski sedimenti su nastajali u toku srednje i gornje jure. Taloženje je počelo u srednjoj juri, odnosno u dogeru transgresivno preko stena starijeg paleozoika (devona). Na tvorevine dogera se potom talože sedimenti gornje jure, koji imaju potpuno razviće u okviru oksford-kimeridža i titona.

(J₂) Srednja jura je predstavljena neritskim plitkovodnim sedimentima. Rasprostranjenje na Beljanici i severnom Kučaju imaju u nižim delovima serije konglomerati ili peskovito-šljunkoviti oolitični krečnjaci, kao i proslojci dolomita. U peskovitim partijama srednje jure Beljanice nalaze se i tanji proslojci kamenog uglja, debljine do 5 cm, a nešto severnije u sličnim sedimentima konstatovani su i ostaci fosilnog bilja. Navise, serija prelazi u peščare i peskovito-glinovite sedimente.

U okviru masiva, rasprostranjenje ovih tvorevina je svedeno na uske zone koje se javljaju kao direktna podina sedimentima oksford-kimeridža, a ukupna debljina serije varira od desetak metara do maksimalno 60 metara (Stevanović, 1981). Debljina srednje jure na Kučaju iznosi prema autorima OGK Boljevac 20 do 50 metara.

(J_{2,3}) Srednja i gornja jura – serija je predstavljena dolomitima i dolomitičnim krečnjacima, koja zapravo predstavlja posebnu faciju prelaza srednje ka gornjoj juri. Krečnjaci su bankoviti ili bez jasne slojevitosti. Donji slojevi serije uglavnom su predstavljeni rumenkastim dolomitima, koji prelaze u dolomitične krečnjake i krečnjačke dolomite. Ukupna debljina ovih sedimenata iznosi oko 100 m. Autori OGK Žagubica su mišljenja da ovi krečnjaci čine bočnu faciju dolomita i dolomitičnih krečnjaka i da pripadaju višim delovima dogera sa mogućim prelazom u malm.

(J₃) Gornja jura na području Kučajsko-beljaničkog masiva ima veliko rasprostranjenje, a predstavljena je krečnjacima i dolomitima stvaranim u oksford-kimeridžu i titonu. Leže uglavnom preko sedimenata srednje jure, iz kojih se postepeno i razvijaju. Debljina ovih slojeva se procenjuje na oko 500-700 metara.

(J_3^{1+2}) Oksford-kimeridžska serija ima veliko rasprostranjenje, a predstavljena je serijom slojevitih i bankovitih sivih i žućkastih krečnjaka sa rožnacima (slika 4.34.), ređe facijom dolomita i dolomitičnih krečnjaka. Debljina ovih slojeva iznosi oko 200 metara. Najveće rasprostranjenje serije oksford-kimeridža konstatovano je u zoni Beljaničkog dela masiva, u zoni južnih padina Jalove kose, na Đerčeku i Velikom kršu. Zapadnije, konstatovani su na obodu uz crvene permske peščare, dok je na jugoistočnom obodu konstatovana neraščlanjena tvorevina gornje jure, čiji su najniži horizonti predstavljenim serijom oksford-kimeridža (Stevanović, 1981).



Slika 4.34. Fragmenti rožnaca u krečnjačkoj stenskoj masi u Vlaškoj pećini

Sedimenti se odlikuju potpunim odsustvom fosila, još jedna od karakteristika ove serije je da predstavljaju postupni prelaz između podinskih dogerskih tvorevina prema povlatnim titonskim krečnjacima, što se može uočiti na mnogim lokalitetima i otkrivenim vertikalnim profilima.

(J_3^3) Sprudni i subsprudni krečnjaci, mestimično oolitični, predstavljaju slojeve titonske starosti, koji su uglavnom bankoviti, sa prelazom u masivne u višim partijama. Ovi sedimenti zauzimaju veliku površinu masiva, i kao takvi su najviše istraženi od strane geologa. Krečnjaci su uglavnom beli i žućkasti organogeni, mestimično oolitični i prekrystalisali, sa visokim procentom CaCO_3 (90-95 %), u kojima se javljaju fosili koralaa, gastropoda, brahiopode, hidrozoe, briozoe. (Veselinović *et al*, 1970; Antonijević *et al*, 1970).

Granica između donjeg i gornjeg titona se može mestimično izdvojiti na osnovu fosila, ali granica između tvorevina titonske i donjokredne starosti je nejasna. Bankoviti krečnjaci koji prelaze u masivne imaju debljinu oko 400 metara.

Kreda (K)

Na području Kučaja i Beljanice, sedimenti kredne starosti imaju najveće rasprostranjenje od stena mezozoika, a među krednim sedimentima, najrasprostranjeniji su sedimenti donje krede. Sedimenti gornje krede nisu prisutni u zapadnoj i centralnoj oblasti Kučaja i Beljanice, dok se na istočnoj strani masiva uočava njihovo neznatno rasprostranjenje. Najveće rasprostranjenje imaju sedimenti valend-otriva i barem-apta, dok se sedimenti alba javljaju u vidu izolovanih partija.

Donja kreda (K_1) leži preko titona i zajedno grade kontinualnu seriju neritskih sprudnih i subsprudnih krečnjaka.

(K_1^{1+2}) Sedimenti valendijskog i otrivskog kata predstavljani su sivobelim do žućkastim krečnjacima stvaranim u plitkovodnoj sredini. Razvili su se postepeno iz gornje jure, odnosno kao nastavak sedimentacije titonskih krečnjaka. Slojevi ovog dela donje krede uglavnom su siromašni fosilima, pa je njihova granica usvojena i iscrtana na karti prema titonu (podini) i baremu (povlati) (Veselinović *et al*, 1970).

Najveće rasprostranjenje imaju u planinskom delu masiva, odakle se od severne strane u vidu pojasa širine 1-3 km spuštaju istočnom i zapadnom stranom prema jugu (Stevanović, 1981, Milanović S, 2010). Debljina ovih sedimenata varira i iznosi oko 100-350 metara, a krečnjaci su pretežno kriptokristalasti bankoviti i slojeviti, a javljaju se i konglomerati, peščari, peskoviti i laporoviti krečnjaci, kao i peskoviti laporci.

(K_1^{3+4}) Barem i apt karakterišu bankoviti i slojeviti krečnjaci sprudnog i subsprudnog tipa taloženi u periodu plitkog mora, koji odgovaraju tipičnoj urgonskoj faciji donje krede mediteranske oblasti (Veselinović *et al*, 1970). Ovi sedimenti, masivni i bankoviti, su formirani po obodu celog masiva, a pojas njihove širine može biti i do desetak kilometara.

U razviću sedimenata uočavaju se konstantne vertikalne i horizontalne smene sprudnih i subsprudnih sedimenata. Debljina sedimenata ova dva kata iznosi oko 500 metara.

(K₁⁵) Albski kat se javlja u vidu izolovanih serija predstavljenih zelenkastim peščarima sa fosilnim anelidama. Preko ovih tvorevina leže sedimenti gornje krede, ali je granica nejasna. Stevanović (1981) navodi da: „tokom alba dolazi do povlačenja plitkog mora iz ove oblasti i na taj način biva završen sedimentacioni ciklus. Definitivno oblikovanje reljefa masiva odvija se u postsedimentacionom ciklusu za vreme intenzivnih orogenih i epirogenih pokreta, praćenih intenzivnom vulkanskom aktivnošću, tokom gornje krede.“⁴

Gornja kreda (K₂) zastupljena je u istočnom delu masiva, a najveći deo serije pripada senonu (K₂³). Okonturivanjem istražnog prostora zahvaćene su male površine sedimenata ove starosti i to po istočnoj obodnoj strani masiva. Niži delovi predstavljeni su konglomeratičnim, peskovitim i laporovitim sedimentima, dok se viši delovi odlikuju vulkanitima i vulkanoklastitima, formiranim kroz tri vulkanske faze.

PALEOGEN

Povremene vulkanske aktivnosti odvijale su se u gornjoj kredi i nastavile i u toku tercijara. Izlivanje dacito-andezita trajalo je tokom paleogena (Pg), a ove stene pripadaju eruptivnoj zoni, koja se prostire od Rumunije kroz istočnu Srbiju. Pojava dacito-andezita zastupljena je na zapadnoj strani masiva u okviru Ridanjsko-kropoljinske zone, gde ove stene probijaju crvene permske peščare i sedimente urgonske facije, koje ujedno i metamorfišu (slika 4.35.). Izlivanje dacito-andezita veoma je značajno sa aspekta definisanja geneze podzemnih voda, obzirom da se duž severozapadnog, zapadnog i jugozapadnog oboda masiva javljaju vode povišene temperature, a čija se temperatura upravo dovodi u vezu sa vulkanitima iz ovog perioda. Stene koje se javljaju u okviru ovih vulkanita su andeziti, daciti, dacito-andeziti i dactoidi, pri čemu najveće rasprostranjenje imaju daciti, koji postupno prelaze u andezite.

⁴ Z. Stevanović: „Hidrogeološke karakteristike karsta Kučajsko-beljaničkog masiva sa aspekta mogućnosti korišćenja izdanskih voda za vodosnabdevanje“, str. 46



Slika 4.35. Proboji dacita u blizini sela Milanovac

Intenzivna vulkanska aktivnost odvijala se u periodu od kraja gornje krede do miocena u više faza, na šta ukazuje i pojava vulkanita u paleoreljefu ispod miocenske serije senjsko-resavskih ugljonosnih basena, a delom i kod Krepoljina i Siga. Takođe su vulkaniti ove starosti konstatovani u vidu proboja kristalastog kompleksa i sedimenata urgonske facije i u okviru samog masiva Beljanice (Stevanović, 1981).

Autori OGK Žagubica (1970) navode da gornju vremensku granicu ovog magmatizma nije moguće jasno utvrditi, obzirom da se dacitsko-andezitske stene u južnim delovima masiva nalaze u okviru miocenskih sedimenata, dok se na drugim lokalitetima, kod Krepoljina i Siga javljaju u vidu proboja zone miocenskog kraljuštanja i navlačenja.

Na osnovu mineralnog sastava andezita razlikuju se biotit-hornblenda-andeziti, biotit-hornblenda-andeziti sa augitom, hornblenda-andeziti i andezitbazalti, pri čemu se sastoje od plagioklasa, hornblende, biotita i ređe augita. Sastav dacita i dacitoida predstavljen je kvarcom, biotitom, hornblendom i zonarnim plagioklasom, ređe se javlja i augit, koji se nalazi u dacitoidnim stenama. Pored njih, kao akcesorni sastojci zastupljeni su apatit i cirkon, a sekundarni je karbonat (Antonijević *et al*, 1970).

Pored dacita i andezita, u okviru paleogena na istražnom prostoru su zastupljene i tvorevine oligocena (O_{l3}), čije je rasprostranjenje utvrđeno u okviru bogovinsko-sumrakovačkog ugljenog basena. Ove tvorevine su sedimenti slatkovodnog gornjeg

oligocena, predstavljeni glinama, laporcima, laporovitim pešćarima, ugljem i bigrovitim krečnjakom. Ukupna debljina oligocenskih sedimenata iznosi od 50 do 200 metara.

NEOGEN

Neogene tvorevine na istražnom području zahvataju veliko rasprostranjenje, a pripadaju uglavnom miocenu. Razviće ovih tvorevina je jezersko, limničko, fluvijalno-limničko i kontinentalno. U oblasti Kučajsko-beljaničkog masiva neogene tvorevine su konstatovane u okviru žagubičke i krivovirske kotline, senjsko-resavskih i bogovinskih basena (Antonijević *et al.*, 1970; Stevanović, 1981).

(M_{1,2}) Sedimenti donjeg i srednjeg miocena konstatovani su na malom području na kontaktu beljničkog autohtona i crvenog permskog pešćara, a izgrađeni su od bazalnih konglomerata, pešćara, glina, peskovitih glina, uglja, laporaca i laporovitih krečnjaka. Debljina iznosi 200 do 250 metara.

(M₃) Gornji miocen zastupljen je u zapadnom delu Kučaja, a predstavljen je šljunkovima, brečama, pešćarima, peskovima i glinama.

KVARTAR

Kvartarne naslage nisu rasprostranjene u velikoj meri, a predstavljene su aluvijalnim nanosima, deluvijalnim i proluvijalnim naslagama, bigrovima, siparima i pećinskim sedimentima.

(al) Aluvijalne naslage su predstavljene šljunkovima, peskovima i glinama, koji se međusobno smenjuju. Naslage aluvijona su konstatovane u dolinama većih rečnih tokova, kao što su Mlava, Krupaja, Resava, Resavica, Crnica, Crni Timok.

(d), (pr) i (s) Deluvijalne i proluvijalne naslage, kao i sipari, imaju veliko rasprostranjenje u okviru masiva. Deluvijalne naslage (slika 4.36.) su znatno prisutnije od proluvijalnih. Nanosi deluvijuma i proluvijuma se javljaju u uvalama u zoni ponornica, a izgrađeni su

od raspadnutog materijala kristalastih škriljaca, paleozojskih sedimenata, pešćara. Sipari su rasprostranjeni uz strme odseke Kučaja i Beljanice, a izgrađeni su isključivo od krečnjačke drobine.



Slika 4.36. Deluvijalne naslage u uvali Rečke

(i) Izvorski bigrovi se nalaze u zoni isticanja karstnih izvora i vrela. Manje naslage se nalaze gotovo oko svakog gravitacionog vrela, a veće se nalaze oko Velikog vrela, Malog vrela, vrela Buk (slika 4.37.), vrela Bigar i kod Krupaje.



Slika 4.37. Bigrene naslage vrela Buk na Beljanici

(t) Rečne terase svoje rasprostranjenje imaju u dolinama većih tokova, pa je tako na Beljanici konstatovana rečna terasa u dolini Mlave, koja se nalazi na 25 metara relativne visine. Tok Resave se takođe odlikuje nizom rečnih terasa, a velika terasa je konstatovana i na desnoj obali reke Crnice, na kojoj je izgrađena fabrika cementa u Popovcu.

4.5.2. Tektonika terena

Kučajsko-beljanički masiv deo je Homoljsko-kučajsko-beljaničkog antiklinorijuma, po većini autora i autohtona, koji predstavlja jednu od najvećih geotektonskih jedinica u istočnoj Srbiji. Dva najveća strukturna sprata ovog autohtona deli Žagubička kotlina na dva dela, Homoljsku antiklinalu i Kučajsko-beljaničku periklinalu (Antonijević *et al*, 1970).

Masiv je oivičen regionalnim rasedima: na severu homoljskim, na severozapadu ridanjsko-krepoljinskim, na istočnoj strani zlotskom dislokacijom, dok južnu granicu čini lukovski rased. Generalno, na istražnom području se izdvajaju tri tektonske jedinice, Kučajsko-beljanički antiklinorijum, navlaka crvenih permskih peščara na zapadu, i senonski tektonski rov na istoku masiva. Na jugu, masiv se periklinalno završava u dolini Crnog Timoka.

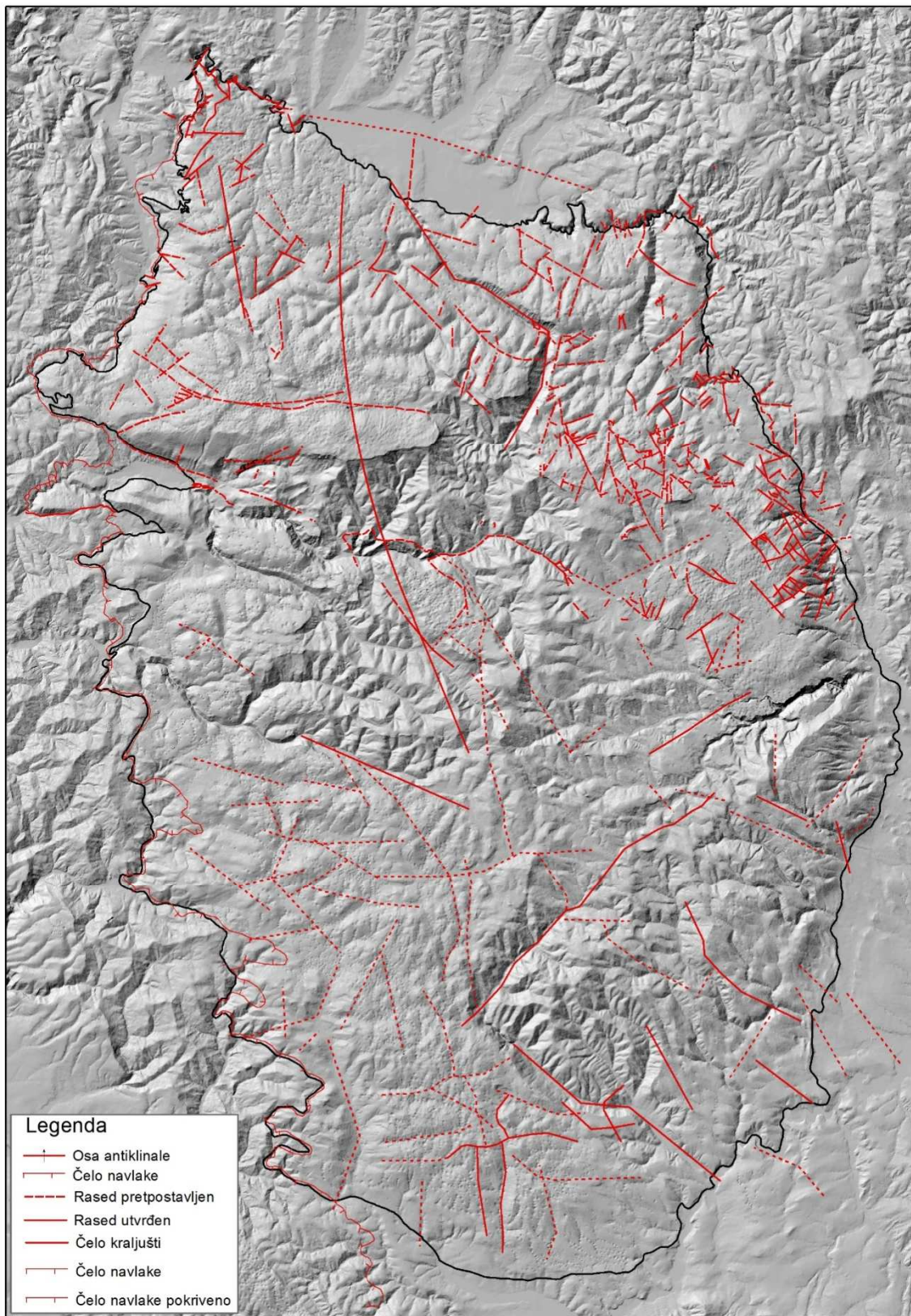
U okviru antiklinorijuma masiva izdvajaju se dva strukturna sprata. Niži sprat čine stene srednjeg paleozoika, predstavljene niskokristalastim škriljcima i peščarima, dok je viši sprat predstavljen sedimentima mezozojske starosti. Strukturni oblici drugog reda koji su konstatovani u okviru Kučajsko-beljaničkog antiklinorijuma su Beljanička i Kučajska antiklinala, sinklinala Strnjka, kao i regionalni rasedi: mlavski, beljanički, resavski, lukovski, zlotski, a pored njih i niz manjih lokalnih rasednih i pukotinskih sistema (Stevanović, 1981).

Navlaka crvenog permskog peščara predstavlja veoma značajnu tektonsku jedinicu. Navučena je preko mezozojskih krečnjaka po zapadnom obodu masiva. Veoma intenzivno navlačenje je vršeno iz pravca zapada (od doline Velike Morave) prema istoku. Kontakt navlake sa krečnjacima mezozojske starosti od velikog je značaja za hidrogeološka istraživanja, obzirom da se na kontaktu ovih formacija javljaju jaki karstni izvori, kao i pojave toplih karstnih izdanskih voda.

Na istražnom području, pored rasednih struktura koje ograničavaju istražno područje i čine ga jedinstvenim planinskim vencem, ističu se i poprečne (transverzalne) rasedne

strukture većih dimenzija, kao što su beljanički rased i resavski rased. Beljanički se nalazi severno od vrha Beljanice. Pružanje ovog raseda praćeno je duž 15 km. Rased preseca beljanički masiv, gde je južni blok skokom spušten oko 400 metara po subvertikalnom krilu (Antonijević *et al*, 1970).

Resavski rased je najveći na istražnom prostoru i dužine je preko 20 km, a pruža se od gabrova Omaniša prema zapadu do Strmostena. Južno krilo, kao i kod beljaničkog raseda, spušteno je skokom od 800 metara. Takođe, pored velikih rasednih struktura, na terenu se uočava i veliki broj manjih rasednih struktura, koje su uticale na formiranje privilegovanih pravaca podzemnih voda. Na slici 4.38. data je tektonska karta Kučajsko-beljaničkog masiva (prema OGK, listovi Žagubica i Boljevac).



Slika 4.38. Tektonska karta Kučajsko-beljaničkog masiva (prema OGK, listovi Žagubica i Boljevac)

4.6. Hidrogeološke karakteristike terena

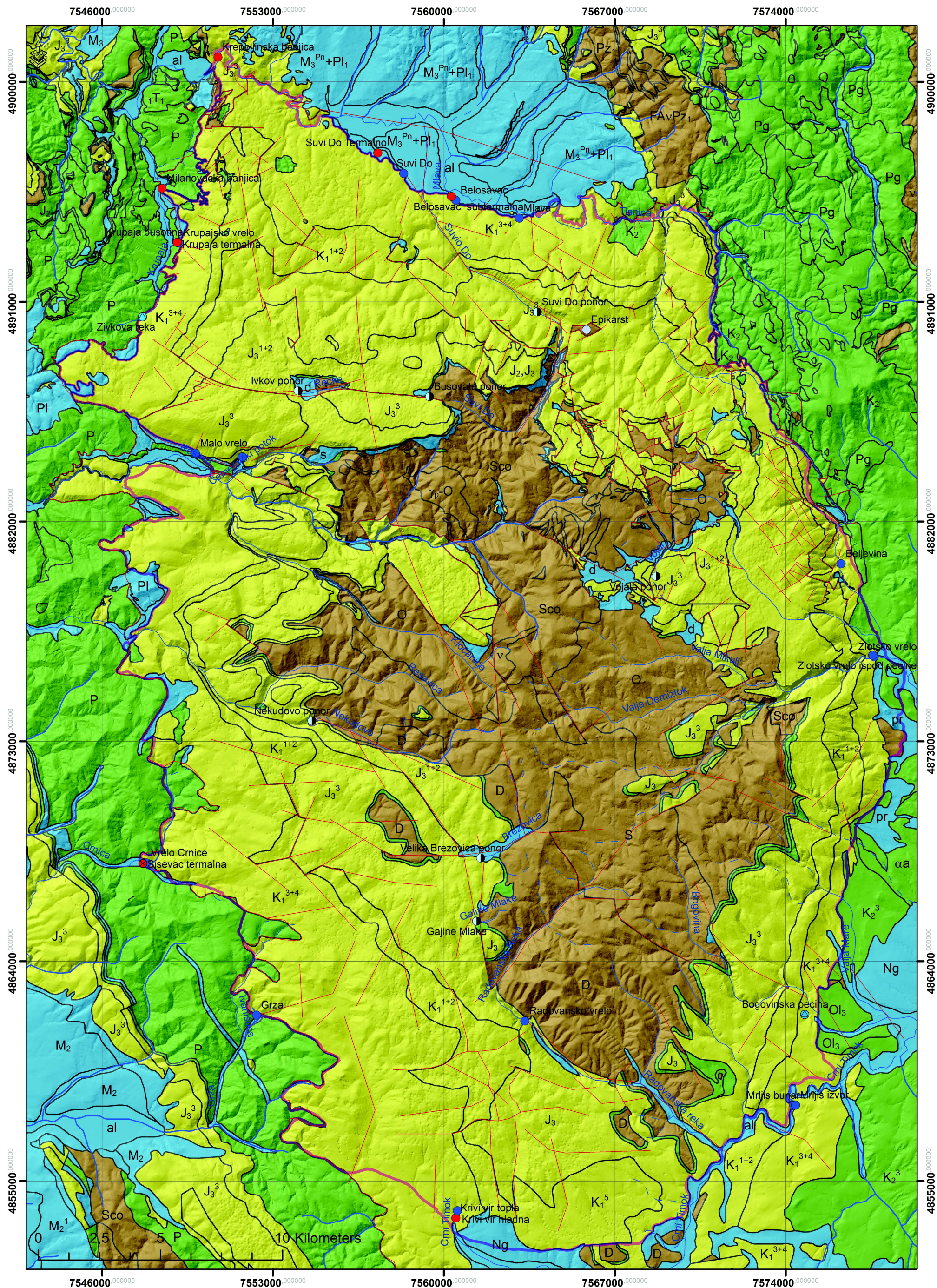
Osnovne hidrogeološke karakteristike terena Kučajsko-beljaničkog masiva relativno su dobro poznate na osnovu dosadašnjih geoloških, hidrogeoloških i geofizičkih ispitivanja. Takođe, izrada većeg broja istražnih bušotina i bunara, kao i karotažna merenja, doprinela su još boljem poznavanju hidrogeoloških karakteristika.

Kako je teren pretežno izgrađen od karbonatnih tvorevina, unutar kojih su zastupljene značajne rezerve karstnih podzemnih voda to će se ovom tipu izdani posebno posvetiti pažnja u okviru ovog poglavlja.

Pored karstne izdani formirane u okviru karbonatnih naslaga, na istražnom prostoru su zastupljeni i drugi tipovi izdani formirani u okviru takozvanog nekarbonatnog kompleksa, zbijeni i pukotinski tip izdani, kao i uslovno bezvodni tereni. Nekarbonatne tvorevine su zastupljene u centralnim delovima masiva, kao i u obodnim basenskim strukturama, a obzirom na svoju slabu vodopropusnost, služe kao potpuna ili delimična barijera cirkulaciji podzemnih voda, što za posledicu ima pojavu jakih karstnih vrela po obodu masiva odnosno na kontaktu karbonatnih i nekarbonatnih tvorevina. Međutim, filtraciona svojstva određenih litostratigrafskih jedinica koje ne pripadaju karstnoj izdani takođe mogu biti povoljnija, pa se unutar tih formacija mogu formirati i određene rezerve izdanskih voda, što se primarno odnosi na zbijeni tip izdani u okviru neogenih i kvartarnih naslaga, a manje na pukotinski tip u okviru permskih peščara, zelenih škriljaca i devonskih tvorevina. Hidrogeološka karta Kučajsko-beljaničkog masiva, prikazana je na slici 4.39.

Zbijeni tip izdani

Ovaj tip izdani formiran je u okviru stena međuzrnske poroznosti veće i manje izdašnosti. Vode formirane u kvartarnim sedimentima veće su izdašnosti od voda formiranih u okviru neogenih tvorevina. Zbijene izdani kvartarnih tvorevina uglavnom su formirane u aluvijalnim naslagama većih rečnih tokova (Mlava, Krupaja, Resava, Resavica, Crnica, Crni Timok, Grza, Radovanska reka i td.). Debljine aluvijona variraju od svega jednog



Legenda

- | | | | |
|--------------------------------|--------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Karstni tip izdani | Stalni tok | Karstni izvor - vrelo | Izvor sa isticanjem iz pećine |
| Pukotinski tip izdani | Povremen tok | Karstni izvor iz epikarst zone | Izvor sa termalnom vodom |
| Zbijeni tip izdani | | Ponor | Bušotina-bunar sa termalnom vodom |
| Uslovno bezvodni delovi terena | | | |

Na hidrogeološkoj karti su prikazane pojave i objekti osmatrani za potrebe izrade disertacije. Legenda strukturalnih i litoških oznaka data je uz geološku kartu Kučaško-beljaničkog masiva.

Slika 4-39. Hidrogeološka karta Kučaško-beljaničkog masiva R 1 : 150 000

metra do maksimalnih 8 metara, a širina aluvijona može iznositi i do 1 km (Stevanović, 1991). Takođe, manje izdani se nalaze i u okviru deluvijalno-proluvijalnih naslaga, sipara i naslagabigra, ali su rezerve znatno manje od onih formiranih u okviru rečnih aluvijona.

Prihranjivanje zbijene izdani u okviru kvartarnih tvorevina se vrši infiltracijom vode iz rečnih tokova, infiltracijom voda atmosferskih taloga, kao i podzemnim isticanjem iz karstne izdani, dok se dreniranje vrši direktnim isticanjem u periodu niskih voda, isticanjem na izvorima male izdašnosti. Takođe, dreniranje se jednim delom vrši i zahvatanjem voda bunarima lokalnog stanovništva. Koeficijenti filtracije se kreću u intervalu od 10^{-3} - 10^{-4} cm/s (Stevanović, 1981).

Ipak, najveće rasprostranjenje ovog tipa izdani se javlja u sedimentima neogene starosti. Neogene tvorevine karakterišu se smenom vodonosnih i vodonepropusnih slojeva, a imaju lošije filtracione karakteristike u odnosu na zbijeni tip izdani u okviru kvartarnih naslaga. Naizmenično smenjivanje konglomerata, peščara, šljunkova i peskova sa laporcima i glinama, stvara mogućnost formiranja zbijene sa slobodnim nivoom ili nivoom pod pritiskom, što je potvrđeno izradom istražnih bušotina u Bogovinskom basenu (Stevanović, 2010).

Najveće rasprostranjenje zbijenog tipa izdani unutar neogenih tvorevina formirano je u Žagubičkom, Bogovinsko-sumrakovačkom i Krivovirskom basenu. Debljina ovih tvorevina varira od nekoliko metara, do više stotina metara u središnjim delovima basena (Žagubica). Tercijarne (oligocenske i neogene) tvorevine predstavljaju barijeru cirkulaciji karstnih podzemnih voda, pa se tako na kontaktu karstnih terena sa ovim tvorevinama, javlja veći broj karstnih vrela (Mlava, Belosvac, Suvi do, Krivi vir i drugi).

Pukotinski tip izdani

Pukotinski tip izdani formiran je u okviru crvenih permskih pešćara, aptskih i albskih pešćara, laporaca i glina (Senjsko-resavski i Bogovinski basen), gornjokrednih vulkanogeno-sedimentnih formacija i magmatita u krepoljinsko-senjskoj zoni i timočko-tektonskog rova, odnosno po zapadnom i istočnom obodu masiva. Hidrogeološka svojstva ovog tipa izdani ogledaju se kroz nejednaki stepen vodopropusnosti u vertikalnom profilu (Stevanović, 1991).

Sa povećanjem dubine smanjuje se vodopropusnost, usled čega se izdan formira u gornjim, jače ispucalim intervalima. Iako pukotinska izdan nema veliki značaj u cilju iskorišćavanja ovih voda, njen značaj se ogleda kao barijeri kretanja karstnih voda, na čijem se kontaktu javljaju i jaki karstni izvori.

Pukotinski tip izdani formiran u okviru crvenih permskih pešćara najbolja filtraciona svojstva ima u kontaktu sa urgonskim krečnjacima, na čijem direktnom kontaktu prima najveće količine voda, a osim na ovaj način, prihranjivanje izdani se vrši i infiltracijom jednog dela atmosferskog taloga, ali u znatno manjoj količini.

Pukotinska izdan u tercijarnim sedimentima Senjsko resavskih basena i Bogovinsko-sumrakovačkog basena, formirana je u okviru pešćara, laporaca, krečnjaka i glina sa slojevima mrkog uglja, gde su se intenzivnom tektonskom aktivnošću formirali rasedi i pukotine, a što je stvorilo povoljne uslove za cirkulaciju podzemnih voda (Stevanović, 1981, Milanović S, 2010).

Povoljni uslovi za cirkulaciju voda, kao posledica intenzivne tektonske aktivnosti, stvoreni su i u okviru pukotinske izdani formirane u gornjekrednim sedimentima, rasprostranjenih na istočnom obodu masiva, razvijene u laporcima, pešćarima, krečnjacima, kao i u produktima vulkanizma. Dreniranje pukotinskog tipa izdani uglavnom se vrši preko izvora male do srednje izdašnosti, (od 0.1 l/s do 1 l/s), koji nisu bili od značaja za izradu ove disertacije.

„Pukotinski tip izdani vezan je i za dacite krepoljinsko-senjske zone i tzv. laramijski plutonit Valja Strža. Izdani formiranja u ovim tvorevinama je takođe lokalnog karaktera, vezana za površinsku koru raspadanja i pripovršinsku mrežu pukotina. Prihranjivanje izdani vrši se uglavnom na račun infiltracije voda atmosferskih taloga, mada ne treba isključiti mogućnosti podzemnog isticanja iz dela karstne izdani u zonama direktnog kontakta. U tom smislu, daleko značajniji su daciti u zoni Krepoljina koji su u pojedinim delovima terena isprobijali i krečnjački kompleks sedimenata. Za pojave dacita verovatno se vezuju i pojave termalnih voda u Suvom dolu i Krupaji.“⁵

Upravo su prethodno navedene pojave termalnih voda predmet izučavanja u okviru disertacije. Obzirom da se radi o dubokoj cirkulaciji, gde bi se zbog usporenog kretanja voda kroz sistem malih pukotina i kanala, moglo zaključiti da se radi o pukotinskoj poroznosti, po svojim fizičko-hemijskim karakteristikama ove vode pripadaju karstnom (CaCO₃) tipu, pa će se o njima detaljnije govoriti u narednom poglavlju.

Deo Kučajsko-beljaničkog masiva koji je izgrađen od niskokristalastih škriljaca se, takođe, može svrstati u pukotinski tip izdani iako se radi o izdani sa veoma malom izdašnošću. Ipak, u okviru ove izdani javlja se veliki broj izvora manje izdašnosti, koji tokom cele godine održavaju hidrografsku mrežu u uvalama Busovate, Rečke, V. Brezovice. Na Kučajsko-beljaničkom masivu kristalasti škriljci su zastupljeni u jezgrima antiklinalnih struktura i na hipsometrijski višim delovima planinskih masiva.

⁵ Z. Stevanović: Hidrogeološke karakteristike karsta Kučajsko-beljaničkog masiva sa aspekta mogućnosti korišćenja izdanih voda za vodosnabdevanje“, str. 108

Pored gore pomenutih litoloških jedinica i tvorevine ordovicijuma i silura bi po nekim svojim parametrima mogle da se svrstaju u pukotinsku izdan slabe izdašnosti. Premda su to jedinice izgrađene od peščara, kvarcita, konglomeratičnih peščara, argilofilita, metamorfisanih glinaca i argilošista, ovi tereni obiluju izvorima koji retko prelaze 0,1 l/s.

Uslovno bezvodni delovi terena

Ukoliko bi se posmatrale međusobne hidrogeološke karakteristike karbonatnih naslaga i tvorevina zastupljenih u centralnom delu masiva, odnosno kompleksa kristalastih škriljaca, kao i stena zastupljenih u okviru ordovicijuma i silura, moglo bi se reći da se radi o uslovno bezvodnim delovima terena. Upravo „uslovno“ je ono što je okarakterisalo ovaj prostor kao deo koji pripada pukotinskoj izdani, iako u slučaju potrebe zahvatanja značajnijih količina voda, ove terene bi trebalo okarakterisati kao bezvodne terene. U vodonepropusne stene spadaju sericitski škriljci, keratofiri i metapeščari prekambrijuma, gabroidne stene i plagiograniti, filiti, argilošisti i metapeščari itd. Kao što navodi i Stevanović, (1981) u okviru ovih stena se usled javljanja ispucalosti određenih litoloških članova mogu javiti manje rezerve podzemnih voda, od čega najpovoljnija svojstva za formiranje izdani imaju stene devonske starosti.

4.6.1. Karstni tip izdani

U okviru Kučajsko-beljaničkog masiva, karstni tip izdani dominira i to u krečnjacima i dolomitičnim krečnjacima mezozojske starosti (gornja jura i donja kreda). Karbonatne stene se odlikuju litološkom i strukturalnom nehomogenošću i kao takve mogu se smatrati jedinstvenom hidrogeološkom izdani.

Stevanović (1981) navodi da se karstna izdan, izdvojena u okviru debelog kompleksa karbonatnih stena jurske i kredne starosti, u vertikalnom profilu javlja u sledećim litostratigrafskim članovima:

- krečnjacima sa rožnacima oksford-kimeridža;
- masivnom i bankovitim krečnjacima i dolomitima titona;

- bankovitim i slojevitim krečnjacima valend-otriva;
- masivnim i bankovitim krečnjacima i dolomitima urgonske facije;
- i glaukonitskim krečnjacima i peščarima alba.

Debljina karbonatnog kompleksa se kreće od nekoliko desetina metara na kontaktu sa paleozojskim stenama, do 1000 metara u obodnim delovima masiva, dok ukupna debljina karbonata, prema OGK iznosi i 1400 m. Karstni tip izdani formiran u okviru ovih tvorevina zauzima površinu od oko 1000 km².

Baza karstifikacije predstavlja prelaznu zonu koja se aproksimira površinom ispod koje se ne očekuje izražena karstifikacija (Milanović P, 1979). Utvrđivanje baze karstifikacije, kao praktično nepropusne podine karstnoj izdani, oduvek je predstavljao problem za istraživače. Razlog je što se ne pruža uvek na istim dubinama, pa je bez skupih istražnih radova i bušenja teško utvrditi. Tako ovaj element karstne izdani često ostaje samo grublje procenjen, a ne i definisan.

Položaj, odnosno dubina baze karstifikacije Kučajsko-beljaničkog masiva, razmatra se i u okviru ove disertacije, obzirom da je od velikog značaja za definisanje dubine cirkulacije, odnosno zaleganja karstnih kanala kao i formiranje subtermalnih i termalnih voda.

Stevanović (1981) navodi da usled intenzivne ispucalosti Kučajsko-beljaničkog masiva i velikog broja podzemnih morfoloških oblika sa dubokim zaleganjem horizonata sa izdanskim tokovima, dubina baze karstifikacije iznosi preko 600 m u blizini obodnih delova masiva, što bi predstavljalo prosečnu debljinu korisne zapremine izdani. Novijim istraživanjima i bušenjima za Regionalni vodoprivredni sistem „Bogovina“ potvrđeno je da je dubina do koje vode aktivno cirkulišu zaista velika i iznosi i do 500 metara (Stevanović, 2010).

Dubina do baze karstifikacije različita je u delovima masiva na kojima se dreniraju vode duboke sifonalne cirkulacije u odnosu na delove sa gravitacionom cirkulacijom voda, odnosno dubina do baze karstifikacije je različita za centralne i obodne delove karstne

izdani, pa tako na mestu Velikog i Malog vrela ne prelazi 50 metara dubine (Milanović S, 2010).

Uslovi prihranjivanja karstne izdani

Prirodno prihranjivanje karstne izdani, vrši se infiltracijom površinskih voda ili atmosferskih padavina kroz ponore, vrtače, pukotine većih i manjih dimenzija, ili podzemnim prihranjivanjem iz neke druge izdani. Za određivanje zone prihranjivanja, koriste se mnoge hidrogeološke metode među kojima su neke od najprimenjenijih stohastičke metode, modeliranje, hidrohemijske, traserske, izotopske (Milanović P, 1979, Goldscheider, 2015).

Prihranjivanje karstne izdani Kučajsko-beljaničkog masiva se vrši, najvećim delom, infiltracijom atmosferskog taloga, kao i na račun infiltracije voda površinskih tokova. Infiltracija padavina je najveća na ogolićenim delovima terena, gde se, prema Stevanoviću (1981), vrši infiltracija i od 100% atmosferskog taloga (teorijski), naročito u depresijama koje nisu zapunjene sekundarnim materijalom, dok na pošumljenim delovima terena procenat infiltracije iznosi 70% i manje, jer se najveći deo voda gubi transpiracijom biljnog pokrivača.

Takođe, topljenje snega može biti jedan od značajnijih vidova popunjavanja karstne izdani, u uslovima kada se topljenje snega odvija postepeno, pa nema značajnog površinskog oticanja, već se voda polako proceđuje u podzemlje.

Najveće prihranjivanje podzemnih voda vrši se, kao što je pomenuto, u periodu velikih voda, međutim, kada su u pitanju kišni ekstremi, kao što je to bilo u proleće 2014. godine, veliki deo atmosferskog taloga i rečnih tokova otekne sa strmih padina masiva, jer površina prihranjivanja (koncentrične i difuzne ponorske zone) ne uspeva da primi velike količine vode, koje zbog strmog nagiba padina oboda masiva cirkulišu prema nižim predelima.

Tokovi koji su formirani na vodonepropusnim stenama centralnog dela masiva cirkulišu ka hipsometrijski nižim delovima masiva, do kontakta sa karbonatnim tvorevinama, gde se kroz koncentrične ponore infiltriraju u podzemlje. Pored velikih koncentričnih ponorskih zona, koje su uglavnom izražene kao veći morfološki oblici, na istražnom prostoru se nalazi i čitav niz manjih ponorskih zona i izduha koje se javljaju u koritima rečnih tokova.

Ponori Beljaničkog masiva koji su od većeg značaja za prihranjivanje podzemnih voda, svakako, su ponor Rečke, Busovate i Suvog dola. Naime, ponori Rečke i Busovate su locirani u blizini samog vrha Beljanice, na kontaktu paleozojskih škriljaca sa krečnjacima i kod oba ponora se nalaze po dve ponorske zone (Rečka 1 i 2 i Busovata 1 i 2). Ponor Suvog dola se nalazi bliže severnom obodu masiva, i o ovim ponorima će biti više reči u poglavlju o monitoring punktovima.

Ponori na Kučajskom masivu

Ponori Velike Brezovice i Gajine Mlake nalaze se na višim nadmorskim visinama, gde na kontaktu krečnjaka i vodonepropusnih stena poniru površinski tokovi koji teku kroz deluvijalno-proluvijalne naslage, dok se ponor Nekudova nalazi na nešto nižoj nadmorskoj visini na kontaktu paleozojskih škriljaca i krečnjaka. Ponor Vojal je značajan sa aspekta prihranjivanja pojava na istočnoj strani masiva, a njegove karakteristike će zajedno sa karakteristikama ponora Velike Brezovice, Nekudova i Gajinih Mlaka, biti opisane u poglavlju 6.

Ponor Radovanske reke predstavlja prirodni tunel, zbog čega se razlikuje od prethodno navedenih ponora. Voda ove reke ulazi u ponor – pećinu Žljeburu, dužine oko 230 metara, i ponovo izbija kao tok Radovanske reke (Stevanović, 1981).

Uslovi cirkulacije i pravci kretanja podzemnih voda

Glavni pravac kretanja podzemnih voda je od centralnih delova masiva prema obodnim delovima, dok su lokalni pravci duž raseda, nagiba slojeva. Ovi pravci uslovljeni su

geološkom građom terena, hidrogeološkim uslovima, tektonikom, stepenom razvoja karstifikacije i speleogenezom karstnih provodnika.

Takođe, na pravac kretanja podzemnih voda uticaj ima i položaj vodonepropusne barijere, na čijem se kontaktu, uglavnom, završava podzemna cirkulacija u vidu izvora veće ili manje izdašnosti. Pravac kretanja podzemnih voda i pružanje podzemnih kanala utvrđivan je na više lokacija opitima bojenja, kojima se, relativno pouzdano, dolazi do podataka cirkulacije vode od poniranja do njenog ponovnog pojavljivanja na površini terena.

Stevanović (1981) izdvaja četiri faze koje su uslovile kretanje podzemnih voda:

I faza – uslovia je kasnije pravce kretanja izdanskih voda, a vezana je za stvaranje antiklinorijuma izdizanjem terena po završetku sedimentacionog ciklusa u donjoj kredi. Intenzivna tektonska aktivnost i postojanje paleozojskih tvorevina u centralnim delovima masiva uslovia su položaj paleohidrografske mreže i raspored rečnih tokova.

II faza – formirana rečna mreža uglavnom zadržava svoj položaj, ali je izraženo usecanje korita reka u krečnjačku masu. Povoljni klimatski uslovi (jake padavine i visoka temperatura) dovode do jake karstifikacije krečnjačkih stena.

III faza – u ovoj fazi razviće karstnog procesa dominira nad hidrografskim, što uslovljava spuštanje nivoa izdani, uz karakteristično zadržavanje prvobitnih pravaca kretanja podzemnih voda.

IV faza – je poslednja faza formiranja pravaca kretanja voda na Kučajsko-beljaničkom masivu u kojoj se vrši preraspodela podzemnih voda u okviru određenih slivova, uz pojavu podzemne piraterije, što je posledica gravitiranja podzemnih voda prema regionalnim erozionim bazisima, uz nestajanje manjih slivova zbog napuštanja lokalnih bazisa.

Najveći broj opita bojenja u okviru istočne Srbije, izvršen je na Kučajsko-beljaničkom masivu u periodu od 1953-1990 godine, pri čemu su uspostavljene veze sledećih ponora

i izvora: Suvi Do - Mlava, Velika Tisnica – Mlava, Crna reka – Mlava, Žagubičke rečke – vrelo Buk, Ivkov ponor – Malo i Veliko vrelo, Busovata – Veliko vrelo, Nekudovo – vrelo Crnice, Velika Brezovica – Radovansko vrelo i vrelo Grze, Mala reka – Fundonj, Bogovniska pećina – Fundonj i Mrljiš, Dubašnica – Gaura Mika i Gaura Mare, Demizlok i Mikulj – Zlotsko vrelo, ponor Vojal - Gaura Mika i Gaura Mare (Stevanović, 1991).

Na vrelo Mlave su 1954. godine sprovedena tri opita bojenja od strane J. Petrovića. Bojenjem Suvodolske reke u zoni poniranja utvrđena je hidraulička veza ovog ponora sa Mlavom, ali o vremenu boravka obeleživača u podzemlju nema podataka. Takođe je utvrđena veza površinskog toka Velike Tisnice sa Mlavom.

Bojenje ponora Crne reke vršeno je u dva navrata od strane R. Lazarevića 1980. godine i Mladih istraživača Srbije (Dragišić, 1989). U prvom opitu obeležavanja je u ponor, pri proticaju od 324 l/s, ubačeno 5 kg obeleživača, koja se na vrelo Mlave pojavila nakon 117.5 časova, pri čemu je prošla rastojanje od 8 km, što rezultira brzinom kretanja od 68 m/s. Drugi opit izveden je pri doticaju reke u ponor od 120 l/s, kada je ubačeno svega 1 kg obeleživača. Boja se pojavila nakon 172 sata, što ukazuje na brzinu kretanja od 46 m/h.

Veza ponora Žagubičke Rečke sa vrelom Buk utvrđena je 1954. godine (J. Petrović). Nakon ubačenih 1.5 kg obeleživača u ponor pri brzini proticaja ponornice od 0.05 m³/s, boja se pojavila na vrelo koje se nalazi 2 km nizvodno istog dana.

Obeležavanje ponora Rečke izvršeno je od strane J. Petrovića iste godine u aprilu mesecu, kada je u ponor ubačeno 5 kg obeleživača, pri proticaju Rečke od oko 30 l/s. Iako su osmatranja pojave boje vršena na vrelo Mlave, Krupaje, Velikog i Malog vrela, boja se pojavila nakon 110 sati samo na Malom vrelo. Rastojanje od ponora do izvora je 4.8 km, sa visinskom razlikom od 638 m, što govori da je brzina cirkulacije 43 m/h.

Istraživanja veze ponora Busovate sa vrelima Mlave, Krupaje, Velikog i Malog vrela, vršeno je 1974. godine od stručnjaka "Geozavoda" iz Beograda, kada je u ponor ubačeno 20 kg boje pri proticaju od 20 l/s. Boja se nakon pet dana pojavila samo na Velikom vrelo. Rastojanje od 7.8 km, pri visinskoj razlici od 585 m, traser je prešao za 133 časova,

odnosno srednjom brzinom od 56.4 m/h. Ovim opitom obeležavanja je konstatovano da tokovi Busovate ne pripadaju topografskom slivu Mlave, već Resave.

Različiti rezultati opita obeležavanja dobijeni su bojenjem ponora Bare i Izgore u Divljakovačkom polju. Rezultati J. Petrovića ukazuju da se boja pojavila na Jelovačkom potoku nakon 4 sata, pri čemu je prešla rastojanje od 1.8 km, pri visinskoj razlici od 30 m. Drugi opit obeležavanja sproveden je 1975. godine, kada su stručnjaci „Rembasa“ utvrdili vezu ovih ponora sa povremenim vrelom kod odmarališta Lisine u kanjonu Resave, neposredno pre ušća Kločanice.

Bojenje ponora Nekudova i Velike Brezovice izveli su stručnjaci „Geozavoda“ 1970. godine. Pri obeležavanju Nekudova, utvrđena je veza ovog ponora sa vrelom Crnice. Rastojanje ove dve pojave je 8.5 km, a visinska razlika iznosi 360 m, pa se izvodi zaključak da fiktivna brzina kretanja iznosi 0.013 m/s. Stevanović (1981) navodi da je ovim eksperimentom utvrđena podzemna piraterija vrela Crnice u odnosu na topografsku pripadnost Nekudovske reke slivu reke Resave, a što predstavlja tipičan primer gravitiranja izdanskih voda ka regionalnim erozionim bazisima.

Pri bojenju ponora Velike Brezovice utvrđena je veza sa Radovanskim vrelom. Nakon 56 sati, obeleživač se pojavio na vrelu, a isticanje boje je trajalo 2.5 dana. Rastojanje od 7 km, pri visinskoj razlici od 422 m, podzemni tok je prešao brzinom od 0.034 m/s. Iako su osmatrana i vrela Crnice i Crnog Timoka, boja nije registrovana na njima.

Bojenje ponora Velike Brezovice izvršio je u dva navrata i V. Tomić. Prvim opitom 1982. godine, obeleživač je konstatovan na Radovanskom vrelu, sa brzinom cirkulacije vode od 0.025 m/s, kao i na vrelu Grze, sa registrovanom brzinom cirkulacije od 0.04 m/s. Drugi opit obeležavanja sproveden je 1985. godine, pri čemu je osmatrano vrelo Grze i konstatovana brzina cirkulacije od 0.045 m/s.

Stručnjaci „Geozavoda“ vršili su opit obeležavanja 1957. godine na ponorskoj zoni Male reke, pri proticaju od 20 l/s, pri čemu je utvrđena veza ovog ponora sa vrelom Fundonj, nakon 36 sati. Brzina kretanja obeleživača kroz podzemlje iznosila je 0.038 m/s. Takođe,

izvršeno je i bojenje ponora u Bogovinskoj pećini, gde je pri proticaju od 20 l/s na ponoru ubačena količina od 4 kg obeleživača. Boja je registrovana u rudarskim radovima nakon 36 sati. Međutim, opiti obeležavanja iz 1975. godine (Filipović *et al*, 1976), dali su drugačije rezultate. Nakon nepunih 24 h, obeleživač se pojavio na vrelu Fundonj, kada se pojavio i na osmatračkim punktovima u Bogovinskoj reci, dok se u rudarskim radovima pojavio nakon 43 sata, na vrelu Mrljiš nakon 8 dana od ubacivanja obeleživača u ponor. Ponovljeni opit obeležavanja sa piljevinom, pokazao je vezu samo sa vrelom Mrljiš, kada se obeleživač pojavio nakon istog vremenskog roka, kao u prvom opitu obeležavanja. Brzina cirkulacije prema vrelu Fundonj iznosi 0.036 m/s, dok prema vrelu Mrljiš iznosi 0.0045 m/s. Stevanović (1981, 1991) navodi da rezultati ovog opita ukazuju na specifični hidraulički mehanizam izdani ovog dela masiva, gde u periodu velikih voda dolazi do istovremene pojave obeleživača na oba vrela, dok se u periodu malovođa uspostavlja cirkulacija samo ka regionalnom erozionom bazu ovog dela masiva, odnosno Crnom Timoku, a što je uslovljeno vodonepropusnom barijerom orbitolinskih pešćara koji se pružaju duž masiva.

Bojenja u istočnom delu Kučaja sa ciljem definisanja veze ponora Dubašnice i Vojala sa vrelima Gaura Mika i Gaura Mare i ponora Demizloka i Mikulja sa Zlotskim vrelom izvršio je R. Lazarević u periodu 1976-1980. godine. Veza Dubašnice sa vrelima Gaura Mika i Gaura Mare utvrđena je 1976. godine kada je u ponor uviralo 20 l/s. Utvrđena je veza sa brzinom cirkulacije od 0.062 m/s sa vrelom Gaura Mare i brzinom od 0.068 m/s sa vrelom Gaura Mika. Obeležavanje ponora Vojal izvedeno je 1979. godine, a utvrđena brzina cirkulacije prema vrelu Gaura Mare je 0.1 m/s, dok prema Gaura Miki iznosi 0.08 m/s.

Obeležavanje ponora Demizlok izvršeno je sa količinom od 4.5 kg obeleživača pri proticaju od 31.5 l/s, a boja se pojavila na izvoru kod Zlotske pećine nakon 75 časova, što je rezultiralo definisanja brzine kretanja podzemnih voda od 0.022 m/s. Utvrđena brzina cirkulacije voda 1980. godine od ponora Mikulj do Zlotskog vrela iznosila je 0.027 m/s (Stevanović, 1991).

Isticanje voda iz karstne izdani

Dreniranje karstne izdani vrši se preko vrela formiranih na kontaktu karbonatnih tvorevina sa vodonepropusnom podlogom, podzemnim isticanjem i znatno manjim delom preko evaporacije i transpiracije vegetacionog pokrivača, koje nije od značaja za predmetnu temu, pa o njima neće ovde biti reči. Karstna vrela, preko kojih se vrši dreniranje karstne izdani, su raspoređena po obodu masiva, dok se manji tokovi mogu naći i unutar masiva, kao i na većim nadmorskim visinama, gde se mogu drenirati vode iz manjih pripovršinskih karbonatnih tvorevina ili iz zone epikarsta.

Podzemno isticanje karakteriše obod masiva, gde je proces karstifikacije duboko razvijen, te na kontaktu dolazi do manjeg dreniranja podzemnih voda u druge tipove izdani (neogene basene, pukotinsku izdan formiranu u okviru crvenih permskih pešćara).

Ono što ovaj masiv čini posebno interesantnim je pojava toplih voda, koje se uglavnom javljaju duž kontakta crvenih permskih pešćara i karstne izdani, odnosno u neposrednoj blizini jakih hladnih karstnih vrela. Pojava toplih voda u blizini jakih vrela ukazuje na znatno dublju cirkulaciju podzemnih voda, koje nakon duboke i spore cirkulacije duž kontakta sa vodonepropusnom barijerom izbijaju na površinu. Kako su pojave toplih voda predmet istraživanja teme doktorske disertacije, detaljni opis ovih pojava biće dat u narednom poglavlju, a na ovom mestu prikazane samo osnovne karakteristike ovih izvora.

Isticanje preko izvora i vrela

Na istražnom prostoru se nalazi veliki broj jakih karstnih izvora, od kojih su neki kaptirani i za potrebe vodosnabdevanje sela i gradova. Stevanović (1981) navodi da u oblasti masiva ima 35 karstnih izvora i vrela, čija minimalna izdašnost prelazi 10 l/s, a koja su podeljena u tri grupe:

1. karstna vrela sa minimalnom izdašnošću 100-1000 l/s (8 vrela)
2. karstna vrela sa minimalnom izdašnošću 20-100 l/s (12 vrela)

3. karstna vrela i izvori sa minimalnom izdašnošću 10-20 l/s (15 vrela)

Kako je veliki broj ovih pojava bila deo monitoring mreže za izradu doktorske disertacije, to će se u poglavlju opisa odabranih lokacija dati njihove detaljnije karakteristike.

Podzemno isticanje

Podzemno isticanje podrazumeva isticanje dela karstnih izdanskih voda u druge tipove izdani ili direktno korita površinskih tokova, kao i sifonalnu cirkulaciju prema dubljim delovima karstne izdani u podini nekarstnih terena (Stevanović, 1991). Za utvrđivanje podzemnog isticanja, neophodno je analizirati rezultate dubokih istražnih bušotina raspoređenih duž oboda, odnosno kontakta karbonatnih sa nekarbonatnim tvorevinama. Kako Kučajsko-beljanički masiv i dalje ne raspolaže dovoljnim brojem ovakvih objekata (prve su izbušene tek krajem 80-ih godina prošlog veka), nemoguće je definisati, pa čak i pouzdanije proceniti, količine voda koje podzemno ističu iz karstne izdani.

Stevanović (1981) navodi da pored nemogućnosti određivanja približnih količina voda koje isteknu iz izdani podzemnim putem, problem predstavlja i lociranje zona ovog vida isticanja. On navodi da se podzemno isticanje vrši na račun podzemnih voda koje pripadaju statičkim rezervama, kao i da mogućnost infiltracije karstnih izdanskih voda zavisi od dubine karstifikacije karbonatnih tvorevina i vodopropusnosti, odnosno stepena ispucalosti nekarbonatnih stena.

Perspektivne zone podzemnog isticanja Kučajsko-beljaničkog masiva nalaze se u okviru sledećih zona (Stevanović, 1981):

- aluvijalne naslage Crnog Timoka (potvrđeno i kasnijim hidrometrijskim merenjima, bušenjem i crpenjem bunara),
- oblast senjsko-resavskih ugljunosnih basena (potvrđeno prilivima u rudarske radove, pr. jama Lipov deo),
- izvorišne zone Živkove reke,
- zone istočno od Panjevca,

- zone jugoistočno od Sisevca,
- zone između Velike i Petrove reke,
- zone između valja Rnža i Zlota,
- zone između Male Tisnice i Valja Strža.

Sukcesivnom hidrometrijom sprovedenom 1981. godine u toku Crnog Timoka na dužini od 8 km, na ukupno 4 profila, registrovani su priraštaji i gubici vode u toku. Pa se tako između Suve reke i Faca Vajali javio gubitak vode u rečnom toku od 200 l/s, dok se između Face Vajali i Arnaute javio priraštaj vode u količini od 249 l/s (Stevanović, 1981,1991).

Za izgradnju RVS Bogovina u cilju vodosnabdevanja gradova Bora, Zaječara, Negotina i Boljevca, sprovedena su obimna istraživanja od 1990. do 2002. godine. Dobijeni rezultati su ukazali da se najveći deo karstne izdani jugoistočnog Kučaja drenira na vrelu Mrljiš, kao i jednim delom na vrelu Fundonj i delom preko Bogovinske pećine. Velikim brojem istražnih bušotina definisane su glavne zone aktivne cirkulacije podzemnih voda se nalaze na 70 do 120 metru, izuzev u zoni vrela Mrljiš (kanali se dižu prema površini). Tri bunara izvedena u okviru ovih istraživanja predstavljaju izvorište Mrljiš (IEBOG-2, IEBOG-4 i IEBOG-6) i koriste se za vodosnabdevanje, dok se IEBOG-1 koristi za vodosnabdevanje lokalnog stanovništva. U okviru ovog sistema, vode se zahvataju regulacijom izdani, odnosno voda se crpi kada je najpotrebnija, a njeno obnavljanje se vrši u periodima povodna, kada su potrebe za vodom manje (Stevanović, 2010).

Podzemno isticanje iz krečnjaka u slabopropusne ispucale pešćare, konstatovano je i izradom bušotine IB-1 u zoni Beljevinskih vrela, ukupne dubine 350 m. Naime, izlaskom iz slabopropusnih gornjokrednih pešćara, došlo je do isticanja voda iz ovog sloja pod pritiskom, što je ukazalo na infiltraciju karsnih izdanskih voda (koje se nalaze u slojevima ispod pešćara) u uslovima povećanih hidrostatičkih pritisaka u dubljim delovima izdani (Stevanović, 1991).

4.7. Hidrohemijske karakteristike izdanskih voda

Kvalitativne karakteristike podzemnih voda karstne izdani Kučajsko-beljaničkog masiva su veoma povoljne sa aspekta fizičko-hemijskih parametara kada se radi o standardima vode za piće. Obzirom na specifičnost dinamičnosti karstne sredine, pojavu pukotina, kaverni i složenih kanala, kvalitativna svojstva podzemnih voda često variraju, što se uglavnom vezuje za periode velikih i malih voda. Promene fizičko-hemijskih parametara uočljive su u periodima obilnih padavina, ili u recesionim uslovima. Hemijski sastav podzemnih voda direktno je posledica sredine kroz koju se vode kreću, kao i brzine njihove cirkulacije kroz podzemlje. Faktori koji utiču na kvalitet podzemnih voda u karstu, pa se koriste i u modelu projektovanja zona zaštite, su (Milanović S. & Vasić, 2011):

- vreme koje voda provede u podzemlju,
- rastojanje koje podzemna voda treba pređe od mesta infiltracije do vodozahvatnog objekta,
- tipovi i lokacije koncentrisanih mesta poniranja površinskih voda (što je veoma važno u karstu).

Kako se na istražnom prostoru javljaju pojave hladnih voda i voda sa povišenom temperaturom, ovde će se dati osvrt na kriterijume, odnosno na podele voda na hladne i tople i temperature koje ih definišu. Prema klasifikaciji Leka *et al.* (1926), mineralne vode se prema temperaturi dele na vode ispod i iznad 20 °C, pri čemu se vode preko 20 °C dele na hipoterme (20-34 °C), homoterme (34-38 °C) i hiperterme (preko 38 °C).

Ovčiničkov (1974) izdvaja mineralne vode na osnovu balneološkog aspekta na hladne (ispod 20 °C), tople (20-37 °C), termalne (37-42 °C) i visokotermalne (preko 42 °C) (Krunić, 2012).

Prema Dragišiću & Polomčiću (2009) tople, odnosno subtermalne ili hipo termalne vode predstavljaju: "Termalne vode sa temperaturom većom od srednje godišnje temperature

mesta, a manjom od temperature ljudskog tela (tšr.god. $< T < 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Za umereni klimatski pojas donja temeperaturna granica iznosi $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ".⁶

Milenić *et al.* (2010) navodi da "Subgeotermalni izvori energije predstavljaju vid hidrogeotermalne energije niske entalpije, akumulirane u podzemnim vodama temperaturnog opsega do $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$, i cija je eksploatacija i korišćenje uslovljeno primenom geotermalnih toplotnih pumpi".

Žujović (1931) navodi da "Toplota vode običnih izvora koji ne potiču iz vrlo velikih dubina obično se ravna srednjoj godišnjoj toploti vazduha u mestu u kome su. Može ona biti za jedan i po stepen viša, ali retko niže. To su obični izvori, zovu se hladni; a topli se zovu oni čija toplota nadmaša srednju toplotu mesta."⁷

Stevanović *et al.* (2010) na osnovu rezultata istraživanja iskorišćavanja subgeotermalnih vodnih resursa u periodu od 2008. godine do 2010. godine izdvaja sledeću klasifikaciju hidrogeotermalne energije niske entalpije na (Vranješ, 2012):

- sub(hidro)geotermalna energija (temperatura fluida do $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$)
- (hidro)geotermalna energija u užem smislu (temperaturom fluida od $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

Na osnovu svih navedenih kriterijuma i podela voda, za područje Kučajsko-beljaničkog masiva se može usvojiti generalna podela na:

1. Hladne vode (do $12 \text{ }^{\circ}\text{C}$) i
2. Tople vode (preko $12 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

Hladnim vodama pripada najveći deo pojava Kučajsko-beljaničkog masiva. Međutim, kako se među toplim vodama mogu naći vode od 13 do $36 \text{ }^{\circ}\text{C}$, bilo je neophodno izvršiti dalju podelu. Pa se tako tople vode Kučajsko-beljaničkog masiva dele na:

⁶ V. Dragišić & D. Polomčić: „Hidrogeološki rečnik“, str. 178

⁷ J. Žujović: „Snabdevanje sela vodom. Izvori i bunari.“ str. 36

1. Subtermalne vode (od 13 – 20 °C) i
2. Termalne vode (preko 20 °C).

Subtermalnih voda, odnosno pojava i objekata u okviru masiva ima ukupno 6 (uključujući izvor i bušotinu na Mrljišu), dok termalnih pojava ima 4, uzimajući u obzir Krivovirsku banjicu, gde se temperatura vode preko 20 °C javlja samo u periodu minimuma.

Vode Kučajsko-beljaničkog masiva se dele na hladne i tople izvorske vode, čiji se hemijski sastav razlikuje u zavisnosti od same temperature. Generalno se može reći da se radi o malomineralizovanim vodama, čija mineralizacija ne prelazi 360 mg/l, koje su bez boje, mirisa i ukusa, u jonskom sastavu hidrokarbonati (HCO_3^-) izdvajaju se kao dominantni anjon (vrednosti od 100-210 mg/l), dok je u pogledu katjona najveći sadržaj kalcijuma (Ca^{2+}), sa vrednostima do 70 mg/l. Pored kalcijuma, u vodama se nalaze i određene koncentracije magnezijuma i natrijuma, čije su vrednosti veće u toplim podzemnim vodama, dok je sadržaj kalijuma uglavnom nizak. Pored sulfata, neretko se u podzemnim vodama, naročito toplim, javlja i nešto veći (u odnosu na prosečne vrednosti) sadržaj hlorida. Tvrdoća vode se kreće od 6 (Belosavac) do 17°dH (Crni Timok) (Stevanović, 1981). Sve vode se mogu svrstati u umereno tvrde, a po Alekinu, vode pripadaju hidrokarbonatnoj klasi, kalcijskoj grupi, I tipa, izuzev voda sa Milanovačke banjice, kod koje dominiraju joni natrijuma, kalijuma, hidrokarbonata i sulfata, što ukazuje na verovatno preovlađujući uticaj dacitskih stena u formiranju ovih voda.

Temperature hladnih voda se kreću od 7 do 13 °C, a variraju od vrela do vrela, kao i od perioda u godini, dok tople vode imaju temperaturu subtermalnog i termalnog karaktera, gde najniže temperature na prirodnom izvoru iznose 16.5 °C, a najviše 26 °C (Krupajsko termalno vrelo). Najviša temperatura vode dobijena je istražnom bušotinom u Sisevcu i iznosi 36 °C. Vrednost pH se u vodama kreće od 7-8.4, što je karakteristično za karstne vode. Električna provodljivost varira, pa tako vrednosti na izvorima idu od 214 na Zlotskom vrelu, i do maksimalnih 800 $\mu\text{s}/\text{cm}$, koliko je izmereno na Milanovačkoj banjici.

Rastvoreni kiseonik u vodi varira tokom godine, pa se više vrednosti uočavaju u periodu velikih voda (9-12 mg/l), dok u periodu niskih voda opada i vrednost kiseonika, što se vezuje za vreme boravka vode u podzemlju. Iz istog razloga, sve pojave toplih voda imaju znatno niže vrednosti rastvorenog kiseonika u odnosu na hladne vode (maksimalne vrednosti do 7 mg/l).

Mutnoća vode se javlja u periodu velikih voda, što se vezuje za jake kiše u prolećnim periodima i topljenje snega. Najveće mutnoće vode zabeležene su u poplavama koje su se desile u maju 2014. godine. Tada je mutnoća vode, na gotovo svim hladnim vrelima bila izrazito visoka, preko 100 NTU, a na pojedinim lokacijama uređaj nije mogao da izmeri toliko visoku koncentraciju koloidnih čestica u vodi. Zamućenje vode je kratkotrajno, a vezuje se za rapidnu cirkulaciju u periodu velikih voda, kada se aktiviraju kanali sa viših hipsometrijskih nivoa, koji su veći deo godine suvi i u okviru kojih se talože nečistoće infiltrirane sa površine terena tokom slabijih padavina u letnjem periodu (Milanović S, 2010). Slično, provaljivanje dna vrtača u slivu dovodi do pojave jakih zamućenja voda karstnih izvora. Uporedo sa pojavom zamućenja, na izvorima se javlja i povišen sadržaj bakterija. Topli izvori nemaju povišenu mutnoću (uglavnom su vrednosti ispod 1 NTU), a što se vezuje za dužinu cirkulacije voda kroz podzemlje, odnosno za procedivanje vode kroz sitne pukotine, prilikom čega se vrši prirodno filtriranje voda.

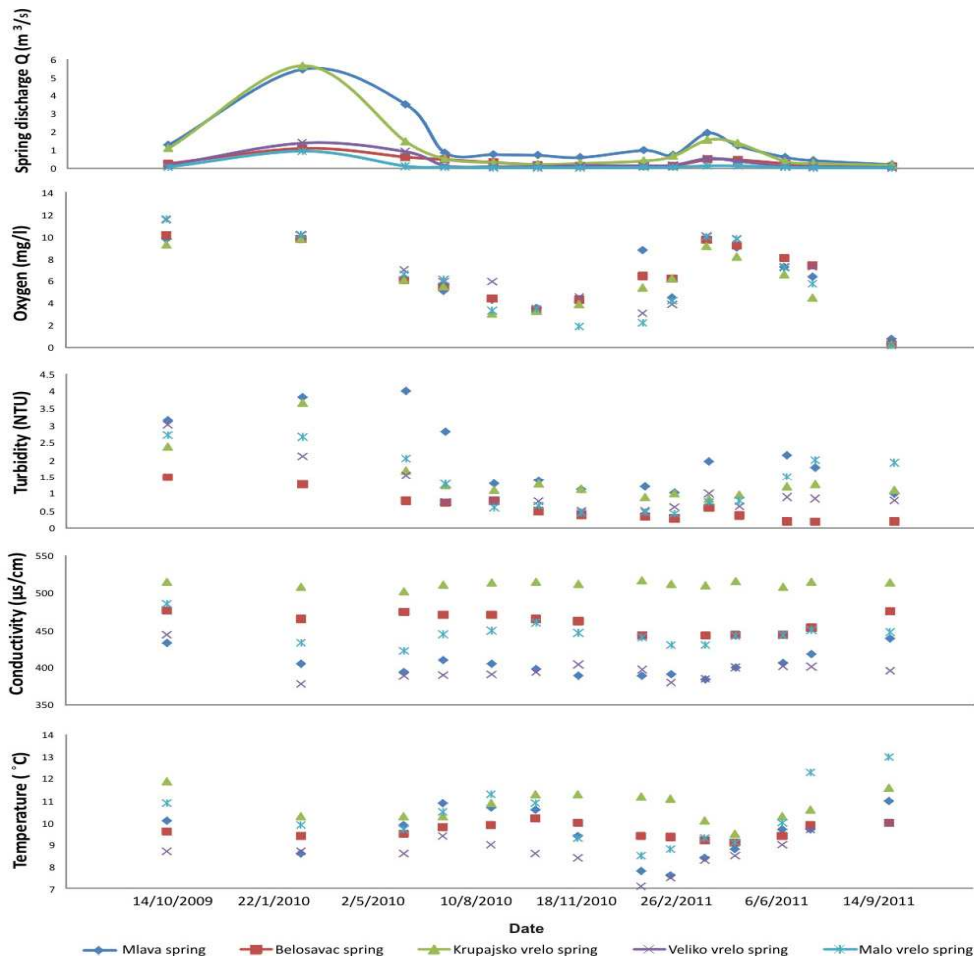
Sadržaj pojedinih mikroelemenata u vodama je u znatno nižim koncentracijama od maksimalno dozvoljenih, a prisustvo ovih elemenata ukazuje na druge stenske mase, osim krečnjaka, sa kojima je voda bila u kontaktu. Nešto više vrednosti u odnosu na hladna vrela javljaju se u toplim vodama, i to kada se radi o mikroelementima Fe, Sr, As, P i Si.

Značajnija ispitivanja kvaliteta podzemnih voda Beljaničkog masiva, vršena su od 2009. godine od strane stručnjaka Departmana za hidrogeologiju u okviru grupe projekata (Stevanović *et al*, 2012a i 2012b), kada su na mesečnom nivou direktno na terenu merene vrednost fizičko-hemijskih parametara voda, a uporednom analizom ovih parametara sa proticajem na vrelima, dobijena je slika o njihovom kolebanju u periodu velikih i malih voda (slika 4.40).

Milanović i dr. (2013) navodi da se na osnovu dijagrama jasno uočava zavisnost izdašnosti vrela i pH vrednosti. Sa povećanjem izdašnosti, na vrelu Mlave i Krupajskom vrelu povećava se i pH vrednost, dok se kod preostalih osmatranih vrela (Belosavac, Malo i Veliko vrelo) sa povećanjem izdašnosti smanjuje pH vrednost, odnosno u recesionim periodima pH vrednost raste i do 8.5. Ovakav trend pH vrednosti naročito je izražen u sušnom periodu, što ukazuje na znatan uticaj prihranjivanja sa dela centralnog Beljaničkog masiva, odnosno paleozojskih škriljaca, u odnosu na vode koje se filtriraju kroz debeli nadsloj karstnog masiva (epikarst i otvoreni karst). Sa povećanjem padavina dolazi i do opadanja pH.

Za razliku od prethodno pomenutih vrela, kod vrela Mlave i Krupajskog vrela se pri velikim vodama aktiviraju ponorske zone, koje su u drugim hidrološkim situacijama gotovo uvek suve, te se kroz njih površinski tokovi formirani na nekarstnim terenima filtriraju i u manjoj meri menjaju hemizam podzemnih voda. Takođe se jasno može uočiti i zavisnost temperature i izdašnosti gde gotovo po pravilu sa porastom izdašnosti dolazi do opadanja temperature, odnosno zbog kraćeg zadržavanja vode u podzemlju njena temperatura opada i ostaje više pod uticajem atmosferskih uslova, nego ujednačene temperature karstnog podzemlja (Milanović S. *et al*, 2013).

Takođe, na dijagramu se uočava i direktna veza mutnoće i rastvorenog kiseonika sa proticajem, gde se sa većim količinama voda javlja i povišena mutnoća i kiseonik, dok se u periodu malih voda i ove vrednosti smanjuju.



Slika 4.40. Izmene fizičko-hemijskih parametara voda Beljaničkog masiva u odnosu na proticaj (Milanović S. *et al*, 2013)

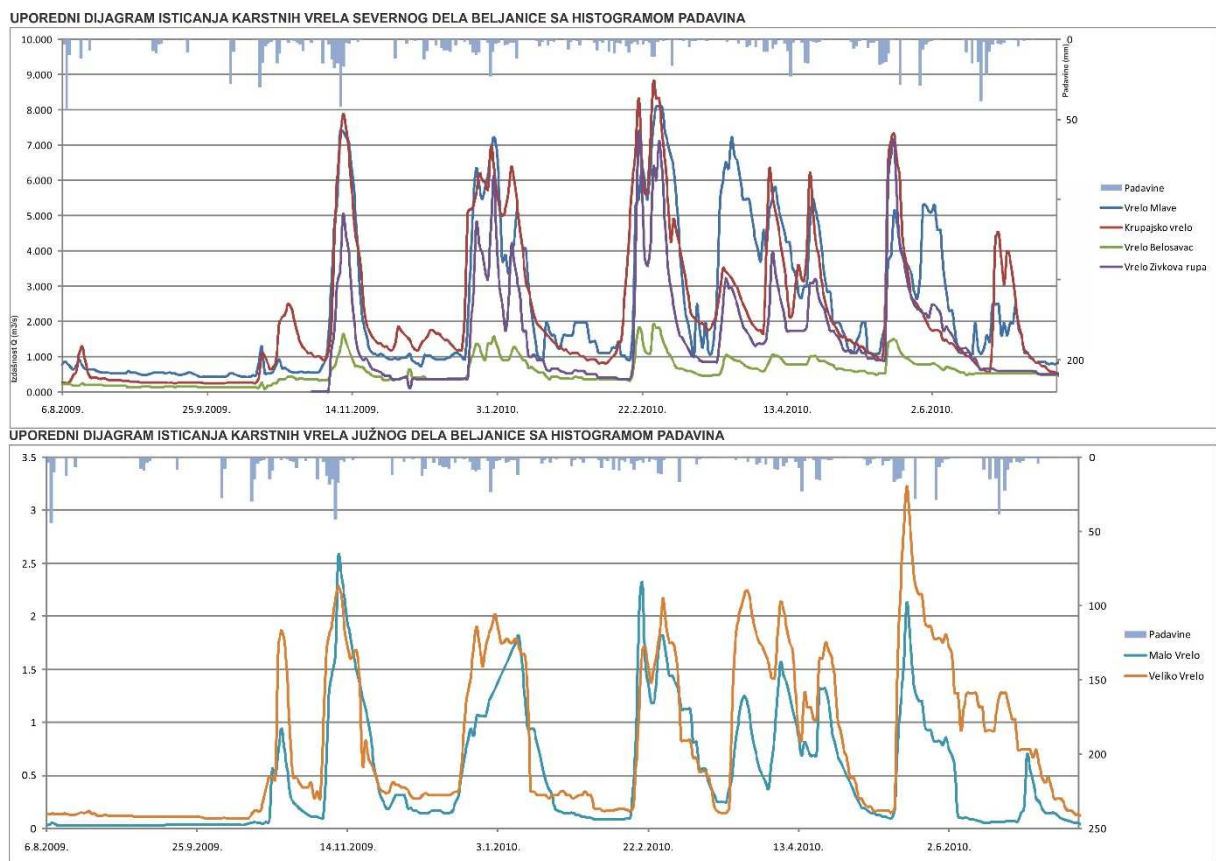
Na kraju, može se izvesti zaključak da se podzemne vode Kučajsko-beljaničkog masiva odlikuju izuzetno dobrim hidrohemijским karakteristikama, te da se mogu koristiti u svrhu vodosnabdevanja, s tim da bi u periodu velikih voda bilo neophodno sprovesti neki od tretmana voda za postizanje boljeg kvaliteta (pr. filtracija), odnosno za uklanjanje mutnoće i bakteriološkog sastava.

4.8. Režim izdašnosti karstne izdani

Za potrebe proučavanja režima funkcionisanja karstne izdani Kučajsko-beljaničkog masiva, odnosno, kako pojedinačnih izdani, tako i celokupnog karstnog sistema, korišćeni su podaci o kontinualnim i povremenim merenjima izdašnosti glavnih karstnih vrela. Generalno, fondovski podaci za osmatrana vrela su vezani za različite periode i obiluju

dugim prekidima. Pored ranijih podataka režima podzemnih voda Kučajsko-beljaničkog masiva, korišćeni su još i podaci monitoring mreže Beljaničkog masiva uspostavljenog 2009 god. (dnevni nivo), kao i merenja izdašnosti izvođena tokom kvartalnih uzorkovanja na monitoring lokacijama. Pored generalne ocene režima podzemnih voda Kučajsko-beljaničkog masiva, dat je i uporedni prikaz isticanja i padavina za period 2014-2015. godine, odnosno za periode izotopskih i hidrohemijskih uzorkovanja.

Kao što je već navedeno, za analizu režima karstnih izdanskih voda je 2009. god. uspostavljena monitoring mreža na vrelima: Mlave, Belosavac, Živkova Rupa, Krupajsko vrelo, Malo Vrelo i Veliko Vrelo. Osmatranja izdašnosti na ovim vrelima (izuzev Malog vrela), traju i danas, a karakterističan uporedni dijagram izdašnosti ovih vrela sa padavinama prikazan je na slici 4.41. (Milanović S. *et al*, 2010).

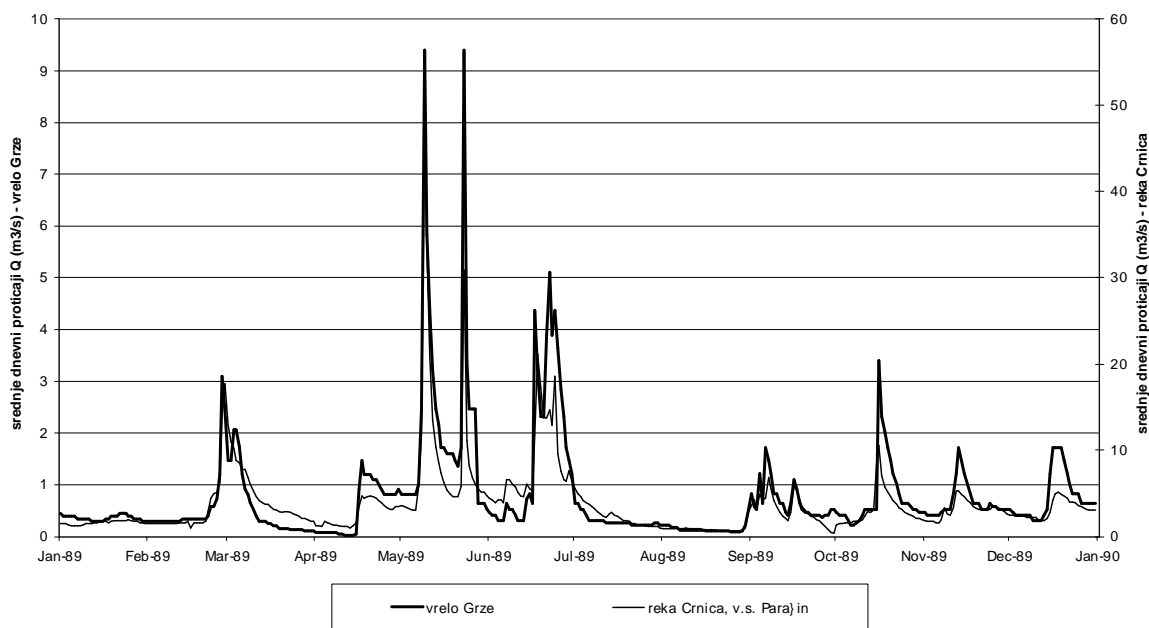


Slika 4.41. Uporedni dijagram izdašnosti karstnih vrela Beljaničkog masiva sa histogramom padavina (period 2009 i 2010) (Milanović S. *et al*, 2010)

Na osnovu hidrograma-histograma, može se zaključiti da se najveći proticaji, odnosno, izdašnosti karstnih vrela javljaju uglavnom krajem zimskog perioda, sa početkom otapanja snegova. Drugi po redu maksimum, vezan je za period intenzivnih prolećnih i letnjih pljuskova (maj-juli) i karakterišu ga izdašnosti koje prevazilaze i izdašnosti prvog perioda, ali pikovi su često kratkog trajanja, odnosno dolazi brzo do njihovog opadanja. Treći maksimum je vezan za kraj recesionog perioda, tj. za period početka intenzivnih zimskih padavina (novembar-decembar), a karakteriše ga nešto niže veličine izdašnosti u odnosu na prethodna dva, s obzirom da je za popunjavanje dela isteklih dinamičkih rezervi, tokom perioda recesije, potreban nešto duži vremenski period (Stevanović, 1991; Ristić, 2007, Stevanović *et al*, 2015) .

Pored gore izdvojenih perioda sa velikim i maksimalnim izdašnostima karstnih vrela Beljaničkog masiva, ova karstna izdan se odlikuje sa tri perioda minimalnih izdašnosti. Prvi je najčešće vezan za zimski period (decembar i januar), kada dolazi do smanjenja izdašnosti usled niskih temperatura vazduha (nema otapanja snežnog pokrivača). Drugi, najmanje izražen, minimum vezan je za opadanje izdašnosti vrela po završetku perioda topljenja snegova (mart - april). Ovo je samo uslovni minimum, jer izdašnosti vrela tokom ovog perioda mogu biti veće od izdašnosti u trećem maksimumu (Stevanović, 1991; Ristić, 2007, Stevanović *et al*, 2015). Treći, najbolje izražen minimum vezan je za period recesije, kada su i minimalne padavine, a karakteriše ga konstantno opadanje izdašnosti vrela. Period recesije traje maksimalno i do 100 dana, a u ekstremnim slučajevima i više.

Režim podzemnih voda Kučajskog masiva i to njegovog jugozapadnog i južnog dela, najbolje se može definisati kroz analizu isticanja karstnih voda na vrelu Grze, Crnice i Crnog Timoka, kao tri najdominantnija vrela koji dreniraju veći deo centralnog Kučaja. Režim ovih vrela, odnosno njihova zavisnost, najbolje se može prikazati kroz uporednu analizu dnevnih vrednosti proticaja unutar jednog hidrološkog ciklusa. Pa tako je za 1989 god. na slici 4.42. dat uporedni dijagram dnevnih vrednosti proticaja vrela Grze i toka Crnice (Ristić, 2007).

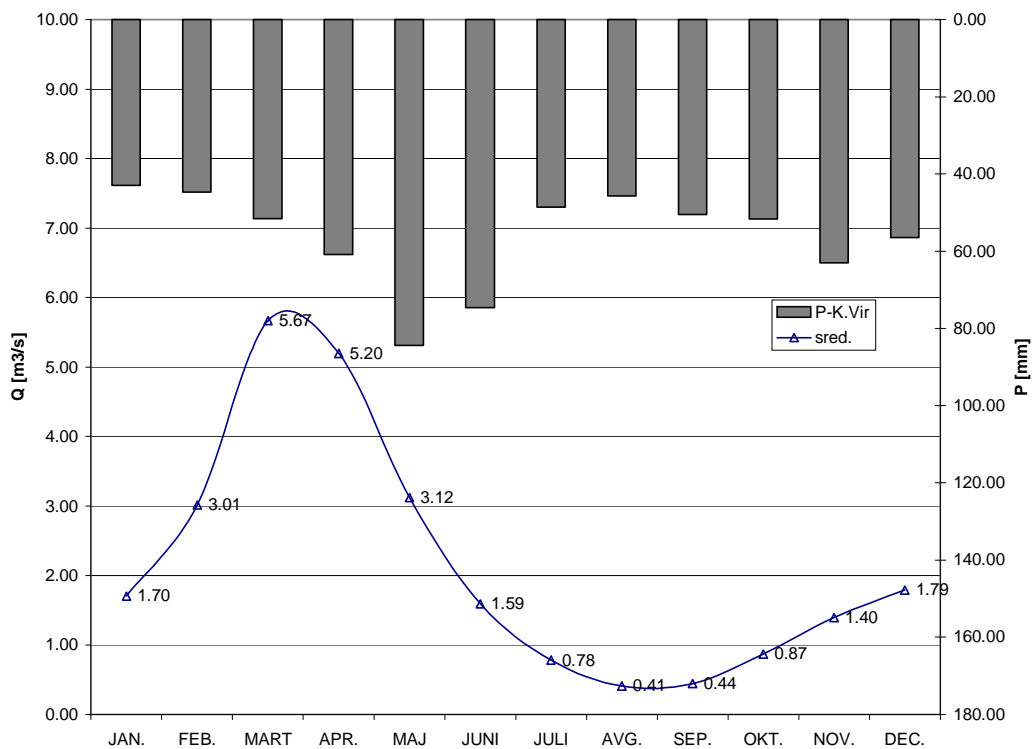


Slika 4.42. Uporedni hidrogrami vrela Grze i reke Crnice u profilu vod. st. Paraćin za 1989. godinu (Ristić, 2007)

Kod vrela Grze, slično kao i u slučaju Beljaničkih karstnih vrela, razlikujemo tri maksimuma, prvi koji je vezan za mart-april, kada dolazi do naglog topljenja snežnog pokrivača, drugi koji se javlja u periodu intenzivnih prolećnih i letnjih kiša i treći koji se javlja u decembru u vreme zimskih padavina (najmanje izražen). Pored maksimuma imamo izražena 2 minimuma i to prvi vezan za period recesije koji može trajati i do 120 dana (avgust-novembar), i drugi koji je prisutan u zimskim mesecima kada usled niskih temperatura dolazi do zadržavanja vode u vidu leda i snežnog pokrivača.

Režim vrela Crnog Timoka odražava slične karakteristike kao i prethodno objašnjeni režimi vrela Grze i Crnice. Na osnovu unutargodišnjeg rasporeda proticaja, maksimalne vrednosti srednjemesečnih proticaja javljaju se u periodu mart-april (slika 4.43.). Maksimalne vrednosti srednjemesečnih proticaja javljaju se u martu mesecu što se poklapa sa naglim topljenjem snežnog pokrivača i porastom padavina. U aprilu mesecu proticaji su niži, ali još uvek dominantniju ulogu u prihranjivanju ima otapanje snežnog pokrivača u odnosu na kišu. Iako je period maj-juni sa najvećom količinom padavina, što se poklapa sa ostatkom istraživanog terena, proticaj se i dalje smanjuje, tako da dostiže

svoj minimum u periodu avgust-septembar. Pored ovog, treba napomenuti da je rasprostranjenje karstnih terena značajno, što se svakako odražava i na režim površinskih tokova.

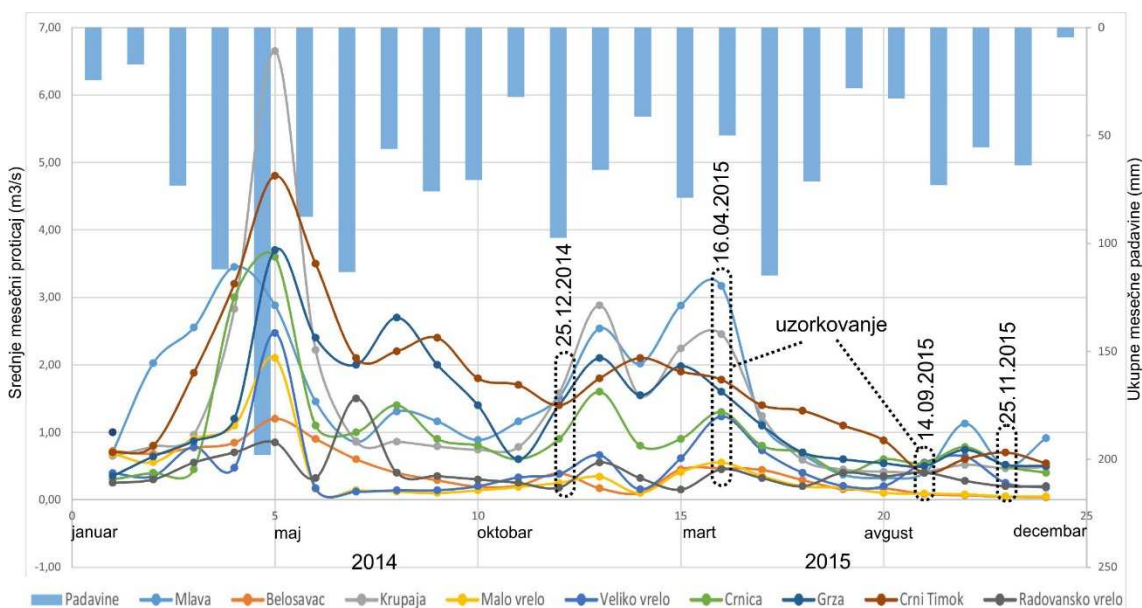


Slika 4.43. Uporedni dijagram srednjemesečnih proticaja Cnog Timoka - vodom. st. Jablanica i srednjemesečnih padavina na ks. Krivi Vir za period 1972-1991 (RHMZ Srbije)

Režim karstnih izdanskih voda istočnog dela Kučajsko-beljaničkog masiva se može analizirati kroz režim karstnih vrela, kao što su Radovansko vrelo, Mrljiš, Zlotsko vrelo i vrela Beljevine, a koja su bila predmet istraživanja tokom izrade doktorske disertacije. Pa tako, na osnovu fondovske dokumentacije, odnosno podataka zabeleženih 1978/1979 god. (Stevanović, 2010) se može zaključiti da Radovansko vrelo odlikuje samo jedan izraziti maksimum koji se vezuje za period topljenja snegova (januar-februar) i minimum u periodu recesije (jul-avgust). Nagla povećanja izdašnosti na ovom vrelu su, uglavnom, kratkotrajna i prema Stevanović (2010), javljaju se u periodu april-jun, kao i po završetku perioda recesije (novembar). Jedno od značajnijih vrela na istočnoj strani je vrelo Mrljiš, koje se generalno karakteriše ujednačenim režimom isticanja sa pikovima u maksimumu i minimumu, kao što je to slučaj i kod ostalih vrela Kučajsko-beljaničkog masiva. Takođe, treba napomenuti da sličan režim isticanja imaju i vrela Beljevine i Zlotskih vrela.

Funkcionisanje Bogovinske pećine kao vrelnog objekta ima značajno drugačiji režim od prethodno obrađivanih vrela, odnosno iz pećine se formira tok samo pri srednjim i visokim vodama (usled poniranja toka u pećini) te on ne može biti relativan za definisanje režima funkcionisanja karstne izdani formirane u okviru Kučajsko-beljaničkog masiva.

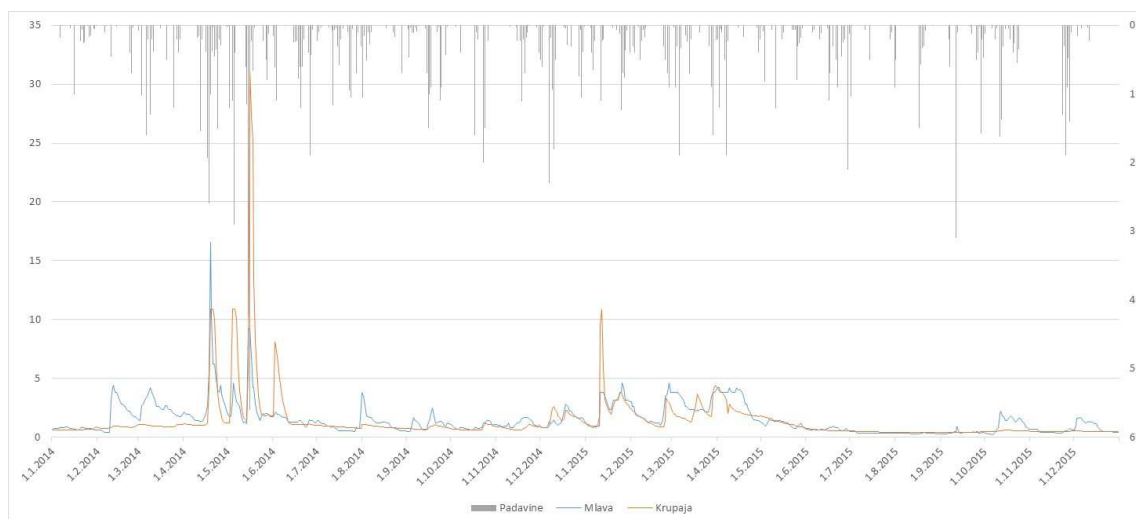
Kako su terenska istraživanja i uzorkovanja za potrebe doktorske disertacije vršena tokom 2014 i 2015. godine, u nastavku teksta će se dati prikaz funkcionisanja režima karstne izdani podzemnih voda Kučajsko-beljaničkog masiva u ovom periodu. Istraživanja su vršena na odabranim hladnim vrelima veće izdašnosti. Tokom istraživanja su u periodu od, gotovo, dve godine vršena povremena hidrometrijska merenja, koja su naknadno korelisana sa padavinama i proticajima površinskih tokova (RHMZ), dok je na pojedinim lokacijama vršen dnevni monitoring (Beljanica). Na slici 4.44. je dat uporedni dijagram srednje mesečnih proticaja i padavina u periodu 2014 do 2015. Na uporednom dijagramu se sa izuzetkom ekstremne 2014. godine, jasno uočava dosta sličan režim isticanja sa ranije prikazanim podacima.



Slika 4.44. Uporedni dijagram srednje mesečnih proticaja i ukupnih mesečnih padavina za značajnija vrela istraživanog prostora u periodu 2014 do 2015.

Režim vrela Kučajsko-beljaničkog masiva odražava slične karakteristike, gotovo, na svim vrelima. Kao što se vidi, na osnovu unutargodišnjeg rasporeda proticaja, maksimalne vrednosti srednjemesečnih proticaja se javljaju u maju 2014. godine i martu

i aprilu 2015. godine, što se poklapa sa ciklonom koji je izazvao poplave u 2014. godini i naglim topljenjem snežnog pokrivača i porastom padavina u prolećnom periodu 2015. godine. U aprilu mesecu proticaji su niži, ali još uvek dominantniju ulogu u prihranjivanju ima otapanje snežnog pokrivača u odnosu na kišu. Iako je period maj-juni sa najvećom količinom padavina, što se poklapa sa ostatkom istraživanog terena, proticaj se i dalje smanjuje, tako da dostiže svoj minimum u periodu avgust-septembar. Sa dijagrama se može zaključiti da u periodu istraživanja, odnosno, gotovo od aprila 2014. godine, pa sve do početka recesionog perioda u junu 2015. godine, gotovo da nije bilo karakterističnih minimuma za područje Kučajsko-beljaničkog masiva. Za bolje razumevanje režima karstne izdani Kučajsko-beljaničkog masiva u periodu istraživanja, korišćeni su i dnevni podaci izdašnosti vrela Mlave i Krupajskog vrela, kao i dnevne padavine sa tri meteorološke stanice (Crni Vrh, Žagubica i Ćuprija) (slika 4.45.). Ono što je potvrđeno analizom dnevnih osmatranja pomenutih vrela je da se ona, u najvećoj meri, poklapaju sa dijagramima izraženim kroz srednjemesečne vrednosti isticanja i da se kao takvi mogu u potpunosti koristiti u daljoj interpretaciji dobijenih podataka za određene hidrološke periode.



Slika 4.45. Uporedni dijagram dnevnih izdašnosti (vrela Mlave i Krupajsko vrela) i padavina KS (Crni Vrh, Ćuprija i Žagubica)

5. KONCEPCIJA ISTRAŽIVANJA I PRIMENJENI METODSKI POSTUPCI SA METODOLOGIJOM ISTRAŽIVANJA

5.1. Konceptija istraživanja

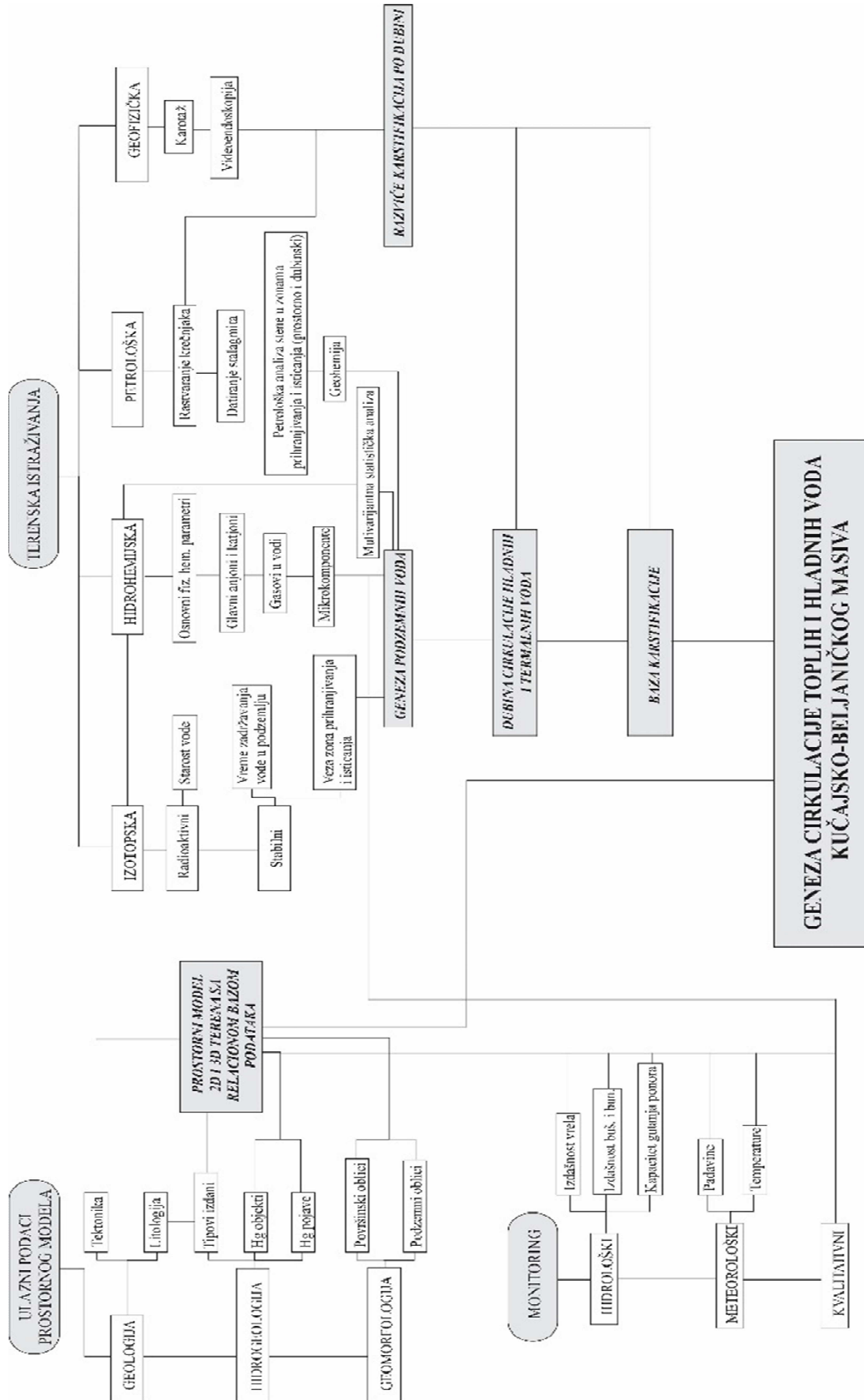
Kada se radi o definisanju funkcionisanja karstne izdani (prihranjivanje, cirkulacija, podzemno mešanje, isticanje voda), bilo je neophodno primeniti više metodoloških postupaka, kako bi se obezbedio dovoljan obim podataka kojim bi se obuhvatili i definisali svi parametri karstne izdani.

Koncept istraživanja za svaki od odabranih i proučavanih sistema formiran je prema unapred postavljenim zadacima:

1. Definisanje veze između površinskih i podzemnih voda;
2. Definisanje zone prihranjivanja (difuzno, koncentrično);
3. Definisanje zone isticanja (gravitaciono, sifonalno);
4. Utvrđivanje starosti vode i vreme zadržavanja vode u podzemlju;
5. Prognoza dubine zaleganja karstnih provodnika tople i hladne vode;
6. Prognoza pružanja glavnih kanala;
7. Procena dubine baze karstifikacije;
8. Utvrđivanje izotopskog sastava stene u zoni poniranja i isticanja;
9. Definisanje hemijskog sastava grejnog tela;
10. Utvrđivanje stepena rastvorljivosti krečnjaka u toploj i hladnoj vodi, u pećinama i na površini terena;
11. Utvrđivanje promene jonskog sastava vode tokom boravka u podzemlju (ulaz – izlaz);

Kako bi se dobili potrebni podaci čijom bi se interpretacijom dali odgovori na sve postavljene zadatke, i čijom bi se analizom izvršilo sagledavanje sistema i izvođenje zaključaka o genezi i uslovima cirkulacije karstnih izdaničkih voda po sistemima, bilo je neophodno primeniti više postupaka u okviru negeoloških, geoloških, izotopskih, hidrohemijjskih i geohemijjskih metoda istraživanja, svrstanih u tri vida istraživanja: terenska, laboratorijska i kabinetska.

Koncept istraživanja za dokazivanje hipoteze i za definisanja geneze i cirkulacije toplih i hladnih voda Kučajsko-beljaničkog masiva, prikazan je na slici 5.1. u obliku algoritma. Multiparametarskim konceptom istraživanja i radova težilo se što tačnijem definisanju karakteristika karstnog masiva u celini, i u okviru njega izdvojenih karstnih sistema. Ovakav vid kompleksnog istraživanja imao je za cilj da obezbedi potrebne podloge i dovede do rezultata na osnovu kojih je vršeno sagledavanje sistema, analiziranje i izvođenje zaključaka.



Slika 5.1. Konceptualni model definisanje geneze cirkulacije toplih i hladnih voda u okviru kompleksnih karstnih sistema

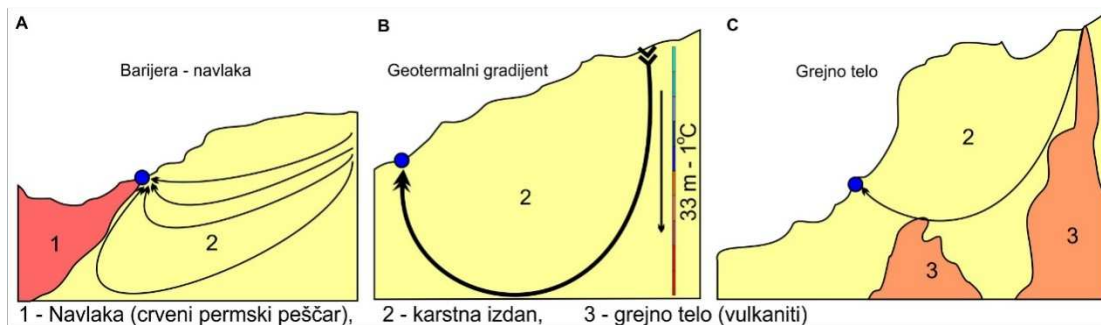
5.2. Kriterijumi za izdvajanje kompleksnih karstnih sistema koji su predmet analize

U cilju definisanja geneze i uslova cirkulacije podzemnih voda, a samim tim i utvrđivanja vertikalne zonalnosti hladnih i termalnih voda, bilo je neophodno kao polaznu osnovu usvojiti kriterijume na osnovu kojih će se izvršiti izdvajanje kompleksnih karstnih sistema u okviru Kučajsko-beljaničkog masiva.

Dosadašnjim istraživanjima u okviru masiva potvrđeno je postojanje dva tipa cirkulacije podzemnih voda, odnosno postojanje brze, gravitacione cirkulacije, i cirkulacije voda kroz znatno dublje kanale, gde se voda gravitirajući prema dubljim zonama u okviru karbonatnih sedimenta zagreva prisustvom prirodnog geotermalnog gradijenta (dubinom cirkulacije) ili prilikom kontakta sa određenim grejnim telom (Stevanović, 1981). Kao prilog tome služi fenomen da se na 4 lokacije javljaju pojave hladnih voda u neposrednoj blizini isticanja voda subtermalnog do termalnog karaktera. Međutim, kako je na četiri lokacije, u pokušaju da se istražnim bušotinama zahvate vode veće temperature, dobijena voda još niže temperature u odnosu na vode koje prirodno, preko izvora, ističu na površinu terena, izveden je zaključak da u vertikalnom profilu postoji znatno veći broj (mreža) karstnih kanala, koji se nalaze između kanala sa brzom cirkulacijom i dubokih sifonalnih kanala, a koji imaju različitu dubinu zaleganja i uslovljavaju različiti stepen mešanja hladnih i toplih voda.

Generalno, u okviru masiva postoje različite geološke strukture, odnosno različite vrste barijera koje uslovljavaju dubinu zaleganja karstnih kanala, a samim tim i tip isticanja voda na površinu terena. Takođe, temperature, kao i fizičko-hemijske karakteristike voda ukazuju na razlike u genezi voda, te se može zaključiti da se izdvajanje kompleksnih karstnih sistema može izvršiti na osnovu dva kriterijuma (slika 5.2.):

1. Geologija terena – tip, dubina cirkulacije voda;
2. Temperatura i hemijske karakteristike voda - geneza voda, odnosno postojanje prirodnog geotermalnog stupnja ili postojanje kontakta podzemnih voda sa grejnim telom (magmatskim stenama).



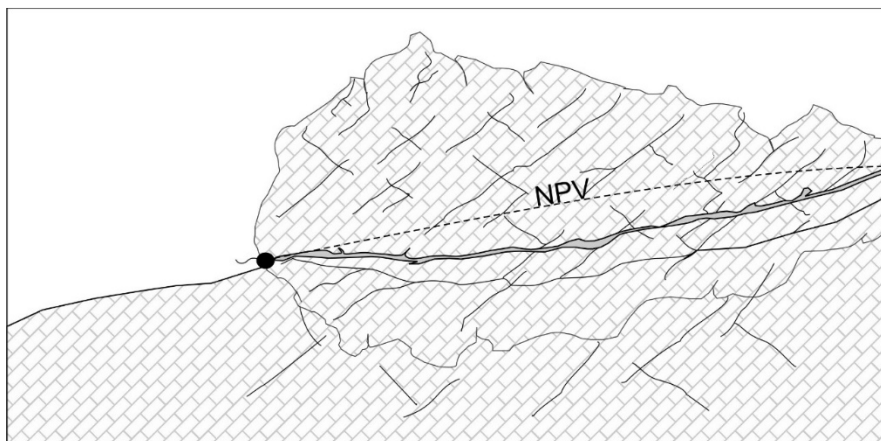
Slika 5.2. Kriterijumi za izdvajanje karstnih sistema: 1. Dubina cirkulacije uzrokovana postojanjem barijere; 2. Duboka cirkulacija i prisustvo prirodnog geotermalnog gradijenta; 3. Postojanje grejnog tela

Na navedene slučajeve može se primeniti i teorija dubokog regionalnog toka podzemnih voda, postavljena od strane Toth-a (1963).

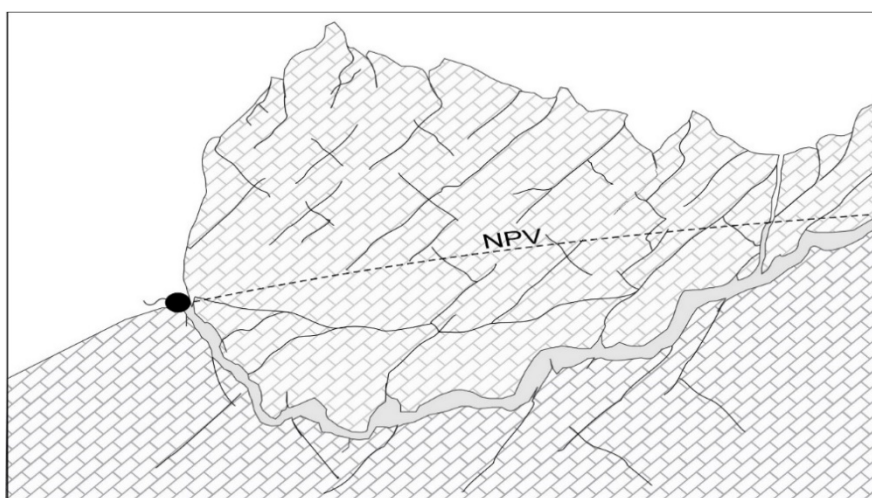
Količine voda koje se dreniraju na vrelima i izvorima ukazuju na primarnu funkciju određenog tipa cirkulacije voda u određenom sistemu. Tako, ukoliko vode sa gravitacionom cirkulacijom, u odnosu na vode sa dubokom, sifonalnom (ascendentnom) cirkulacijom, imaju preovlađujuću ulogu u sistemu, odnosno raspolazu većim kapacitetima isticanja, preuzimaju dominantnu ulogu u sistemu, i obrnuto.

Rezultati istraživanja, klasiranih na osnovu ova dva kriterijuma, generalno treba da ukažu na postojanje 4 tipa kompleksnih karstnih sistema:

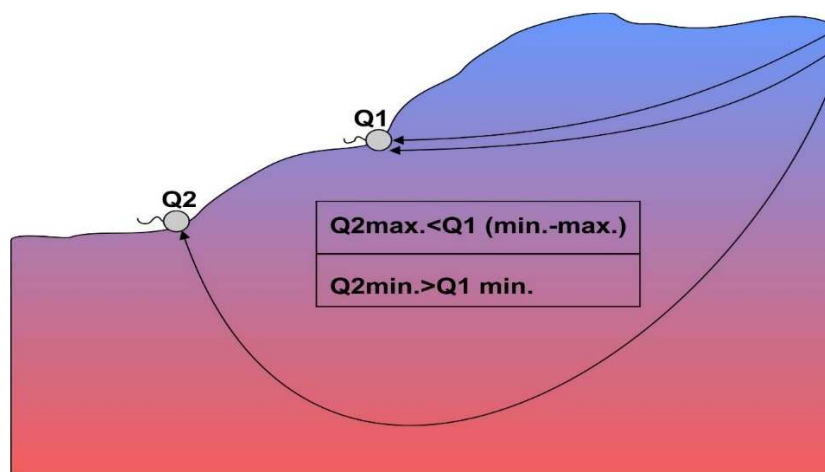
1. Karstni sistem sa gravitacionim tipom cirkulacije podzemnih voda (slika 5.3.);
2. Karstni sistem sa ascendentnim tipom cirkulacije podzemnih voda (slika 5.4.);
3. Kompleksni karstni sistem sa preovlađujućim gravitacionim tipom cirkulacije u odnosu na prisutan i ascendentni tip cirkulacije (gravitaciono-ascendentni) (slika 5.5.);
4. Kompleksni karstni sistem sa preovlađujućim ascendentnim tipom cirkulacije u odnosu na prisutan i gravitacioni tip cirkulacije (ascendentno-gravitacioni) (slika 5.5.);



Slika 5.3. Karstni sistem sa gravitacionim tipom cirkulacije podzemnih voda



Slika 5.4. Karstni sistem sa ascendentnim tipom cirkulacije podzemnih voda

Slika 5.5. Kompleksni karstni sistem sa preovlađujućim gravitacionim tipom cirkulacije ($Q2_{max} < Q1_{(min.-max.)}$) i Kompleksni karstni sistem sa preovlađujućim ascendentnim tipom cirkulacije ($Q2_{min} > Q1_{min}$)

Ovakvo izdvajanje podsistema omogućava lakše i preciznije tumačenje geneze i uslova cirkulacije podzemnih voda masiva, kao i iznošenje zaključaka o razlogu postojanja razlike u dubini cirkulacije i u izmeni kvalitativnih i kvantitativnih karakteristika voda po različitim delovima masiva.

5.3. Primenjeni metodski postupci

Tokom rada na disertaciji primenjeno je više metodoloških postupaka, od kojih se izotopski metod istraživanja izdvaja kao jedan od veoma savremenih i aktuelnih u razvijenim zemljama, dok svoju redovnu primenu u hidrogeološkim istraživanjima nije još uvek našao u Srbiji. Hidrohemijski metod istraživanja predstavlja osnovni vid istraživanja kvalitativnih karakteristika podzemnih voda, a jedan je od pratećih postupaka izotopskim metodama. Sveobuhvatna statistička analiza rezultata istraživanja, omogućuje da se lakše izdvoje podsistemi na osnovu geneze voda u okviru masiva.

Hidrometeorološkim i hidrološkim metodama istraživanja, stiče se uvid u količine voda koje se izluče na masivu, kao i o količinama voda koje se putem ponora infiltriraju u karstno podzemlje. Analizom ovih podataka sa kvantitativnim podacima izvora koji dreniraju karstni masiv, dobijaju se generalne informacije o režimu karstne izdani.

Geohemijskim metodama istraživanja teži se boljem poznavanju hidrogeohemijskih procesa koji se odvijaju u podzemlju, oceni rastvaračke moći voda, kao i analizi postojanja i porekla grejnog tela podzemnih voda. Datiranjem stalagmita, izvršen je pokušaj paleorekonstrukcije spuštanja erozionog bazisa.

Video-endoskopijom istražnih bušotina, kao i reinterpetacijom karotažnih merenja, stiče se uvid u stepen karstifikacije po dubini, kao i na zone karstifikovanosti i pojave toplih ili hladnih voda po dubini, a što je od velikog značaja za definisanje baze karstifikacije, kao i rasprostranjenje karstnih provodnika i njihove dubine zaleganja.

Opis primenjenih metodoloških postupaka terenske i laboratorijske aktivnosti, kao i kabinetska obrada podataka, prikazani su u daljem tekstu.

5.3.1. Izotopske metode istraživanja

Izotopski metod istraživanja u hidrogeologiji predstavlja posebnu disciplinu koja izučava hidrološke sisteme koristeći tehnike određivanja rasprostranjenja izotopa i njihovih promena u vodi i životnoj sredini. Pomoću izotopskih analiza mogu se utvrditi poreklo podzemnih voda, uslovi cirkulacije i mešanja podzemnih voda, kao i određivanje putanje njihovog kretanja, a takođe se može odrediti i vreme zadržavanja vode u sistemu, odnosno vreme koje je potrebno molekulu vode da pređe put od tačke A do tačke B (*mean residence time*). Poznavanjem navedenih procesa, može se lakše i pouzdanije uticati na održivo korišćenje podzemnih vodnih resursa.

Obzirom na kompleksnost teme doktorske disertacije usvojeno je da osnovni metod istraživanja na Kučajsko-beljaničkom masivu budu izotopske metode određivanja sadržaja stabilnih (^{18}O , ^2H i ^{13}C) i radioaktivnih izotopa u vodi (^{14}C , ^3H i $^3\text{H}+^3\text{He}$). Takođe, u istraživanjima karstnih terena u Srbiji izotopske metode do sada nisu primenjivane, a specifičan odabir vrsta izotopa, učinio je ovaj postupak još značajnijim. Kako je izotopski metod osnov ove disertacije, to će se dati njihov detaljan opis.

5.3.1.1. Primena izotopskih metoda u hidrogeologiji

Izotopska hidrologija predstavlja disciplinu, odnosno metodološki postupak za rešavanje različitih hidroloških problema vezanih za procenu, korišćenje i upravljanje vodnim resursima (Yurtsever & Araguas Araguas, 1993).

Prema Dragišiću & Polomčiću (2009) *izotopska hidrogeologija* predstavlja deo hidrogeologije koji se bavi određivanjem starosti, geneze, načina hranjenja, utvrđivanjem pravaca i brzine kretanja podzemnih voda i zagađujućih supstanci u njima, koristeći sklonost izotopskih parova određenih elemenata ka frakcionaciji, odnosno razdvajanju na lakše i teže frakcije.

Izotopi koji se koriste u ove svrhe prirodno su zastupljeni u životnoj sredini, samim tim i u vodi. To su izotopi vodonika H, kiseonika O, ugljenika C, azota N i sumpora S, koji su

ujedno i glavni elementi hidroloških, geoloških i bioloških sistema (Trček & Zojer, 2010). Stabilni izotopi ovih elemenata su laki i koriste se kao traseri pri kruženju vode, ugljenika, organske materije i rastvorene supstance u prirodi, a radioaktivni, koji podležu raspadanju sa određenim vremenom poluraspada, se koriste za određivanje starosti voda, odnosno vremena boravka i cirkulacije vode kroz podzemlje.

Problemi koji se proučavaju i rešavaju primenom izotopskih metoda u hidrogeologiji, odgovori su na sledeća pitanja (Mook, 2006):

1. Koje je poreklo podzemnih voda?

Pod ovim pitanjem se razmatraju problemi određivanja zone prihranjivanja podzemnih voda i utvrđivanje prihranjivanja direktnom infiltracijom padavina ili (delom) od površinskih voda (reke, jezera i mora).

2. Kako se kreću podzemne vode?

Odgovorom na ovo pitanje definiše se smer i brzina kretanja, kao i starost podzemnih voda.

3. Koji se geohemijski proces dešava u podzemlju?

Proces kao što je anaerobno razlaganje organskih materija (treset) i razmena sa mineralima gline ili karbonatnim stenama, utiču na hemijski, kao i izotopski sastav podzemnih voda, na osnovu čega se mogu doneti zaključci o hidro i geohemijskim izmenama u okviru sredine.

Uzimajući u obzir perspektivnost korišćenja prirodnih izotopa pri izučavanju podzemnih voda, Komatina (1984), preporučuje njihovu primenu u sledećim osnovnim vidovima hidrogeoloških radova:

- (1) pri hidrogeološkom kartiranju u svim razmerama, za ocenu parametara vodonosnih horizonata, utvrđivanje stepena povezanosti horizonata, proučavanje istorije formiranja i prognozu izmena podzemnih voda,
- (2) pri hidrogeološkim istraživanjima ležišta slatkih, termalnih i mineralnih voda,
- (3) pri režimskim proučavanjima, odnosno proučavanjima dinamike podzemnih voda,
- (4) pri istraživanjima u oblasti rudničke hidrogeologije radi davanja ocene i prognoze doticaja vode u rudničke prostorije,

- (5) pri sprovođenju hidromeliorativnih istraživanja, izučavanju vodno-sonog bilansa na meliorativnim površinama,
- (6) pri izučavanju međusobne povezanosti podzemnih i površinskih voda, izučavanju infiltracije padavina i napredovanja vlažnog fronta u podzemlju, proučavanju zone aktivne cirkulacije podzemnih voda, utvrđivanju smerova i brzine podzemnih voda, određivanju starosti podzemnih voda, i drugih praktičnih zadataka.

Izotopske analize mogu biti korišćene kao posebni metod istraživanja, kojim se pristupa rešenju određenog hidrogeološkog problema, ali se mora naglasiti da se detaljniji i pozdaniji zaključci donose kombinovanim metodama istraživanja, koje pored izotopskih analiza podrazumevaju i korišćenje hidrogeoloških, hidroloških, hidrohemijskih i drugih metoda.

Primenom izotopa prirodno zastupljenih u vodi (^{18}O , ^2H i ^3H) mogu se uspostaviti neka opšta pravila funkcionisanja izdani. Poreklo vode se odnosi na lokaciju i period kada se prihranjivanje desilo, dok se istorija odnosi na mešanje, salinizaciju i proces pražnjenja podzemne vode (Fritz & Fontes, 1980). Po definisanju vrste hidrogeološkog problema, vrši se izbor izotopske metode koja bi mogla dati najbolje rezultate pri istraživanju.

5.3.1.2. Pojam i poreklo izotopa

Pojam „izotop“ datira s početka 20 veka, a nastao je od grčke reči *isos* - jednak i *topos* – mesto, što znači da je reč o atomima koji se nalaze na istom mestu u Periodnom sistemu elemenata, a koji imaju različite mase.

Jezgro atoma je sastavljeno od pozitivno naelektrisanih čestica - protona (Z) i neutralnih – neutrona (N). Oko jezgra u atomu su rasprostranjene negativno naelektrisane čestice – elektroni. U svakom atomu broj elektrona mora biti jednak broju protona u jezgru. Hemijske osobine atoma definisane su brojem elektrona, koji je definisan brojem protona. Broj neutrona koji se nalazi u jezgru mora odgovarati broju protona, ili može imati nešto veću vrednost.

Zbir protona i neutrona u jezgru daje atomsku masu (A), pa se obeležavanje određenog elementa (X) obeležava kao:



Međutim, postoje atomi koji u svojim jezgrima imaju isti broj protona, ali različit broj neutrona. Elementi sa ovakvim varijacijama u atomu nazivaju se *izotopi*. Oni imaju isti redni broj (broj u periodnom sistemu), ali različiti atomski broj (Mazor, 1991). Razlika u atomskim masama je zapravo razlika u broju neutrona u atomskom jezgru.

Izotopi mogu biti 1. stabilni i 2. nestabilni, odnosno radioaktivni, od čega zavisi i njihova primena. Generalno, stabilni izotopi su oni koji ne podležu radioaktivnom raspadu, odnosno to su elementi čiji atomi u jezgru imaju jednak broj protona i neutrona, što njihovo jezgro čini stabilnijim. U atomskom jezgru protone i neutrone zajedno privlači jaka nuklearna sila. Protoni koji su pozitivno naelektrisani se međusobno odbijaju. Neutroni koji su elektroneutralni prave prostor (rastojanje) između protona, redukuju njihovo elektrostatičko odbijanje i na taj način stabilizuju jezgro. Neutroni su, stoga potrebni da bi održali dva ili više protona vezana u jezgru. Sa porastom broja protona u jezgru, potrebni su dodatni neutroni kako bi jezgro ostalo stabilno. Međutim, ukoliko je u jezgru prisutno previše neutrona, ono, takođe, postaje nestabilno (Mook, 2006).

Izotopi jednog elementa imaju različit broj neutrona i različiti odnos neutrona i protona, što utiče na njihovu stabilnost, pa mogu podleći raspadu. Izotopi koji podležu nuklearnom raspadu nazivaju se radioaktivnim izotopima, a često se nazivaju skraćeno radioizotopi. Radioaktivnim raspadom se element transformiše na lakši element, koji ima manji atomski broj od početnog elementa uz emitovanje neke vrste radioaktivnog zračenja, odnosno alfa, beta i gama zraka. Do danas je poznato oko 1700 izotopa, od čega je oko 270 sa stabilnim jezgrima. U prirodi se najčešće javljaju stabilni izotopi, mada se mogu naći i značajne količine nestabilnih izotopa.

Pored podele na stabilne i radioaktivne, izotopi se mogu podeliti i na prirodne i veštačke.

Poreklo prirodnih izotopa može se klasifikovati kao:

- Početno (ostaci od formiranja solarnog sistema, supernova)
- Kosomogeno (izotopi nastali interakcijom kosmičkih zraka u atmosferi)

- Podzemno (izotopi nastali nuklearnim reakcijama u steni)

Veštački izotopi nastali su kao posledica nuklearnih eksplozija (Hirošima, Nagasaki) i testiranja nuklearnog oružja u atmosferi 50-60-ih godina prošlog veka, zatim kao posledica nezgode u nuklearnim elektranama (Černobil 1986), radom nuklearnih postrojenja i otpadima iz medicinskih i naučnih ustanova.

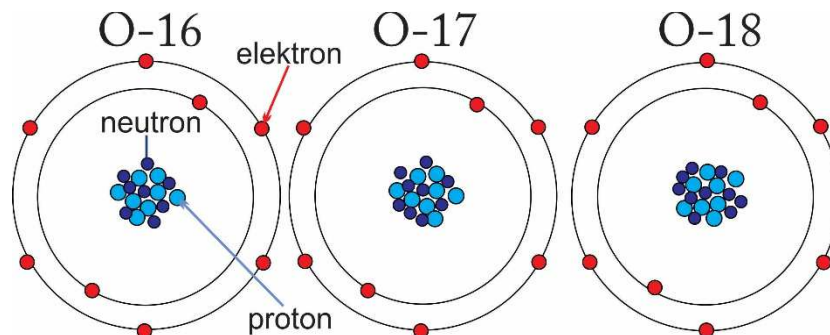
5.3.1.3. Rasprostranjenje stabilnih izotopa u prirodi

Stabilni izotopi su veoma zastupljeni u prirodi, naročito izotopi kiseonika i vodonika, koji predstavljaju komponente molekula vode, a čiji sadržaj i varijacije pružaju značajne mogućnosti za proučavanje procesa koji se dešavaju u ciklusu kruženja vode u prirodi.

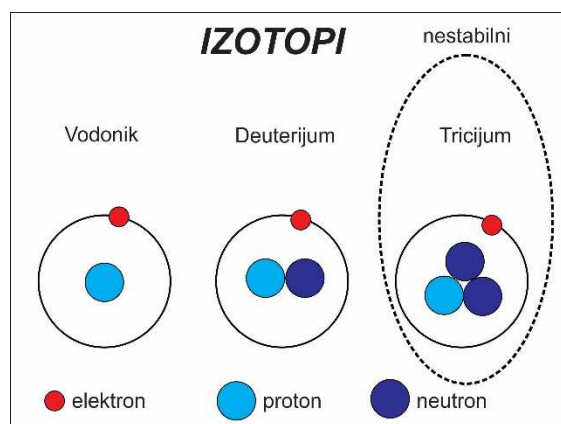
Od stabilnih izotopa, za potrebe izrade disertacije, u istraživanjima su najviše korišćeni izotopi deuterijum ^2H i kiseonik ^{18}O , kao i stabilni izotop ugljenika ^{13}C , koji je veoma značajan za sagledavanje geohemijskih procesa koji su se odigrali u podzemlju, kao i za utvrđivanje dužine kontakta vode sa stenskom masom. Sadržaj stabilnih izotopa se menja kod svake promene agregatnog stanja vode (kondenzacija ili evaporacija), što predstavlja izotopsku frakcionaciju, a koja je od velike važnosti za proučavanje hidrogeoloških sistema.

5.3.1.4. Kiseonik ^{18}O , Vodonik ^2H i Ugljenik ^{13}C

Kiseonik se u prirodi javlja u vidu tri izotopa ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O (slika 5.6.). Najzastupljeniji je kiseonik ^{16}O , koji se u prirodi javlja sa rasprostranjenjem od 99.76%, međutim, njegova primena nije značajna sa aspekta hidrologije i hidrogeologije. Za njim sledi kiseonik ^{17}O , sa rasprostranjenjem od 0.035%, koji ne pruža dovoljno informacija o hidrološkom ciklusu. Iz tog razloga je odnos kiseonika $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ mnogo značajniji. Visoke vrednosti izotopa ^{18}O su zastupljene u jezerima (stajaćim vodama), naročito slanim, dok se visoki predeli, kao i hladni regioni odlikuju niskim sadržajem izotopa ^{18}O . Ipak, u umerenim klimatskim regionima, raspolaze se sa količinom izotopa ^{18}O koja ne prelazi 30 ‰.

Slika 5.6. Stabilni izotopi kiseonika ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O

Izotop vodonika sadrži dva stabilna izotopa, od čega je najviše zastupljen izotop ^1H (99.985%), dok je znatno manje zastupljen izotop vodonika ^2H (deuterijum D), u prirodi se nalazi sa svega 0.015%. Odnos ova dva izotopa $^2\text{H}/^1\text{H}$ u prirodi iznosi 250 ‰, što ga čini najviše zastupljenim u odnosu na druge odnose stabilnih izotopa kiseonika i ugljenika. Pored ova dva stabilna, vodonik ima i jedan radioaktivni, nestabilni izotop ^3H , koji u svom jezgru sadrži jedan proton, jedan elektron i dva neutrona i koji ima veliku primenu u hidrologiji i hidrogeologiji. Prikaz tri atoma vodonika dat je na slici 5.7.



Slika 5.7. Prikaz tri vrste atoma vodonika

Visoke koncentracije deuterijuma u površinskim vodama se javljaju kao posledica jakog isparavanja, dok se niske koncentracije nalaze u snegu i ledu u polarnim oblastima. Frakcionacija izotopa vodonika je najizraženija prilikom prelaska vode u paru, baš kao što je slučaj sa izotopom kiseonika, pa je tako vodena para koja se formira isparavanjem sa vodene površine (okeani, reke, jezera itd.) izotopski lakša u pogledu deuterijuma, nego što je preostala voda u rezervoaru koja isparava (Mook, 2006).

Jedan od osnovnih elemenata biosfere i hidrosfere je ugljenik. Ugljenik se u prirodi javlja u vidu dva stabilna izotopa, od čega je rasprostranjenje zastupljenijeg ugljenika ^{12}C 98.9 %, dok je manje zastupljeni ^{13}C koga u prirodi ima 1.1%. Odnos ova dva izotopa usled kinetičke i ravnotežne frakcionacije pokazuje nekoliko prirodnih varijacija od 100 ‰.

Izotop ^{13}C prati izvor ugljenika i njegovu međusobnu reakciju između organskih i neorganskih jedinjenja. Ranih pedesetih godina 20. veka je usvojen standard PDB, na osnovu temperaturne skale koristeći izotopski odnos kiseonika $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ u marinskim krečnjacima. Naziv PDB dobijen je na osnovu međunarodne kalcitne formacije iz fosila *Belemnitella americana*, koji su zastupljeni u krednoj Pee Dee formaciji Južne Karoline. Kreg je 1957. godine uveo standard PDB za ugljenik i kiseonik ^{13}C i ^{18}O u karbonatnim stenama. Ovaj standard je kasnije usvojen za sva jedinjenja ugljenika (CO_2 , DIC, DOC, CH_2O , organske tečnosti, metan CH_4 i dr.). Merenje izotopa u mineralima karbonata obavlja se preko gasa CO_2 , koji normalno nastaje procesom acidifikacije, metode koja je uvedena od strane McCrea (Clark & Fritz, 1999).

Izotopski odnos

Rasprostranjenost izotopa (zastupljenost) se definiše kao odnos dva zastupljena izotopa određenog elementa. To je, zapravo, kvantitativni odnos najmanje i najviše zastupljenog izotopa, odnosno odnos lakšeg i težeg izotopa. Ovaj odnos se obeležava slovom R i određuje se preko sledeće jednačine (Mook, 2006):

$$R = \frac{\text{rasprostranjenje retkog izotopa (teškog)}}{\text{rasprostranjenje zastupljenog izotopa (lakog)}}$$

Naprimera, u slučaju teškog i retkog izotopa ^{18}O (čije zemaljska zastupljenost iznosi 0.204%) i lakšeg, zastupljenog ^{16}O (zastupljenosti 99.796%), izotopski odnos $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ iznosi 0.00204. Merenje apsolutnog izotopskog odnosa ili zastupljenosti nije jednostavno i zahteva precizne i razvijene masene spektrometre (Clark & Fritz, 1999).

Pri obeležavanju odnosa R, ispred njega se u eksponentu upisuje broj koji se odnosi na maseni broj izotopa čiji se odnos računa, npr:

$${}^2R(\text{H}_2\text{O}) = \frac{[{}^2\text{H}^1\text{H}\text{O}]}{[{}^1\text{H}_2\text{O}]} \qquad {}^{18}R(\text{H}_2\text{O}) = \frac{[\text{H}_2^{18}\text{O}]}{[\text{H}_2^{16}\text{O}]}$$

Ukoliko je koncentracija retkih izotopa velika, kao što je u slučaju teških jedinjenja, koncentracija retkog izotopa se najčešće daje u atom %. Ovo se zatim odnosi na izotopski odnos jednačinom (Mook, 2006):

$$R = (\text{atom \%} / 100) / [1 - (\text{atom \%}/100)]$$

U geologiji se na osnovu ovog izotopskog odnosa mogu rešavati različiti problemi, poput određivanja starosti stena, vode i fosila. Ukoliko elementi imaju više stabilnih izotopa, njihovi količinski odnosi se menjaju usled izotopske frakcionacije (Dragišić & Živanović, 2014).

Međutim, ovaj izotopski odnos se ne obeležava kao apsolutni odnos iz nekoliko razloga (Mook, 2006):

- Maseni spektrometar visoke osetljivosti, koji se koristi za merenje rasprostranjenja izotopa sa ciljem da detektuje i veoma male prirodne varijacije, nije pogodan za dobijanje realnih apsolutnih odnosa.
- Neophodnost da se uzorak poredi sa internacionalnim standardom.
- Upotreba izotopskog odnosa bi vodila do prikazivanja rezultata koji iznose 5 do 7 cifara, što je obimno i teško za pamćenje.
- Apsolutni odnos je manje značajan od promena u odnosima koji su se desili tokom određenih procesa, kao što je prelaz između faza ili molekula.

Iz tih razloga, izotopsko rasprostranjenje se izražava kao izotopski odnos uzorka A, prema izotopskom odnosu standardnog uzorka R, a obeležava se oznakom δ :

$$\delta_{A/R} = \frac{R_A}{R_R} - 1 \times 10^3 \text{ ‰}$$

Pa će se tako izotopsko rasprostranjenje u prirodi za stabilne izotope ^{18}O , ^2H i ^{13}C prikazivati na sledeći način:

$${}^2\delta = \frac{({}^2\text{H}/{}^1\text{H})^A}{({}^2\text{H}/{}^1\text{H})^R} - 1 \times 10^3 \text{ ‰} \quad {}^{18}\delta = \frac{({}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O})^A}{({}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O})^R} - 1 \times 10^3 \text{ ‰} \quad {}^{13}\delta = \frac{({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C})^A}{({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C})^R} - 1 \times 10^3 \text{ ‰}$$

Iako se pravilno izotopsko rasprostranjenje obeležava sa: ${}^2\delta$, ${}^{18}\delta$ i ${}^{13}\delta$, u literaturi se češće sreće obeležavanje sa: ${}^2\delta\text{H}$, ${}^{18}\delta\text{O}$ i ${}^{13}\delta\text{C}$ (Mook, 2006), pa je to primenjeno i u ovoj disertaciji.

Prema tome, dalje se u tekstu oznakom ${}^{18}\text{O}$, ${}^2\text{H}$ i ${}^{13}\text{C}$ obeležava sadržaj izotopa u vodi, oznakama ${}^2\text{R}$, ${}^{18}\text{R}$ i ${}^{13}\text{R}$ odnos težeg i lakšeg izotopa, a oznakama ${}^2\delta$, ${}^{18}\delta$ i ${}^{13}\delta$ ili ${}^2\delta\text{H}$, ${}^{18}\delta\text{O}$ i ${}^{13}\delta\text{C}$ rasprostranjenje određenog izotopa prema VSMOW standardu.

Izotopska frakcionacija

Izotopsku frakcionaciju je prvi razvio Harold Urey prezentovanjem rada u časopisu „*The Thermodynamic Properties of Isotopic Substances*“ 1946 godine, kada je ukazao kako izotopska frakcionacija može biti predstavljena izmenom izotopa (npr. ${}^{16}\text{O}$ i ${}^{18}\text{O}$) između bilo koje dve molekularne vrste ili faze koje učestvuju u reakciji (Clark & Fritz, 1999).

Izotopska frakcionacija nastaje kao posledica različite brzine reakcije lakšeg i težeg izotopa i usled hemijskih, fizičkih i bioloških procesa koji dovode do promene izotopskog sastava nekog elementa. Javlja se pri prelasku jedinjenja iz jednog stanja u drugo (isparavanje) ili u drugo jedinjenje (ugljen-dioksid u biljni organski ugljenik), ili se može javiti kao razlika u izotopskom sastavu između dva jedinjenja koja su u hemijskoj ravnoteži (rastvoren bikarbonat i ugljen dioksid), ili u fizičkoj ravnoteži (voda i vodena para) (Mook, 2000). Razlika fizičkih i hemijskih osobina izotopskih jedinjenja nastaje usled masene razlike u atomskom jezgru. Posledica ovakve razlike u masi su dvostruke (Mook, 2006):

1) Teži molekuli izotopa se sporije kreću. Kinetička energija molekula se određuje jedino temperaturom: $kT = \frac{1}{2} mv^2$ (k = Bolcmanova konstanta, T = apsolutna temperatura, m = molarna masa, v = srednja molarna brzina). Mook navodi da molekuli imaju istu kinetičku energiju $\frac{1}{2} mv^2$, bez obzira na njihov izotopski sastav, što znači da molekuli sa većom

molarnom masom m , uvek imaju manju srednju molarnu brzinu v , iz čega sledi nekoliko praktičnih posledica kao:

- teži molekuli imaju manju brzinu difuzije;
- frekventnost sudara između molekula –primarni uslov za nastanak hemijske reakcije, manja je kod teških molekula, što je jedan od razloga zašto lakši molekuli reaguju brže.

2) Teži molekuli imaju jaču vezivnu energiju, što je kinetička energija između bilo koja dva atoma unutar jednog molekula, ili energija između dva molekula unutar jednog jedinjenja, pa je potrebno više interakcijske snage između njih da bi se razdvojili. Primer pri toplotnom isparavanju: izotopi $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ i $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$ imaju niži pritisak pare nego izotop $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$, pa oni teže isparavaju. Pritisak pare za teže izotopske vrste je manji, što predstavlja normalan izotopski efekat. Obrnuti, inverzni izotopski efekat se javlja kada izotopski teže čestice imaju veći pritisak pare.

Obzirom da se izotopska frakcionacija odigrava u prirodnom okruženju, izotopi molekula vode, kiseonik i vodonik, variraju između rezervoara u vremenu i prostoru. Frakcionacija je ispraćena različitim procesima, kao što su fazna izmena, transport, difuzija, oksidacija, redukcija. Razlika u broju neutrona omogućava da dođe do frakcionacije, obzirom da broj neutrona utiče na jačinu veze između molekula. Molekuli sa težim izotopima imaju jaču vezu, kao što je navedeno, te je neophodna veća energija za razdvajanje ovih molekula, za razliku od molekula sa lakšim izotopima. Kod molekula vode, frakcionacija se javlja prilikom prelaska iz stanja leda, vode i vodene pare, u jedno od ovih stanja. Potrebno je više energije da bi teški izotopi prešli iz stanja leda u vodu ili iz vode u paru, nego što je potrebno lakšim izotopima. Nasuprot tome, manja količina energije je potrebna teškim molekulima da bi prešli iz stanja pare u vodu, ili iz stanja vode u led.

5.3.1.5. Kiseonik i vodonik u padavinama i formiranje Globalne meteorske kriva

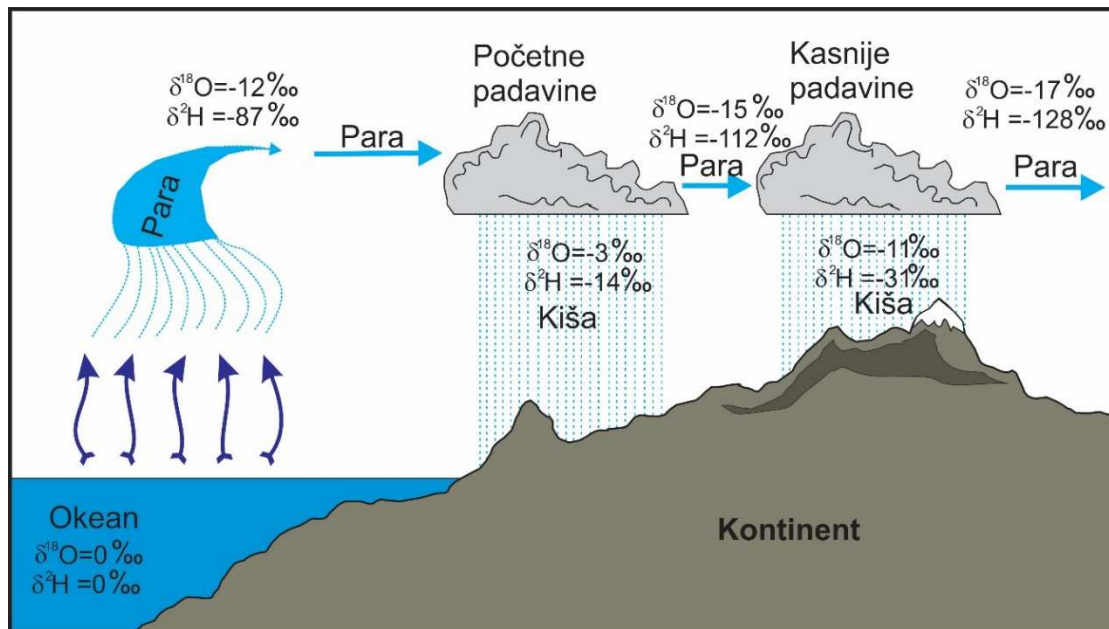
Izotopski sastav podzemnih voda izražava se u odnosu na izotopski sastav vode u okeanima, koji je uzet kao standardna vrednost (SMOW- *Standard Mean Ocean Water*). Izražava se u promilima ‰, a vrednost se određuje masenim spektrometrom. Odnos

izotopskog sastava uzorka sa izotopskim sastavom u standardu se obeležava simbolom δ i može se dobiti jednačinama (Craig, 1961a):

$$\delta D\text{‰} = \frac{\left(\frac{D}{H}\right)_{\text{uzorak}} - \left(\frac{D}{H}\right)_{\text{SMOW}}}{\left(\frac{D}{H}\right)_{\text{SMOW}}} * 1000$$

$$\delta^{18}\text{O}\text{‰} = \frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}\right)_{\text{uzorak}} - \left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}\right)_{\text{SMOW}}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}\right)_{\text{SMOW}}} * 1000$$

Molekul vode koji sadrži izotope D ili O^{18} je teži od normalnog molekula vode HHO^{16} , tako da je formirana vodena para osiromašena teškim izotopima u odnosu na okeansku vodu. Kondenzacijom se formiraju kišne kapi u oblaku, što obrće ovaj proces. Teži molekuli se prvi kondenzuju, formirajući kišu obogaćenu teškim izotopima iz oblaka. Preostala vlaga u oblacima se smanjuje, kao i sadržaj teških izotopa, sa laganim pomeranjem kišnog oblaka ka unutrašnjosti kopna (Craig, 1961b) (slika 5.8.).



Slika 5.8. Prikaz koncentracija izotopa D i ^{18}O u okeanu, pari i padavinama (preuzeto: Leis, 2007)

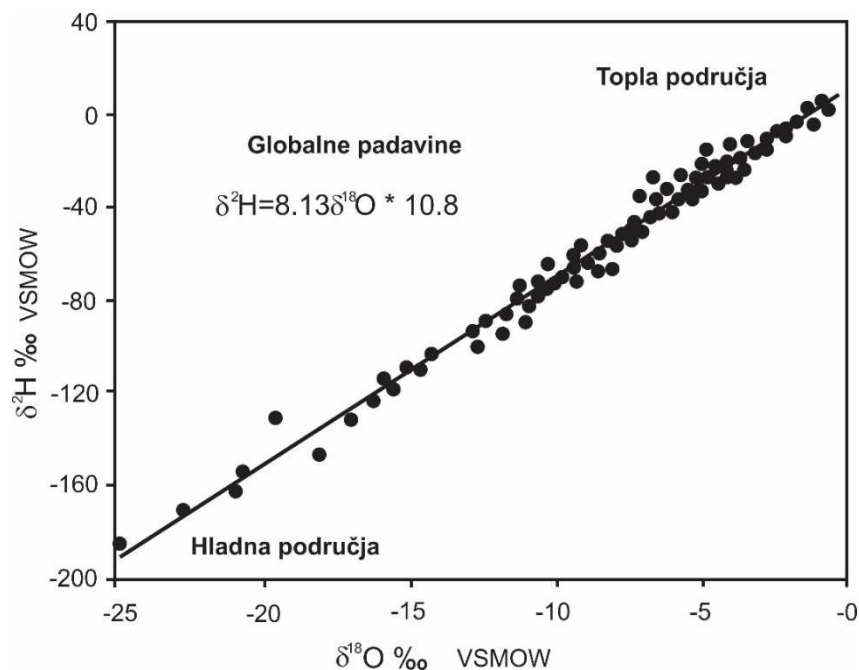
Voda koja sadrži manje deuterijuma nego što sadrži standardni uzorak (SMOW), ima negativnu vrednost deuterijuma δD , dok voda sa više deuterijuma nego u standardnom uzorku (SMOW) ima pozitivnu vrednost δD . Isto važi i za $\delta^{18}O$ (Mazor, 2004).

Craig je 1961. godine uspostavio dijagram zavisnosti vrednosti δD i $\delta^{18}O$, koji je dobijen interpretacijom podataka ukupno 400 uzoraka prikupljenih sa različitih delova sveta iz reka, jezera i padavina. Istražujući, zapazio je da je izotopski sastav voda drugačiji u hladnim i toplim regionima, što je dosta doprinelo određivanju zone infiltriranja voda u podzemlje, odnosno zone prihranjivanja.

Rezultati raspoređeni linearno formiraju pravu liniju, koja se naziva Globalnom meteorskom linijom (*Global Water Meteoric Line – GWML*), a predstavljena je jednačinom (Craig, 1961a):

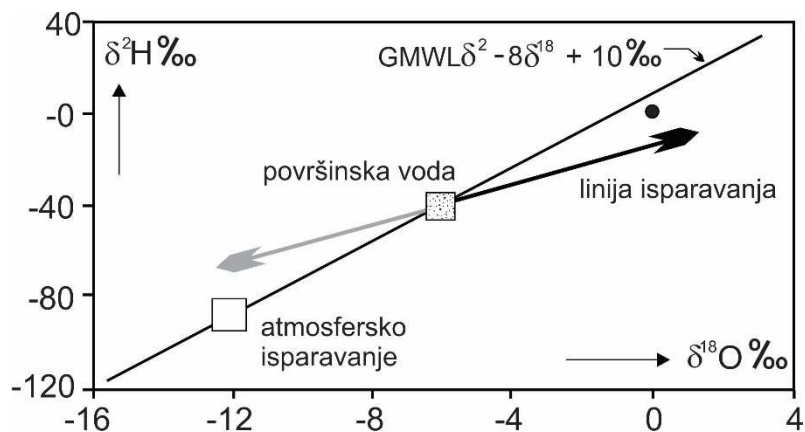
$$\delta D = \delta^{18}O + 10\text{‰}$$

Globalna meteorska linija pokazuje linearnu zavisnost vrednosti δD i $\delta^{18}O$ u padavinama širom sveta (slika 5.9.), a to je zapravo prosek mnogih lokalnih i regionalnih linija koje su uspostavljene pri različitim klimatskim i geografskim karakteristikama, pa se stoga ne poklapaju sa globalnom linijom, kako u sadržaju deuterijuma, tako i u nagibu linije.



Slika 5.9. Globalna meteorska kriva (modifikovano: Mazor, 2004)

Atmosferska voda nastaje kao posledica isparavanja vode sa površine cele zemlje, što uključuje sve površinske vode (okeane, jezera, močvare, reke, potoke itd.), kao i vodu koja isparava iz biosfere i iz zemljišta. Proces isparavanja zajedno sa procesom frakcionacije ima veliki uticaj na izotopski sastav vode, koja je deo hidrološkog kruženja u prirodi (slika 5.10.).

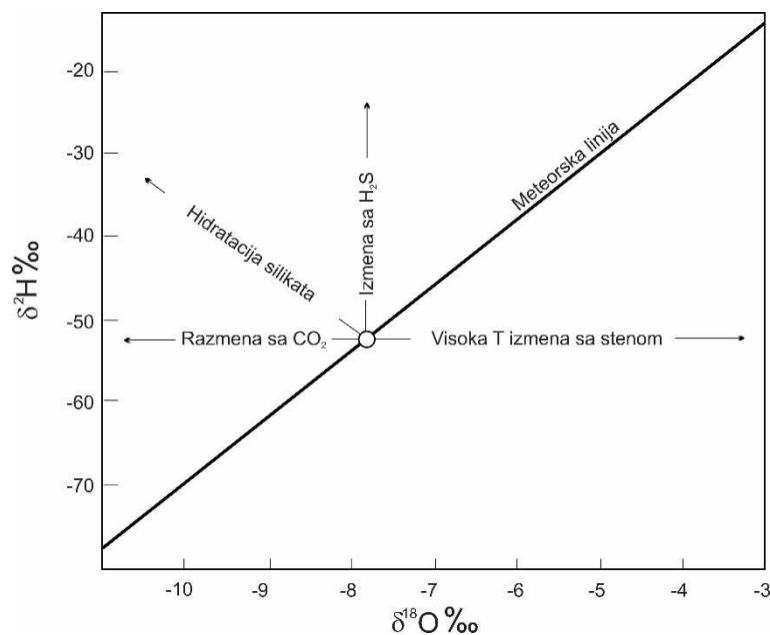


Slika 5.10. Smer linije isparavanja i površinskih voda u odnosu na GML (modifikovano: Mook, 2001)

Meteorska linija je pogodna tumačenje i praćenje porekla i kretanja lokalnih podzemnih voda. Pri svakom hidrohemijском ispitivanju podzemnih voda, neophodno je uspostaviti lokalnu meteorsku liniju, uzorkovanjem svake pojedinačne kiše ili ukupnih mesečnih padavina, kako bi rezultati istraživanja bili pouzdaniji, jer ukoliko se podaci tumače u odnosu na Globalnu liniju, može doći do određenih netačnosti i odstupanja. Izotopski sastav podzemnih voda direktno ili izmenjeno odgovara sastavu padavina. Uobičajeno je da se podaci podzemnih voda unose na $\delta D - \delta^{18}O$ dijagram, gradeći referentnu liniju koja stoji uz lokalnu meteorsku krivu.

Meteorska linija se može proračunati za određenu oblast (na lokalnom ili regionalnom nivou), gde se koristi kao osnovna linija za tumačenje podataka o izotopima u toj oblasti i naziva se *Lokalnom meteorskom linijom*. Usled kinetičke frakcionacije nastaju varijacije izotopskog sastava uzoraka sa različitih lokaliteta u okviru te oblasti. Upravo te razlike se koriste za proučavanja u hidrogeologiji.

Generalno, različite lokalne meteorske linije imaju blago različite nagibe u odnosu na Globalnu meteorsku liniju. Takođe, vode koje imaju meteorsko poreklo ili su bile pod uticajem sekundarnih procesa, najčešće ne leže na meteorskoj krivi. Sve vode koje su bile izložene nekoj od frakcionacija, leže na liniji koja znatno odudara od meteorske linije. Ukoliko su podzemne vode bile u interakciji sa stenom i duže vremena provele u podzemlju, njihov izotopski sastav će ležati u odnosu na meteorsku krivu na nekom od pravaca prikazanih na slici 5.11.



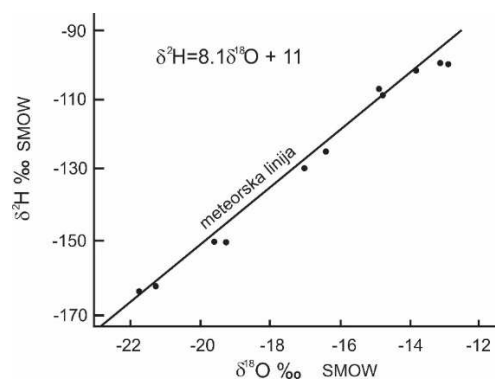
Slika 5.11. Položaj izotopskih sastava voda koje su bile u interakciji sa stenom
(preuzeto od: Leis, 2007)

Za detaljno hidrološko i hidrogeološko istraživanje, poželjno je uporediti vrednosti izotopskog sastava u površinskim i podzemnim vodama sa izotopskim sastavom u padavinama. Kako bi se uspostavila precizna lokalna meteorska kriva, neophodna za ovakva istraživanja, potrebno je vršiti uzorkovanje padavina najmanje na mesečnom nivou (mada je poželjno, pri jakim padavinama, raditi uzorkovanje svake oluje zasebno), minimum tokom godinu dana, a preporučljivo je i duže (tri godine i više).

Kada je u pitanju izotopski sastav hladnih podzemnih voda koje ne zaležu duboko u podzemlje, njihov sastav generalno odgovara izotopskom sastavu padavina. Najčešće karstne vode, koje imaju brzu ili relativno brzu vodozmenu, u potpunosti reflektuju izotopski sastav padavina, ili površinskih tokova sa kojima su u direktnoj ili neposrednoj vezi. Iz tog razloga, izotopski sastav većine karstnih voda leži direktno ili veoma blizu

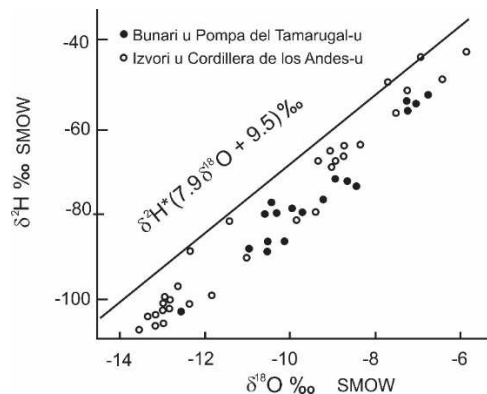
lokalne meteorske krive. Razlike u izotopskom sastavu između padavina i izvorske vode mogu nastati u planinskim predelima, gde zona prihranjivanja može biti na znatno višim nadmorskim visinama, pa su $\delta^{18}\text{O}$ vrednosti u padavinama manje od vrednosti blizu izvora.

Ukoliko podaci izotopskog sastava podzemnih voda padaju blizu lokalne meteorske krive, to isključuje sekundarne procese, kao što je izotopska razmena sa stenama, unutar kojih je formirana izdan ili isparavanje pre infiltracije u podzemlje, slika 5.12.



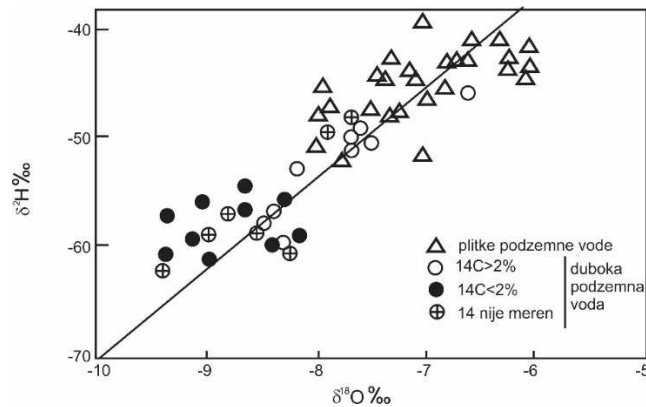
Slika 5.12. Izotopski sastav podzemnih voda iz bunara u Manitobi, Kanada (modifikovano: Mazor, 2004)

Ukoliko vrednosti podataka padaju ispod uspostavljene meteorske krive, ukazuju da je došlo do sekundarne frakcionacije ili da su vode stare i da su se prihranjivale u drugim klimatskim režimima koji su odgovarali drugačijoj lokalnoj meteorskoj liniji (slika 5.13.). Kako bi se ustanovilo koja se od ove dve mogućnosti odigrala, neophodno je odrediti starost podzemnih voda (Mazor, 2004).



Slika 5.13. Izotopski sastav podzemnih voda u Čileu (modifikovano: Mazor, 2004)

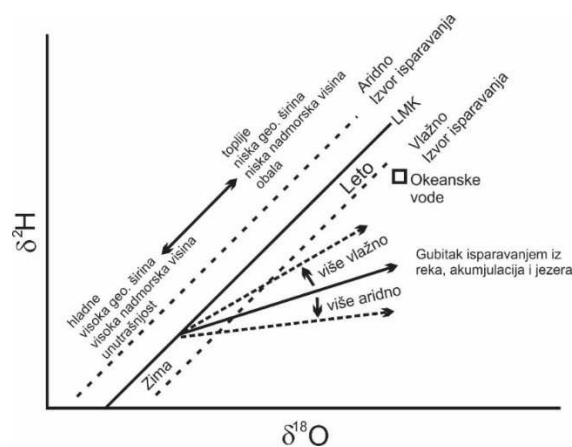
Vrednosti raspoređene duž lokalne meteorske krive, ali u širokom rasponu, ukazuju na razliku između plitkih i dubokih voda, gde su duboke vode izotopski lakše (negativnije) od plićih voda. Ovakav dijagram ukazuje, na primer, da su duboke podzemne vode u Alžiru stare i da potiču iz drugih klimatskih režima, što je i dokazano primenom analize ^{14}C , kojom je utvrđeno da vode sadrže malo do nimalo merljive količine izotopa ^{14}C i da su velike starosti, slika 5.14.



Slika 5.14. Izotopski sastava podzemnih voda u Chatt-el Honda, Alžir
(Modifikovano: Mazor, 2004)

5.3.1.6. Uticaj izotopskih efekata na sadržaj ^{18}O i ^2H u padavinama

Usled izotopske frakcionacije, sastav izotopa kiseonika ^{18}O i deuterijuma se menja prilikom udaljavanja vodene pare od površinskog izvora vode sa kojeg isparava. Na njegov sastav najveći uticaj imaju temperatura, geografska širina, nadmorska visina, oblast, godišnje doba, slika 5.15.



Slika 5.15. Uticaj izotopskih efekata na sadržaj stabilnih izotopa u padavinama
(preuzeto: Leis, 2007)

Temperaturni i sezonski efekat

Promena u izotopskom sastavu padavina usled temperaturnog efekta (povišena ili smanjena temperatura), počinje još prilikom isparavanja, gde od temperature zavisi intenzitet isparavanja sa površine okeana. Dalje promene izotopskog sastava padavina se javljaju prilikom kondenzacije u oblacima, gde stepen kondenzovanja i stvaranja kiše ili snega zavisi od temperature. Kako se vazдушna masa u oblacima hladi, stvaraju se padavine koje su u izotopskoj ravnoteži sa vodenom parom. Usled termodinamičke ravnoteže između vode i vodene pare, padavine će kasnije imati veći sadržaj ^{18}O i deuterijuma, pa će se preostali sadržaj ^{18}O i deuterijuma u padavinama konstantno smanjivati.

Temperaturni efekat je u direktnoj vezi sa sezonskim efektom, jer se prilikom pomeranja vazdušne mase, od okeana prema unutrašnjosti kontinenta, javljaju sezonska kolebanja temperature u zavisnosti od brzine strujanja vazdušne mase. Ukoliko su ova kolebanja ekstremna, dovešće do veće sezonske izmene izotopskog sastava u padavinama. Na osnovu varijacija sadržaja vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ u padavinama, može se odrediti zona prihranjivanja i period u godini kada se u najvećoj meri vrši prihranjivanje podzemnih voda (Clark & Fritz, 1999).

Prisustvo temperaturnog efekta prvi je uočio Dansgaard (1964), koji je analizirao veliki broj uzoraka dobijenih od strane Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA). Na osnovu analiza, dobijenih kako na terenu, tako i u laboratorijskim uslovima, konstatovao je da je temperatura glavni parametar koji određuje količinu izotopa u padavinama. Linearna zavisnost, uspostavljena od strane Dansgaard-a, između površinske temperature vazduha i $\delta^{18}\text{O}$ vrednosti za srednje godišnje padavine na godišnjem nivou, predstavljena je jednačinom (Clark & Fritz, 1999):

$$\delta^{18}\text{O} = 0.695 T_a - 13.6 \text{ ‰ SMOW}$$

$$\delta^2\text{H} = 5.6 T_a - 100 \text{ ‰ SMOW}$$

Ukoliko se koriste srednje mesečne temperature globalna veza za $\delta^{18}\text{O}$ postaje:

$$\delta^{18}\text{O} = (0.338 \pm 0.028) T_{\text{Mesečno}} - 11.99 \text{ ‰ VSMOW}$$

U proseku se računa da smanjenje od 1 ‰ srednje godišnje vrednosti ^{18}O , odgovara smanjenju od 1.1 – 1.7 °C srednje godišnje temperature. Odgovarajuće varijacije uočene su i kod izotopa deuterijuma. Međutim, linearna zavisnost između temperature i $\delta^{18}\text{O}$ uočava se samo na globalnom nivou, dok je na lokalnom nivou daleko od linearne. Prošireni monitoring pokazao je različite krive za različite geografske regione, pa se tako uočava jasna razlika između morskih i kontinentalnih monitoring stanica. Odstupanje od globalne veze između temperature i $\delta^{18}\text{O}$ na regionalnom i lokalnom nivou nastaje usled fizičko-geografskih razlika. Međutim, ovo odstupanje može biti i posledica kratkog perioda osmatranja sadržaja izotopa u padavinama.

Usled temperaturnog efekta, javljaju se i velike varijacije izotopskog sastava u podzemnim vodama, pa tako upravo ovaj efekat predstavlja značajno sredstvo koje hidrogeolozi koriste pri određivanju brzine filtracije vode kroz podzemlje. Na područjima gde se javljaju padavine u toku letnjih i zimskih meseci, javljaju se razlike u izotopskom sastavu padavina, pa se ove razlike mogu koristiti za određivanje prihranjivanja u letnjim i zimskim periodima, odnosno za određivanje brzine filtracije i utvrđivanje postojanja sporog, kapilarnog kretanja.

Količinski efekat

Razlika u izotopskom sastavu padavina može nastati i kao posledica količine vode koja se izluči, pa tako jake kiše (oluje) ili velike količine padavina na mesečnom nivou pokazuju znatno veću negativnu vrednost $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ u sastavu padavina. Dansgaard izdvaja dva objašnjenja količinskog efekta (Mazor, 1991):

- niže temperature u prirodnoj sredini uzrokuju obrazovanje oblaka sa lakšim izotopskim sastavom, takođe, pri nižim temperaturama se formiraju teže kiše, odnosno kiše obogaćene teškim izotopima.

- kapi kiše koje padaju podležu procesu isparavanja, obogaćujući kišu teškim izotopima. Ovaj efekat je blaži kada je temperatura sredine niska i kada je količina kiše koja se izluči velika, jer tada vazduh postaje zasićen.

Na većim udaljenostima, gde su izražene pojedinačne jake oluje, veće razlike se mogu očekivati u sastavu padavina, zbog većeg smanjenja $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ vrednosti usled izlučivanja velikih količina padavina. Tokom perioda od nekoliko meseci, sadržaj $\delta^{18}\text{O}$ u kiši može pokazati sličnu sliku, čak i kada se radi o udaljenosti od nekoliko stotina kilometara. Međutim, pojedinačne mesečne vrednosti kiše se mogu značajno razlikovati, iako su srednje vrednosti samo malo različite, približno 1 ‰.

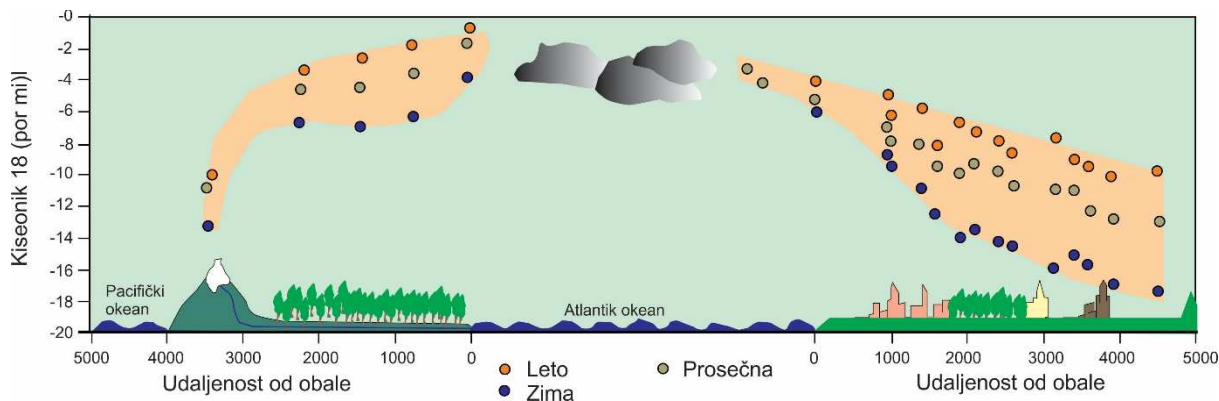
Efekat geografske širine

Proces progresivnog padanja kiše, koji je zasnovan na modelu Rejljeve frakcionacije/kondenzacije, rezultira odnosom između osmotrenih srednjih godišnjih $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ vrednosti u padavinama i srednjim površinskim temperaturama, što je u odgovarajućoj vezi i sa osmatranim vrednostima širom sveta, sa GNIP mreže (Mazor, 1991).

Na globalnoj mapi $\delta^{18}\text{O}$ vrednosti, u padavinama se uočava smanjenje $\delta^{18}\text{O}$ vrednosti sa porastom geografske širine. Blagi gradijenti su konstatovani u tropskim predelima, koji delimično prelaze preko okeana. Pri temperaturi od 0°C na određenoj geografskoj širini efekti iznose oko 0.8‰/°C i 7‰/°C za $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ pojedinačno.

Kontinentalni efekat

Kontinentalni efekat predstavlja često zastupljeni prirodni proces izmene izotopskog sastava (njegovog osiromašenja) tokom udaljavanja vazdušne mase od izvora isparavanja, (slika 5.16.). Iz tog razloga se često ovaj efekat naziva efektom udaljenja od obale. Naime, izotopski sastav $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ padavina direktno iznad okeana ima vrednost takozvanog „prvog isparenja“, gde se vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ kreću od - 0 do - 0.5 ‰, sa malim sezonskim kolebanjima, što važi i za $\delta^2\text{H}$ vrednost.



Slika 5.16. Izotopska frakcionacija usled kontinentalnog efekta (modifikovano: *Leis, 2007*)

Kontinentalni efekat je najčešće povezan sa ostalim efektima koji imaju uticaj na izmenu izotopskog sastava padavina, obzirom da se prilikom kretanja vazdušne mase prema kontinentu, menjaju temperatura, kao i klimatske i geografske karakteristike terena, pa su tako zastupljeni i temperaturni efekat, efekat geografske širine, nadmorske visine i sezonski efekat.

Na primer, prilikom prelaska vazdušne mase preko Evrope, od Irske obale do Uralskih planina, dolazi do smanjenja izotopskog sastava za vrednost $\delta^{18}\text{O}$ od 7‰ od početne vrednosti u Irskoj. Međutim, ovaj efekat u toku leta je četvrtina efekta koji se javlja zimi, što može biti razlog ponovnog isparavanja letnjih padavina.

Jedinstveni slučaj odsustva unutrašnjih efekata (efekata koji se javljaju na kontinentalnom delu), konstatovan je prilikom prelaska preko Amazona, iako se ovde javljaju jake i obilne padavine. Ova pojava se pretežno pripisuje povratnom fluksu vlažnosti, odnosno transpiraciji i na taj način se poništava efekat padanja kiše (Mook, 2006).

Obzirom da su na kontaktu sa okeanima i morima priobalne padavine izotopski obogaćene, hladnije kontinentalne oblasti imaju izotopski osiromašene padavine sa jakim sezonskim varijacijama. Kontinentalnost se prikazuje Konradovim indeksom, koji je predstavljen vezom između srednje godišnje vrednosti temperature (ΔT u $^{\circ}\text{C}$) i ugla geografske širine φ , a obezbeđuje merenje regionalnih geografskih parametara koji mogu imati uticaj na padavine, odnosno na pojavu kiše (Clark & Fritz, 1999):

$$k = \frac{1.7\Delta T}{\sin(\varphi+10)} - 14$$

Efekat nadmorske visine

Efekat nadmorske visine poznat je još kao efekat dizanja ili Alpski efekat. Dizanjem vazdušne mase ka planinskim vrhovima, izotopski sastav padavina se menja, te kiša postaje izotopski siromašnija izotopima kiseonika i vodonika ^{18}O i ^2H na većim visinama. Usled dizanja vazdušne mase, javlja se i temperaturni efekat, jer se sa dizanjem na višu nadmorsku visinu smanjuje temperatura, pa dolazi do kondenzacije i stvaranja kiše.

Vazдушna masa koja se diže ka višim visinama postaje izotopski lakša, pa se vrednost ^{18}O smanjuje za oko - 0.15 ‰ do - 0.5 ‰ na 100 metara visine, dok se vrednost ^2H smanjuje oko -1 ‰ od - 4 ‰ (Kendall *et al*, 1995).

Efekat nadmorske visine je veoma značajan za hidrogeologiju, jer daje uvid istraživaču na kojoj se nadmorskoj visini odvija prihranjivanje podzemnih voda, odnosno pomaže pri preciznijem određivanju zone prihranjivanja.

5.3.1.7. Ugljenik ^{13}C

Jedan od osnovnih elemenata biosfere i hidrosfere je ugljenik, koji se u prirodi javlja u vidu dva stabilna izotopa, od čega je rasprostranjenje zastupljenijeg ugljenika ^{12}C 98.9 ‰, dok je manje zastupljeni ^{13}C koga u prirodi ima 1.1 ‰. Izotopski odnos ova dva izotopa usled kinetičke i ravnotežne frakcionacije pokazuje nekoliko prirodnih varijacija od 100 ‰.

Proučavanje procesa izmene između gasa i vode, kao i merenje odnosa transporta u okeanima i podzemnim vodama je moguće izvršiti preko rastvorenog neorganskog ugljenika koji se nalazi u morskoj vodi, površinskim i podzemnim vodama. Efekti izotopske frakcionacije su u prirodi najčešće zastupljeni između faza, kao što su CO_2 - H_2O - H_2CO_3 - CaCO_3 , a najčešće zavise samo od temperature. Međutim, Mook (2000) navodi da razlike izotopskog sastava gasa CO_2 i DIC u vodi ne mogu rezultirati izotopskom frakcionacijom između njih. Kao što je ranije rečeno, izotopska frakcionacija

nastaje kao reakcija između dva jedinjenja, dok se ugljenik iz morske vode sastoji od tri frakcije, rastvorenog CO_2 (gde je H_2CO_3 jedva prisutan), rastvorenog HCO_3^- i rastvorenog CO_3^{2-} , gde sve tri frakcije frakcionišu.

Visoke ^{13}C vrednosti su zastupljene u okeanskom vazduhu daleko od kontinentalnog uticaja i javljaju se u kombinaciji sa malim CO_2 koncentracijama. Negativnije vrednosti ^{13}C su zastupljene u vazduhu nad kontinentom, a javljaju se kao rezultat mešanja prirodnog i veštačkog CO_2 ($\approx -25\text{‰}$).

Atmosferski CO_2 je blizu izotopske ravnoteže sa okeanskim rastvorenim hidrogen-karbonatom. Okeanske ^{13}C (HCO_3^-) vrednosti se kreću od oko $+1$ do $+1.5\text{‰}$, u skladu sa ravnotežnom frakcionacijom na temperaturama 15 do 20 °C (Mook, 2006).

Ugljenik u biljkama se formira iz atmosferskog CO_2 , međutim ima niži sadržaj ^{13}C . Frakcionacija koja se dešava prilikom procesa fotosinteze i uzimanja CO_2 , zavisi od vrste biljke i klimatskih uslova. Sadržaj CO_2 u vazduhu, koji je oslobođen iz zemlje, može biti viši nego u atmosferi. Višak sadržaja CO_2 u zemljištu može nastati kao produkt raspadanja biljaka ili reakcijom vode sa zdrobljenom stenskom masom, koja je zastupljena u zemljištu.

Kako biogeohemijski procesi utiču na pretvaranje zemljišnih i morskih biljnih materijala u ugalj, ulje i prirodne gasove, opseg ^{13}C vrednosti ovih materijala je veći idući ka negativnijim vrednostima, naročito za biološki metan, a globalna prosečna vrednost CO_2 od sagorevanja ovih goriva iznosi oko -27‰ .

Ugljenik iz biosfere ima direktan uticaj na ^{13}C vrednosti iz atmosferskog CO_2 . Sezonska variranja u atmosferskim vrednostima CO_2 , kao i ^{13}C vrednostima, posledica su globalnog uzimanja ugljen-dioksida od biosfere tokom letnjeg perioda, kao i njegovog vraćanja za vreme zimskih meseci. Mešanje atmosferskog i biosferskog CO_2 se može prikazati jednačinom (Mook, 2000):

$$(^{13}\delta_{\text{atm}} + \Delta^{13}\delta)(C_{\text{atm}} + \Delta C_{\text{bio}}) = ^{13}\delta_{\text{atm}} C_{\text{atm}} + ^{13}\delta_{\text{bio}} \Delta C_{\text{bio}}$$

gde su,

C - vrednost ugljenika u CO₂,

ΔC - atmosferski dodatak, i

Δ¹³δ - varijacija ugljenika u δ vrednosti.

Određivanje DIC (rastvoreni neorganski ugljenik – *dissolved inorganic carbon* DIC) u podzemnim vodama vrši se uz pomoć CO₂ koji se nalazi u zemljištu. Nakon njegovog raspadanja, voda koja se infiltrira u podzemlje rastvara krečnjak. Mook (2000) navodi da HCO₃⁻ u zemljištu prvo stupa u razmenu sa često prisutnim viškom gasa CO₂, što na kraju rezultuje koncentracijom:

$$^{13}\delta (\text{HCO}_3^-) = ^{13}\delta (\text{zemljišni CO}_2) + ^{13}\epsilon_{\text{b/g}} \approx -25 \text{‰} + 9 \text{‰} = -16\text{‰}$$

Posledično, ¹³δ (HCO₃⁻) vrednosti su značajno iznad opsega – 11 do – 12 ‰ u vodi i u zemljištu, kao i rekama i jezerima, što su uobičajene vrednosti za hidrogen-karbonat koji nastaje od morskog krečnjaka u oblasti umerenog klimata. U površinskim vodama, obogaćenje izotopom ¹³C od neorganskog ugljenika može nastati na osnovu izotopske izmene sa atmosferskim CO₂, čija ¹³δC vrednost iznosi oko – 7.5 ‰, pa tako daje vrednost koja je ista kao vrednost okeanske vode:

$$^{13}\delta + ^{13}\epsilon_{\text{b/g}} = -7.5 \text{‰} + 9 \text{‰} = -1.5 \text{‰}$$

Iz tog razloga, minerali ugljenika u slatkim vodama mogu imati vrednosti ¹³δ, koje odgovaraju okeanskoj vodi, gde se morski karakter karbonata računa na osnovu ¹⁸δ.

Vode u prirodi sadrže koncentracije CO₂, koje mogu biti promenljive sa efektom smanjenja ¹³δ vrednosti u DIC-u (negativnije), nego što je u frakcijama bikarbonata. Vrednosti ¹³δ u DIC podzemnih voda, kao i površinskih tokova koji se formiraju od podzemnih voda, kreću se u opsegu -12 do -15 ‰.

Sadržaj δ¹³C u steni je približno jednak nuli. Kada se tumači sadržaj stabilnog izotopa δ¹³C u vodi, izvodi se zaključak da što je vrednost δ¹³C bliža nuli, to je veći uticaj stene

na sadržaj vode, pa to može da ukaže na veću starost voda, ili pak da ukaže da je voda više obogaćena karbonatom. U slučaju karsta, ovo ukazuje na prolongirani kontakt vode sa stenom, a samim tim i na povećanje starosti vode. Ukoliko sadržaj $\delta^{13}\text{C}$ ide više u negativnost, odnosno ima veću negativnu vrednost, ovo ukazuje da voda ima manje sadržaja ugljenika iz matične stene, a u slučaju karsta to znači da voda nije bila dovoljno u kontaktu sa matičnom stenom, odnosno da je brzo prošla kroz podzemlje. To ukazuje na period velikih voda, rapidnu cirkulaciju ili kratku cirkulaciju, odnosno kratak put kroz podzemlje (vode se infiltriraju neposredno u zoni isticanja).

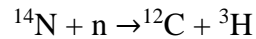
5.3.1.8. Rasprostranjenje radioaktivnih izotopa u prirodi

Radioaktivni izotopi, koji postoje u ciklusu kruženja vode u prirodi i koriste se za određivanje starosti, odnosno vreme zadržavanja voda u podzemlju, su radioaktivni izotop vodonika ^3H i radioaktivni izotop ugljenika ^{14}C .

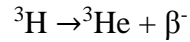
Termonuklearnim testiranjem, oslobođene su velike količine tricijuma u atmosferu, tako da je veoma nizak prirodni nivo tricijuma preplavljen i nekoliko puta većim koncentracijama. Od tada, nivo tricijuma progresivno opada zbog procesa ispiranja i mešanja sa okeanskom vlagom. Nivo tricijuma u atmosferi meri se još od testiranja nuklearnog oružja 1952. godine. Ovi podaci su omogućili uspostavljanje vremenskog okvira za transport vode kroz različite delove hidrološkog ciklusa. Tako, podzemne vode koje ne sadrže tricijum, infiltrirale su se u podzemlje preko padavina pre 1952. godine, jer su se prirodne koncentracije tricijuma u vodi već raspale i imaju vrednost ispod granice detekcije.

5.3.1.9. ^3H - Tricijum (T)

Tricijum je teški, kratko živeći radioaktivni izotop vodonika, koji se raspada na stabilni izotop ^3He uz emitovanje beta čestica, sa vremenom poluraspada od 12.3 godine. Male koncentracije ovog izotopa mogu nastati u stratosferi prirodnim putem, usled nuklearne reakcije između atmosferskog azota i toplotnih neutrona:



Dalje se formirani izotop tricijuma, koji ulazi u ciklus kruženja vode, nakon oksidacije finalno raspada na:



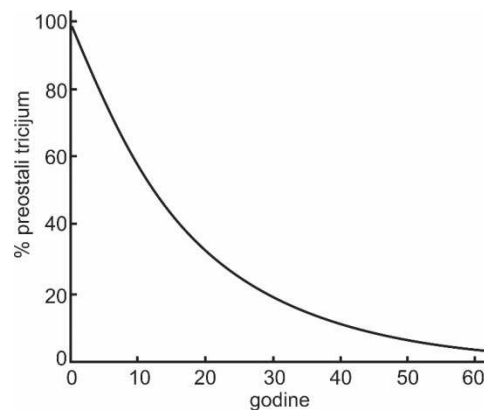
sa energijom emitovanja od $E_{\beta \text{ max}}=18 \text{ keV}$

Kao sastavni deo molekula vode, izotop tricijuma služi kao idealan obeleživač. Obzirom na svoje vreme poluraspada, najčešće se koristi za utvrđivanje starosti voda, ali može da se koristi i za utvrđivanje povezanosti površinskih i podzemnih voda. Sadržaj tricijuma u vodi može se se izračunati kao odnos tricijuma i atoma vodonika:

$$\text{T/H} = 10^{-18}$$

Ovaj odnos predstavlja jednu jedinicu tricijuma (1TJ).

Velike količine tricijuma (kao i izotopa ^{14}C), koje su oslobođene nuklearnim eksplozijama u stratosferu, a vraćaju se u troposferu svake godine u proleće i rano leto, uzrokuju sezonsko variranje, kako u vrednosti tricijuma, tako i vrednosti ^{14}C (Mook, 2006). Na slici 5.17. prikazana je kriva raspada tricijuma kroz vreme.

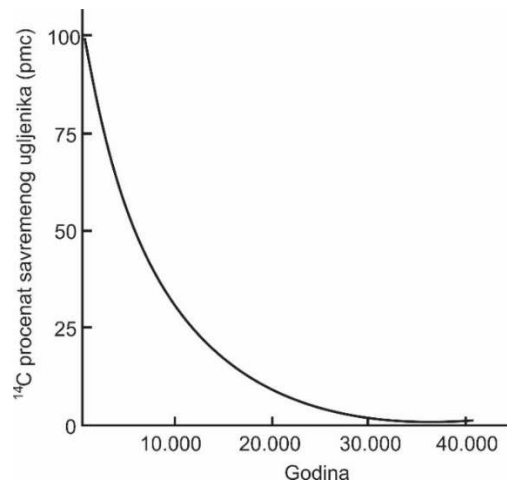


Slika 5.17. Kriva raspada tricijuma (Modifikovano: Mazor, 2004)

5.3.1.10. Radioaktivni izotop ^{14}C

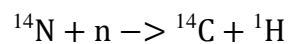
U prirodi se izotop ugljenika javlja u tri oblika. Veoma redak, težak radioaktivni izotop ^{14}C , je nestabilan i podleže raspadanju, pri čemu se raspada na azot ^{14}N , uz emitovanje beta čestica negativnog naelektrisanja. Vreme poluraspada izotopa ^{14}C iznosi 5730 godina.

Vrednosti raspadanja radioaktivnog izotopa ^{14}C mogu se videti na dijagramu koji prikazuje krivu radioaktivnog raspada izotopa ^{14}C (slika 5.18.).

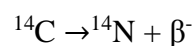


Slika 5.18. Kriva raspada ugljenika ^{14}C (Modifikovano: Mazor, 2004)

Nastanak izotopa ^{14}C u prirodi može biti prirodnog i veštačkog porekla. Ugljenik ^{14}C se formira u gornjim delovima atmosfere iz sekundarnih neutrona nastalih interakcijom kosmičkih zraka sa atmosferom. Neutroni reaguju sa zastupljenim azotom:



Dalje se nastali izotop ^{14}C raspada uz emitovanje maksimalne β^- energije od 156 keV:



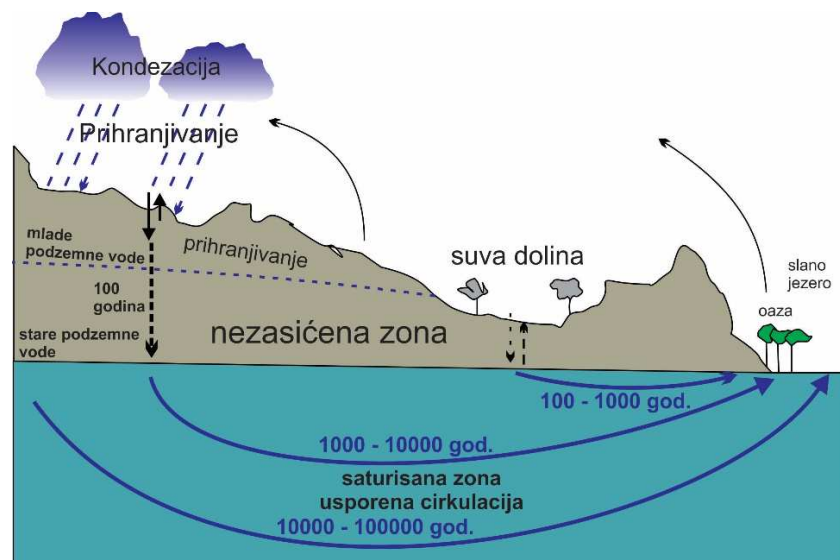
Koncentracija ugljenika ^{14}C se prema međunarodnom standardu izražava kroz odnos izotopa $^{14}\text{C} : ^{12}\text{C}$. Koncentracija ugljenika ^{14}C u masivnom ugljeniku iz standarda, definiše se kao 100 posto modernog ugljenika (pmC).

Procenom sastava izotopa ^{14}C u podzemnim vodama može se odrediti starost tih voda. Međutim, često geohemijski procesi koji se odvijaju u podzemlju imaju tendenciju da promene sadržaj ^{14}C i ublaže "starost" voda. Zato je neophodno da se radi korelacija starosti podzemnih voda dobijene preko izotopa ^{14}C , sa $\delta^{13}\text{C}$ vrednosti. Rasprostranjenje izotopa ^{13}C u stenama, organskim materijama, kao i u podzemnim vodama se izražava kroz odnos vrednosti $^{13}\text{C} : ^{12}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}$), sa standardnim uzorkom u promilima (PDB - a *Belemnite carbonate from the Pee Dee formation of South Carolina*).

5.3.1.11. Datiranje podzemnih voda

Poznavanje „starosti“ podzemnih voda je od velikog značaja za upravljanje ovim resursom. Na osnovu definisanja starosti određenih izotopa u vodi, koji nam ukazuju na starost tih voda, možemo zaključiti u kojoj meri je resurs koji želimo da koristimo obnovljiv, ili se radi o ograničenim dubokim izdanima i „geološkim“ rezervama, koje nemaju aktivnog kontakta sa atmosferskim vodama, kao ni sa vodama iz drugih rezervoara. Vode duboke cirkulacije mogu biti mešavina veoma starih voda i mlađih voda, pa detekcija i veoma malih količina mladih voda može biti značajna, jer daje uvid u postojanje hidrauličke veze sa aktivnim sistemom cirkulacije.

Voda, koja se infiltrira u podzemlje, može imati svoju relativnu starost i vreme zadržavanja u podzemlju. Pod starošću se podrazumeva vreme koje voda provede u stenskoj masi od trenutka poniranja u sistem do njenog uzorkovanja, bilo da se uzorkuje na tački prirodnog isticanja iz sistema, ili se uzorkovanje vrši na veštački izrađenom objektu (bušotina, bunar), gde se direktno uzima uzorak vode sa određene dubine (Dragišić & Živanović 2014). Prikaz starosti voda i zaleganja mladih i starih voda dat je na slici 5.19.



Slika 5.19. Starost voda i dubine zaleganja mladih i starih voda (modifikovano: Leis, 2007)

Pod pojmom *Vremena Zadržavanja u Podzemlju* (eng. *Mean Residence Time*) podrazumeva se vreme kretanja podzemnih voda kroz sistem od trenutka njenog infiltriranja u podzemlje (ponori, vrtače, pukotine), do ponovnog isticanja na površinu terena, bilo da se javlja na izvoru ili se uliva u druge površinske tokove ili stajaće vode (Clark & Fritz, 1999).

Sezonske varijacije stabilnih izotopa omogućavaju određivanje broja godina koje voda provede u podzemlju, ali bolji rezultati dobijaju se pri plitkom zaleganju voda, kao i u karstnim sistemima, gde cirkulacija može biti veoma brza, pa i vreme zadržavanja dosta kraće. Međutim, radioaktivni izotopi predstavljaju idealan i moćan alat za određivanje starosti voda i vremena koje voda provede u podzemlju. Podatak o vremenu poluraspada određenih izotopa, direktno daje odgovore koliko se ta voda zadržala u podzemlju. Obzirom da raspadanje pojedinih izotopa, naročito kada se radi o izotopima sa kratkim vremenom poluraspada, može početi i na površini zemlje, dok se voda još nije infiltrirala u sistem, te vrednost starosti ne možemo uzeti kao apsolutnu vrednost, već kao relativnu vrednost.

Mlađe, odnosno „moderne“ vode su one koje su se u podzemlje infiltrirale u nekoliko poslednjih decenija, pa tako aktivno učestvuju u ciklusu kruženja vode. Izotopi koji se mogu koristiti za određivanje ovog, relativno kratkog zadržavanja u podzemlju (u odnosu

na paleo vode), su kratko-živeći izotopi ^3H , ^{32}Si , ^{37}Ar , ^{85}Kr i ^{222}Rn , obzirom da je period njihovog poluraspada mali.

Pod paleovodama ili fosilnim vodama, podrazumevaju se vode koje su starije od „modernih“ voda. Fosilne vode su se infiltrirale u podzemlje pri klimatskim karakteristikama koje više ne postoje. Starost paleovoda može biti izazvana izrazito dugom cirkulacijom kroz podzemlje, malim brzinama, naročito ako su sistemi pukotina kroz koje se vode kreću malih dimenzija ili ako je rastojanje između zone prihranjivanja i isticanja veliko. Iako mnoge stare podzemne vode ne učestvuju u aktivnoj vodozameni, precrpljivanje voda iz izdani može izazvati priticanje iz susednih izdani, slabo povezanih izdani ili iz površinskih rezervoara. Izotopi koji se koriste za određivanje starosti paleovoda su dugo-živeći, odnosno izotopi koji imaju dugačak period poluraspada, a to su ^{14}C , ^{36}Cl , ^{39}Ar i ^{81}Kr (Clark & Fritz, 1999).

Izotopi sa dugačkim vremenom poluraspada se koriste kada rezultati testiranja tricijuma pokažu da voda ne sadrži ove izotope. Vode koje ne sadrže tricijum su infiltrirane pre više od 50 godina. Tada se koristi neki od izotopa za datiranje starih voda, najčešće izotop ugljenika ^{14}C koji u podzemne vode dospeva rastvaranjem neorganskog ili organskog ugljenika (DIC ili DOC).

Kada se prilikom istraživanja nekog sistema primeni više metoda, odnosno kada se izotopske metode upotpune informacijama o geohemijskim karakteristikama i o hidrodinamičkim procesima koji se dešavaju unutar jedne izdani, dobija se jasnija slika o funkcionisanju te izdani, kao i o starosti njenih voda.

Korišćenje tricijuma i ugljenika ^{14}C danas su postale konvencionalne metode za određivanje mlađih i starih podzemnih voda, ali je interval između ovih voda ostao sporan. Taj period od 50 do približno 1000 godina se može upotpuniti vremenom poluraspada ^{39}Ar , međutim ovaj metodski postupak je komplikovan, jer zahteva velike količine vode uzorka i komplikovano pripremanje uzorka za analiziranje, i ovako komplikovan postupak radi se samo u nekoliko laboratorija u svetu.

5.3.1.12. Mlade (moderne) vode

Klasičnim ispitivanjem voda, može se dobiti zaključak o tome kada su se mlađe vode infiltrirale u podzemlje. Metode kao što je monitoring podzemnih voda (kvantitet i kvalitet), hidrogeološko kartiranje, osmatranje zagađenja na izvorima, dobar su pokazatelj skorijeg prihranjivanja voda. Ipak, direktan odgovor na pitanje koliko su određene vode provele vremena u podzemlju najbolje daju izotopske metode (Clark & Fritz, 1999).

Datiranje preko stabilnih izotopa ^{18}O i 2H

Stabilni izotopi kiseonika i deuterijuma mogu se koristiti u proceni vremena zadržavanja voda u podzemlju. Zavisnost temperature i sadržaja izotopa u meteorskim vodama mogu dati uvid u kom se periodu godine izvršilo infiltriranje vode u podzemlje. Smanjenje sezonskih varijacija tokom infiltracije i cirkulacije podzemnih voda je funkcija fizičko-hidrauličkih parametara nezasićene zone i izdanske sredine. Step en ovog smanjenja proporcionalan je dužini cirkulacije kroz podzemlje srazmerno vremenu za koje se putovanje kroz sredinu odvija. Vreme se može odrediti na osnovu praćenja sezonskih promena u izotopskom sastavu voda u padavinama i u podzemnim vodama u toku najmanje jedne godine. Ulazni podatak padavina je pretpostavljen sinusoidalnom funkcijom, a smanjenje njegove amplitude u podzemnim vodama se može izraziti kao funkcija vremena sledećim jednačinama (Clark & Fritz, 1999):

u padavinama:

$$\delta_{\text{pad}}(t) = A \sin 2\pi t$$

u podzemnim vodama:

$$\delta_{\text{podzv}}(t) = B \sin (2\pi t + \alpha)$$

$\delta_{\text{pad}}(t)$ i $\delta_{\text{podzv}}(t)$ su ulazni i izlazni izotopski sastav u toku perioda t , a A i B predstavljaju amplitudu (‰) varijacija padavina i podzemnih voda, dok α predstavlja fazu pomeranja (pomaka) izlazne funkcije u odnosu na ulaznu funkciju. Smanjenje amplitude se definiše kao $C = B/A$, a srednje vreme zadržavanja vode (MNT) se može proračunati na osnovu

dve jednačine, jedne definisane od strane Burgmana, a druge od strane Stichlera (Clark & Fritz, 1999):

$$MNT = \frac{1}{2} \pi (1-C)^{1/2} / C \quad \text{Burgman et al. (1987)}$$

$$MNT = \tan \alpha / 2\pi \quad \text{Stichler (1980)}$$

Datiranje preko tricijuma³H

Izotop koji se najčešće koristi u cilju određivanja vremena zadržavanja u podzemlju, je tricijum koji zbog svog kratkog vremena poluživota i zbog svoje prirodne zastupljenosti u molekulu vode, odličan je pokazatelj skorijeg infiltriranja voda u podzemlje.

Metoda tricijuma se koristi za određivanje voda starih do 50, maksimum 60 godina. Takođe, na osnovu količine tricijuma u vodi, može se izvesti zaključak da se radi o mešanju voda, pa tako vrednost od ~ 1 TJ ukazuje na stare vode koje se mešaju sa mlađim vodama u blizini zone isticanja.

Clark & Fritz (1999) navode nekoliko mogućnosti datiranja podzemnih voda metodom tricijuma kroz kvalitativne i kvantitativne pristupe:

- ³H maksimum iz 1963 godine - vrši se detektovanje tricijuma preostalog od nuklearnog testiranja, na osnovu čega se određuje starost voda;
- Radioaktivni raspad – računanje vremena raspadanja na osnovu ulaznih vrednosti i vrednosti u trenutku merenja;
- Eksponencijalni model za ulaznu funkciju – određivanje smanjenja nivoa tricijuma pri prihranjivanju za određeni sistem podzemnih voda, i primena jednačine raspadanja;
- Analiza vremenskih serija – ponavljanje uzorkovanja na određenim tačkama za duži vremenski period;
- Kvalitativna interpretacija - detektovanje ³H ≡ komponenta modernog prihranjivanja.

Isti autori daju vrednost tricijumovih jedinica, na osnovu čega se može izvesti zaključak koliko godina može biti „stara“ voda (tabela 16).

Tabela 16. Procena starosti podzemnih voda na osnovu sadržaja tricijuma

Za kontinentalne predele:
T < 0.8 TJ – “submoderne“ vode starije od 1952. godine;
0.8 - 4 TJ – mešavina između submodernih i skorije infiltriranih voda;
5 - 15 TJ – moderne vode stare od 5-10 godina;
15 - 30 TJ – zbog nečega je preterano povećan tricijum (može da ukazuje na zagađenje);
30 – 50TJ – vode između 1960-70. godine;
> 50 TJ – dominantno prihranjivanje u toku 1960-ih godina.
Za obalski region i manje nadmorske širine:
< 0.8 TJ– submoderne vode starije od 1952. godine;
0.8 - 2 TJ– mešavina između submodernih i skorije infiltriranih voda;
2 - 8 TJ– moderne vode stare od 5-10 godina;
10 – 20 – preostali sadržaj od 3H „testiranja bombi“;
> 20 – vode između 1960-70. godine.

T - ³He metod datiranja

Metod određivanja vremena boravka vode u podzemlju tricijumom zastupljen je veoma dugo, međutim, Mazor (2004) navodi da i ovaj metod ima nekoliko nedostataka kao što su:

- mere se koncentracije tricijuma koje su ostale u uzorku, dok se inicijalna vrednost tricijuma preuzima iz evidencije o sadržaju tricijuma u atmosferi, koja se drastično menja iz godine u godinu;
- obrasci mešanja starih i novijih podzemnih voda su nedovoljno poznati i veoma složeni;
- koncentracija tricijuma u atmosferi i padavinama se skoro vratila niskim prirodnim koncentracijama, kao i koncentracije tricijuma u podzemnim vodama,

što predstavlja dobru vest sa ekološke tačke gledišta, ali ne i za buduće istraživanje podzemnih voda.

Sagledavajući ove nedostatke, naučnici Tolstikhin & Kamensky su 1969. godine došli na ideju da se uvede novija metoda koja će pratiti metod datiranja tricijumom, merenjem ^3He , produkta raspadanja tricijuma, kao zamena za njegovu početnu vrednost. Helijum, koji nastaje raspadanjem tricijuma, zastupljen je u vodi kao i sadržaj raspadnutog tricijuma, tako da njihov odnos $^3\text{H}:^3\text{He}$ u vodi opada sa godinama. Kako bi se olakšalo proračunavanje, oba izotopa se izražavaju kroz jedinicu odnosa tricijuma, odnosno $^3\text{H}:^3\text{H}$ i $^3\text{He}:^3\text{H}$ prema 10^{-18} (Mazor, 2004).

Starost podzemnih voda, može se utvrditi merenjem koncentracije izotopa tricijuma, koji su preostali u uzorku, koncentracija ^3He akumuliranih u uzorku, i poznavanjem vremena poluraspada tricijuma (12.3 godina) (Schlosser *et al*, 1988).

Datiranje podzemnih voda detaljno su prikazali Clark & Fritz (1999), a proračun je dat dalje u tekstu. Raspadanje početnih vrednosti tricijuma $^3\text{H}_0$ nakon vremena t se dobija preko jednačine:

$$^3\text{H}_t = ^3\text{H}_0 e^{-\lambda t}$$

Kako bi se odredilo vreme raspadanja t , neopodno je da poznajemo vrednost $^3\text{H}_0$. Raspadanje tricijuma vodi do porasta vrednosti helijuma $^3\text{He}_t$, koji iznosi:

$$^3\text{He}_t = ^3\text{H}_0 (1 - e^{-\lambda t})$$

Kada se dobiju ove dve jednačine, ulazne koncentracije tricijuma se mogu zaobići:

$$^3\text{He}_t = ^3\text{H}_t (e^{-\lambda t} - 1)$$

Koncentracije helijuma u vodi moraju se ispraviti u odnosu na atmosferski helijum, koji je rastvoren u trenutku infiltriranja u pozdeplje.

Dalje, na osnovu izmerene vrednosti helijuma ispravljene sa atmosferskim helijumom, dobija se porast tricijuma nastao raspadanjem ^3H , što se zatim koristi za proračun datiranja:

$$t = 12.43/\ln 2 \cdot \ln (1 + [^3\text{He}_t]/[^3\text{H}_t])$$

Odnos $[3He_t]/[3H_t]$ predstavlja odnos koncentracija ovih izotopa prikazanih u TJ (Clark & Fritz, 1999).

Iako je primena ove metode datiranja podzemnih voda našla značajnu primenu u hidrogeologiji, neophodno je navesti njene prednosti i mane, na osnovu čega se može pristupiti primeni metode ili zameni sa nekom drugom, pristupačnijom metodom ispitivanja starosti voda.

Prednosti:

- metoda je vrlo precizna (meseći)
- pouzdana, nema bojazni od zagađenja

Nedostaci:

- zahteva sofisticirani He-maseni spektrometar
- zahteva dva merenja (3H i 4He)
- dosta visoke cene analiza, koje može da radi samo manji broj laboratorija.

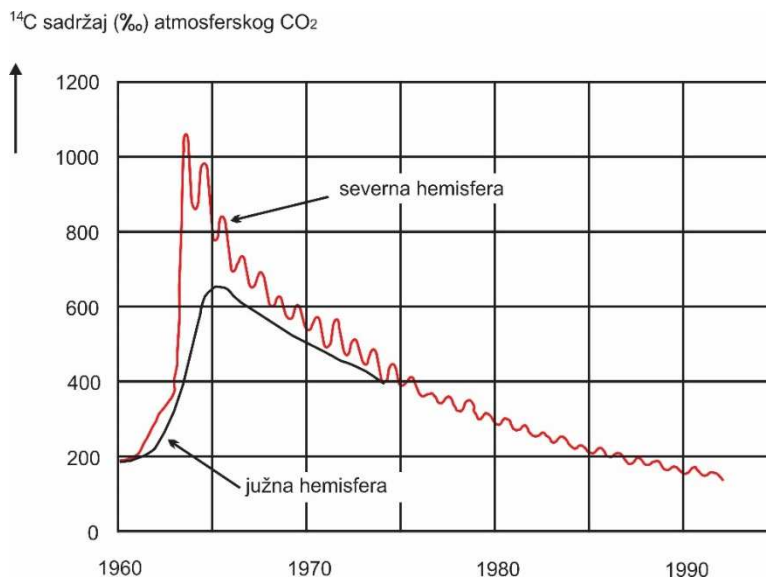
5.3.1.13. Datiranje starih (paleo) voda

Ukoliko se nekom od metoda datiranja ustanovi da se radi o veoma starim vodama, koje nemaju aktivan doticaj iz atmosfere, zbog ograničenog korišćenja, ne tako brzo obnovljivog resursa, mogu nastati mnogi sociološki problemi oko raspodele vode, kao i politički konflikti (Clark & Fritz, 1999).

Metod datiranja voda ugljenikom ^{14}C

Primena metode datiranja izotopom ^{14}C počela je otkrićem vremena njegovog poluraspada 1946. godine (Clark & Fritz, 1999). Jedinjenje CO_2 je veoma zastupljeno, kako u atmosferi, tako i u biosferi, zemljištu i vodama. Određivanje starosti podzemnih voda metodom izotopa ^{14}C najbolje rezultate će dati ukoliko se primeni zajedno sa hidrogeološkim i hemijskim analizama i kroz serijsko uzimanje uzoraka. Ugljenik ^{14}C nastaje kosmičkom reakcijom i kao takav dolazi u kontakt sa svom živom materijom koja se nalazi na Zemlji, kao što su biljke ili životinje koje jedu biljke.

imala porast ovog izotopa i u podzemnim vodama, prikazan je na slici 5.21. Lokalno povećanje atmosferskog ^{14}C uočava se i u blizini nuklearnih elektrana.



Slika 5.21. Porast sadržaja ugljenika u atmosferi (posledično u podzemnim vodama), kao posledica testiranja nuklearnim bombama (modifikovano: Mook, 2000)

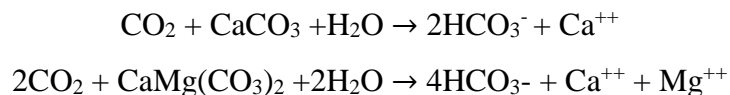
Kada voda koja sadrži ugljenik ^{14}C dospe u zasićenu zonu i postane izolovana od atmosfere, ugljenik ^{14}C počinje da se raspada i prelazi u azot. Međutim, sadržaj ugljenika ^{14}C u podzemnoj vodi može se promeniti i usled geohemijskih reakcija koje se dešavaju prilikom kontakta voda-stena. Kada voda postane izolovana od drugih izvora ugljenika, na osnovu preostalih atoma izotopa ^{14}C se može odrediti starost voda (Clark & Fritz, 1999).

Izvlačenjem karbonata iz uzorka, kako bi se odredila starost voda, merenje može obezbediti informacije o prihranjivanju podzemnih voda, kao i smer cirkulacije i količine vode, što se može dobiti za uzorke starosti od 10 - 40 000 godina.

Ukoliko izdan sadrži fosilni ugljenik, kao što je treset ili mrki ugalj, datiranje ugljenikom ^{14}C može dati nesigurne podatke, pa bi u ovakvim izdanima trebalo primeniti drugi metod datiranja.

Rastvoreni ugljen-dioksid može “pokupiti” ugljenik iz stene zastupljene u izdani preko hemijskih reakcija. Materijali matične stene izazivaju slabljenje originalnog ugljenikovog sadržaja. Važno je napomenuti da je ovaj efekat razblaživanja nastao od materijala matične stene odvija samo u jednom smeru – što će imati za posledicu stariji ugljenik. Stoga, prividne godine voda se mogu uzeti kao maksimalne godine.

Najzastupljenije jednačine matričnog razblažavanja su kalcit ili dolomit:



Fosilni ugljenik iz kalcita ili dolomita u izdani bi doprineo polovini sadržaja bikarbonatnih jona. Ove reakcije obično ne idu do kraja, ali kada bi se odvijale, u tom slučaju bi tačno polovina DIC u vodama imale poreklo od fosilnog izvora.

Eliminisanjem faktora rastvaranja, smanjenje sadržaja originalnog ugljenika bi potencijalno omogućilo proračun prividne starosti podzemnih voda, što je vreme koje prođe od kada originalna voda uđe u sistem i transportuje se do izlaza iz podzemlja, odnosno vreme zadržavanja u podzemlju (www.radiocarbon.com).

Ukoliko je poznato vreme poluraspada, starost uzoraka zemljišta se može dobiti na osnovu merenja aktivnosti, gde je ^{14}A aktivnost u vreme raspadanja, a $^{14}\text{A}^{\text{inicijalni}}$ poznata vrednost (Mook, 2000):

$$T = - (T_{1/2}/\ln 2) (\ln (^{14}\text{A}/^{14}\text{A}^{\text{inicijalni}}))$$

$T_{1/2}$, $^{14}\text{A}^{\text{i}}$ i ^{14}A su parametri koji treba da se odrede, dok je \ln prirodni logaritam. Inicijalna aktivnost je jednaka izabranoj standardnoj aktivnosti u 1950. godini, aktivnost ^{14}C mora biti izbalansirana u odnosu na frakcionaciju, to rezultuje sledećom jednačinom:

$$T = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \ln \frac{^{14}\text{A}_{\text{uzorak}}}{^{14}\text{A}_{\text{standard}}} = - \frac{5568}{0.693} \ln \frac{^{14}\text{A}_0 \text{ uzorak}}{^{14}\text{A}_0 \text{ standard}} = - 8033 \ln ^{14}\alpha_{\text{uzorak}}$$

Ovakav rezultat se naziva konvencionalnom ^{14}C starosti voda PS (pre sadašnjosti, odnosno pre 1950 godine) (Mook, 2000).

Ukoliko znamo početnu koncentraciju ^{14}C ($^{14}\alpha^i$) i ukoliko u sistem ne dospevaju nove koncentracije ugljenika, niti se gube postojeće, starost voda se može proračunati na sledeći način (Mook, 2000):

$$T = -8267 \ln \left[\frac{(^{14}\text{A}/^{14}\text{A}^0_{\text{standard}})}{(^{14}\text{A}/^{14}\text{A}^0_{\text{standard}})} \right] = -8267 \ln (^{14}\alpha/^{14}\alpha^i)$$

Kako bi se prividna starost podzemnih voda prevela u što tačniju vrednost, u poslednjih 30 godina se koriste korekzione metode, kao što je statistički model, model mešanja, alkalna korekcija, hemijska maseno-balansna korekcija i model izmene sa matriksom, na osnovu kojih se koriguju različiti procesi rastvaranja.

Poznavanjem vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ u vodi, steni i zemljištu, mogu se dobiti preciznije vrednosti starosti voda. Sadržaj $\delta^{13}\text{C}$ u vodi i steni se uglavnom dobija laboratorijskom analizom, ili se sadržaj u steni procenjuje da je približno jednak 0, ukoliko ne postoje rezultati sadržaja $\delta^{13}\text{C}$ u steni sa terena. Sadržaj $\delta^{13}\text{C}$ vrednosti u zemljištu se utvrđuje na osnovu tipa zemljišta koji vlada u zoni prihranjivanja podzemnih voda i obeležavaju se indeksom C. Na karstnim terenima uglavnom preovlađuju faktori zemljišta sa C3 i C4, gde C3 ukazuje na postojanje različitog rastinja, dok C4 ukazuje na travnatu površinu. Vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ prema ovim tipovima zemljišta iznosi:

C4 faktor ima $\delta^{13}\text{C}$ zemljišnom gasu $\approx (-16) - (-12) \text{ ‰}$

C3 faktor ima $\delta^{13}\text{C}$ zemljišnom gasu $\approx (-25) - (-20) \text{ ‰}$

Jednačina proračuna starosti voda, koja uključuje sve $\delta^{13}\text{C}$ vrednosti je:

$$T = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{^{14}\text{C}_{\text{početni}}}{^{14}\text{C}_{\text{izmeren}}} \times \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{uzorak}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{stena}}}{\delta^{13}\text{C}_{\text{zemljište}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{stena}}} \right)$$

5.3.1.14. *Primenjene terenske i laboratorijske metode u okviru izotopskog metodološkog postupka*

Uzorkovanje vode za izradu analiza sadržaja stabilnih i radioaktivnih izotopa vode vršeno je pomoću boca određene zapremine (^{18}O , ^2H , ^{13}C , T i ^{14}C), čiji odabir i priprema iziskuje posebnu pažnju, kao i sam metod uzorkovanja.

Za uzorkovanje vode za izradu analiza stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H , korišćene su bočice zapremine 30 ml, izrađene od posebne plastike koja sprečava izotopsku frakcionaciju sa bocom, kao i sa specijalno dizajniranim čepom da istisne višak vazduha i vode, i na taj način hermetički zatvara bocu, čime sprečava dalji kontakt uzorka vode sa vazduhom. Prilikom uzorkovanja bočica se zaranjana dublje ispod površine, gde je nakon punjenja boce i zatvarana pod vodom (slika 5.22.), kako bi se izbeglo zadržavanje vazdušnog mehura i izotopske frakcionacije unutar boce. Uzorkovanje vode za utvrđivanje sadržaja stabilnog izotopa ^{13}C , vršeno je plastičnom bočicom od 250 ml, sa običnim čepom.



Slika 5.22. Zahvatanje vode i zatvaranje boce pod vodom (foto: M. Kličković)

Bočice su pripremane tako što su punjene do vrha rastvorom HCl i vode i nakon 24 sata ispirane destilovanom vodom. Ovako sterilisana bočica je sušena u sterilizatoru 24 sata, nakon čega je bila spremna za uzorkovanje.

Priprema uzorka vode za izdvajanje CaCO_3 taloga za analiziranje sadržaja stabilnih izotopa ^{13}C , vršena je u Laboratoriji Centra za hidrogeologiju karsta, Rudarsko-geološkog fakulteta. Po uzimanju uzorka vode, na terenu se u uzorak dodaje NaOH u količini

dovoljnoj da se pH vrednost uzorka ne poveća na 12. Kada se postigne ova vrednost, u uzorak se dodaje 90 gr BaCl_2 (36 gr na 100 ml vode) (slika 5.23.). Ovako pripremljen uzorak se zapečati i nakon 24 sata spreman je da se vakum pumpom filtrira mikrometrijski kvarcni filter sa posudom za vakumsko filtriranje i filter čije pore iznose $0.45 \mu\text{m}$. Odvojeni talog CaCO_3 se suši u sterilizatoru 24 sata, nakon čega se uzorak prosleđuje dalje na analizu.



Slika 5.23. Dodavanje BaCl_2 u bočicu sa uzorkom vode (foto: S. Milanović)

Za potrebe sakupljanja padavina i formiranja lokalne izotopske meteorske linije na istražnom prostoru, u okviru Centra za hidrogeologiju karsta, dizajniran je i izrađen specijalni kišni kolektor „RainCo“ (slika 5.24.). Uređaj je izrađen tako da se izbegne isparavanje vode iz kolektora, kao i da se onemogući izotopska frakcionacija unutar samog kolektora. To je postignuto postavljanjem nepovratnog ventila na dnu levka, što predstavlja prvu preventivnu meru sprečavanja isparavanja kišnice iz kanistera.

Izbegavanje procesa izotopske frakcionacije u samom kanisteru, postignuto je dodavanjem određene količine mineralnog ulja, odnosno količine koja je potrebna da prekrije dno kanistera, kako bi predstavljala zaštitni film na površini vode i tako sprečila izotopsku frakcionaciju sa vazduhom unutar kanistera. Isparavanje sa vodene površine, kao i interakcija vode sa vazduhom unutar kanistera je na ovaj način isključeno. Na kraju svakog meseca, ukoliko je bilo padavina, voda je presipana u bočice.



Slika 5.24. Kišni kolektor RainCo

Uređaji su postavljeni na tri lokacije – Busovata, Velika Brezovica i Strmosten, i pražnjeni svakog meseca, odnosno analiziran je sadržaj stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H u uzorku ukupnih mesečnih kiša. U zimskom periodu vršeno je i uzorkovanje snega radi utvrđivanja sadržaj stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H (na početku i na kraju zimske sezone), slika 5.25. a i b.



Slika 5.25. Sakupljanje snega na: a) početku zime (foto: M. Kličković); b) kraju zime (snežni zaostatak) (foto: S. Milanović)

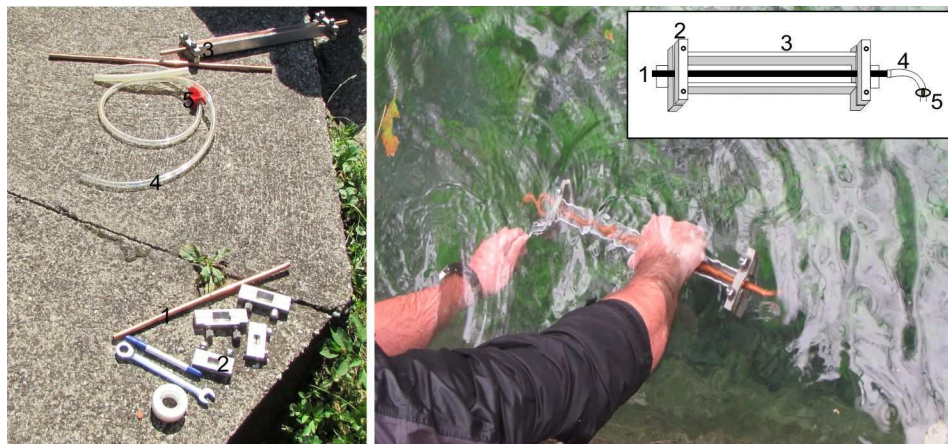
Analiziranje sadržaja stabilnih izotopa vode $^2\text{H}/^1\text{H}$ $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ i $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, izražene kao $\delta^2\text{H}$ i $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^{13}\text{C}$, vršeno je u Internacionalnom centru za karst IRCK (*International research centre for karst*), Guilin, Kina. Analiziranje uzoraka za utvrđivanje sadržaja stabilnih izotopa izvršeno je na masenom spektrometru „CYC analytics mass spectrometer GC PAL“ (slike 5.26. i 5.27.).



Slike 5.26. i 5.27. Laboratorija u Kini (uređaji za analizu sadržaja stabilnih izotopa)
Određivanje sadržaja T, T+³He i ¹⁴C u uzorcima vode, izvršeno je u Institutu za nuklearnu fiziku u Mađarskoj (Debrecin) „*Institute for Nuclear Research, Hungarian Academy of Sciences – MTA ATOMKI*“. Za uzorkovanje vode za analizu T i ¹⁴C korišćene su staklene boce 1L (slika 5.28.), dok je uzorkovanje vode za utvrđivanje sadržaja T+³He, kao i za sadržaj plemenitih gasova u vodi, korišćen uzorkivač za plemenite gasove sa bakarnim cevima (slika 5.29.).



Slika 5.28. Uzorkovanje vode za analizu tricijuma (foto: S. Milanović)



Slika 5.29. Uzorkivač za plemenite gasove, 1 – bakarna cev za jednokratnu upotrebu zapremine 40 ml, 2 – stega – zatvarač bakarne cevi sa vijcima za zatezanje, 3 – konstrukcija uzorkivača, 4 – vakum crevo i 5 – vakum ventil, (služe da bi se vijci mogli zatezati iznad vode, a da ne dođe do curenja vode iz bakarne cevi)

Priprema uzorka za analizu tricijuma rađena je u Laboratoriji „ATOMKI“, gde je i vršeno utvrđivanje sadržaja tricijuma i $T+^3\text{He}$ u uzorcima na uređaju VG5400 *noble gas mass spectrometer*, a laboratorijska oprema za pripremu uzorka, kao i uređaj za analiziranje sadržaja tricijuma, $T+^3\text{He}$ i plemenitih gasova, prikazani su na slici 5.30. a i b. Analiziranje sadržaja izotopa ^{14}C vršeno je na MICADAS *accelerator mass spectrometer*-u, u okviru iste laboratorije.



Slika 5.30. a) Priprema uzorka za analiziranje sadržaja tricijuma i $T+^3\text{He}$; b) uređaj VG5400 *noble gas mass spectrometer* za analiziranje sadržaja tricijuma i $T+^3\text{He}$

5.3.2. Hidrohemijske metode istraživanja

Utvrdjivanje hidrohemijskih karakteristika voda od velikog je značaja za definisanje geneze podzemnih voda, kao i za procenu njihovog vremena boravka u podzemlju i stepenu interakcije stenom. Hemijski sastav toplih i hladnih voda može ukazati na različite uslove formiranja, odnosno na kontakte vode sa različitim tipovima stena, duži boravak u podzemlju, kao i na drugačije fizičko-hemijske procese, koji se odvijaju u različitim temperaturnim uslovima. Ovaj metodološki postupak predstavlja nezaobilazan prateći postupak izotopskim analizama, čijom se sveobuhvatnom interpretacijom podataka dobijaju precizniji odgovori na pitanja uslova formiranja podzemnih voda.

Hemijski sastav padavina i površinskih voda predstavlja početni hemijski sastav voda formiran na ulazu u podzemni sistem. Kada voda uđe u podzemlje, dalje se njen sastav menja u velikoj meri i u zavisnosti od brzine kretanja, poroznosti i vodopropusnosti vodonosnih stena, odnosno vremena kontakta između stene i podzemne vode. Takođe, na hemijski sastav voda veliki uticaj ima i rastvorljivost stene sa kojom je voda u kontaktu. Izučavanje istorije formiranja hemijskog sastava podzemnih voda zahteva multidisciplinarni pristup istraživanja, a Komatina (1984) navodi da se posebna pažnja mora posvetiti ulozi prirodnih faktora, kao što su klimatsko-morfološki, strukturno tektonski i termodinamički, te litološko-geohemijskih odlika i filtracionih karakteristika stena, zakonomernosti raspodele jona u vodama različitog sastava, fizičko-hemijskim procesima i migraciji elemenata. Krajni rezultat, ovakvog sveobuhvatnog istraživanja, je klasifikacija podzemnih voda na osnovu uslova formiranja hemijskog sastava.

Pinneker (1985) navodi da među procese koji kontrolišu hemijski sastav podzemnih voda spadaju procesi, koji se odvijaju za vreme filtracije voda (molekularna difuzija, filtracija), procesi izmene rastvorene supstance (hidroliza, rastvaranje), zatim procesi rastvaranja sa uklanjanjem supstanci iz rastvora, kao što je taloženje, sorpcija, proces stvaranja nove supstance (jonska izmena, oksido redukciona reakcija, biogeohemijska reakcija, radioaktivno raspadanje) i proces dopunskog dodavanja ili uklanjanja molekula rastvora hidratacija ili dehidratacija minerala, potpovršinska evaporacija, zamrzavanje. Osim ovih procesa, do uvećanja ili smanjenja koncentracije rastvorenih materija u podzemnim

vodama dolazi rezultatom mešanja voda različitih vodonosnih horizonata i podzemnih voda sa infiltriranim atmosferskim ili površinskim vodama. Intenzitet dejstva vode sa mineralima zavisi od kiselo-baznih uslova, brzine kretanja vode, sastava i strukturnih osobenosti stena (Stevanović & Papić, 2008). Faktori koji utiču na formiranje hemijskog sastava podzemnih voda prema Pinneker (1984), prikazani su u tabeli 17.

Tabela 17. Faktori formiranja hemijskog sastava podzemnih voda (prema: Pinneker, 1984, preuzeto od Stevanović & Papić, 2008)

Grupa faktora	Posebni faktori
Fizičko - geografski	Reljef
	Klima
	Hidrologija
	Raspadanje i cementacija
Geološki	Geološka struktura
	Tektonski pokreti
	Sastav stena
	Magmatizam
	Gasni faktor
Fizičko - hemijski	Hemijski sastav elemenata
	Rastvorljivost hemijskih jedinjenja
	Hemijski uslovi sredine
Fizički	Temperatura
	Pritisak
	Vreme
	Rastojanja
Biološki	Uslovi razvoja živog sveta (mikroorganizmi i dr.)
Antropogeni	Uslovi ljudske delatnosti (narušavanje prirodnog režima, zagađivanje)

Važnost ovog metodološkog postupka u proceni geneze podzemnih voda Kučajsko-beljaničkog masiva, uticala je na obim izvedenih istraživanja, kao i na odabir parametara koji su utvrđivani direktno na terenu, ili u laboratorijskim uslovima. Kako je jedan od pratećih ciljeva disertacije bio da se utvrdi izmena hemijskog sastava voda u pogledu osnovnih fizičko-hemijskih parametara i sadržaja jona od ulaska u sistem do njenog ponovnog javljanja na površini terena, kao i da se odredi rastvaračka moć vode i bogaćenje Ca^{2+} i HCO_3^- u hladnim i toplim vodama, na terenu su sprovedena ispitivanja osnovnih fizičko-hemijskih karakteristika voda i jonskog sastava na kvartalnom nivou.

Određivanju geneze toplih voda poseban značaj daju analize mikroelemenata koji ukazuju na geohemijske procese koji su se odvijali u podzemlju. Pod mikroelementima podrazumevaju se elementi, koji se u podzemnim vodama javljaju u koncentracijama manjim od 1 mg/l (Dimitrijević, 1988), koji, iako ne određuju hemijski tip voda, mogu imati uticaj na formiranje njihovih specifičnih osobina (Dragišić & Polomčić, 2009). U slučaju Kučajsko-beljaničkog masiva, gde se radi o tipičnim karstnim vodama, utvrđivanje sadržaja mikroelemenata u toplim i hladnim vodama sprovedeno je sa ciljem da se utvrdi koji se mikroelement javlja povišen u toplim vodama u odnosu na hladne, što bi vodilo ka zaključcima o vrsti stene sa kojom je topla voda bila u prolongiranom kontaktu, i koja moguće predstavlja grejno telo podzemnim vodama.

Sadržaj plemenitih gasova u prirodi zavisi od relativno jednostavnih i dobro poznatih fizičkih procesa, kao što su difuzija, deljenje između različitih faza, ili nuklearne transformacije, zbog čega su plemeniti gasovi odličan geohemijski “alat” za istraživanje različitih fizičkih parametara životne sredine i geoloških sistema (Aeschbach-Hertig, 1999). Odnos između $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ u padavinama i podzemnim vodama, sagledan zajedno sa rezultatima plemenitih gasova, daje uvid u paleoklimatske uslove, koji su vladali za vreme prihranjivanja izdani (Varsányi *et al*, 2011), odnosno na temperaturni režim vazduha, koji je vladao u tom periodu. Sadržaj plemenitih gasova rastvorenih u vodi u okviru zatvorenih ili poluzatvorenih izdani se ne menja, čak ni hiljadama godina, obzirom na njihovu inertnost prema hemijskim i biološkim procesima, ali mogu biti pod uticajem fizičkih procesa (radioaktivno raspadanje, difuzija, rastvorljivost), čije se posledice otklanjaju korišćenjem izotopskih odnosa. Zavisnost temperature od rastvorljivosti plemenitih gasova zapravo daje mogućnost da se utvrdi temperatura prihranjivanja. Temperatura plemenitih gasova (eng. *noble gas temperature*), zajedno sa podacima datiranja podzemnih voda, predstavlja dobar pokazatelj paleoklimatskih uslova, koji su vladali u određenom prostoru (Stute & Schlosser, 1993, Kipfer *et al*, 2002).

5.3.2.1. *Primenjene terenske i laboratorijske metode*

Utvrdjivanje hidrohemijjskih karakteristika voda Kučajsko-beljaničkog masiva sprovedeno je analiziranjem podataka dobijenih ispitivanjem fizičko-hemijjskih

karakteristika voda direktno na terenu, utvrđivanjem jonskog sastava voda, uključujući i padavine, u laboratorijskim uslovima, kao i utvrđivanjem određenih mikrokomponenti i sadržaja plemenitih gasova na odabranim lokacijama, takođe u laboratorijskim uslovima. Utvrđivanje fizičko-hemijskih parametara vršeno je *in situ* (slika 5.31.), na kvartalnom nivou terenski prenosivom laboratorijskom opremom, tokom jedne hidrološke godine na svim pojavama predviđenim doktorskom disertacijom. Tom prilikom su praćeni sledeći parametri: pH vrednost, temperatura (°C), rastvoreni kiseonik O₂ (mg/l), specifična provodljivost (µs/cm) i mutnoća (NTU).



Slika 5.31. Utvrđivanje fizičko-hemijskih parametara na vrelu Crnice *in situ*

Za *in-situ* merenja korišćene su WTW prenosne terenske laboratorije Centra za hidrogeologiju karsta, i to:

1. WTW pH-metar sa temperaturom - PH 340i/set
2. WTW konduktivimetar sa temperaturom -Cond 340i/set
3. WTW kiseonik sa temperaturom - Oxi 340i/set

U laboratoriji Internacionalnog centra za karst IRCK sprovedeno je ispitivanje jonskog sastava padavina, voda na ponoru, na izvorima (toplim, hladnim), kao i na određenim bušotinama. Za zahvatanje vode korišćene su male (30 ml) plastične boce, a u uzorcima je ispitivan sadržaj sledećih jona: Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺, Na⁺, F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, izraženih u mg/l. Analiziranje sadržaja jona vršeno je na jonskom hromatografu.

Takođe, uzorkovanje vode radi utvrđivanja sadržaja mikroelemenata na određenim uzorcima tople i hladne vode (ukupno 12 uzoraka) izvedeno je jedanput, pri čemu su ispitivani sadržaji sledećih mikroelemenata: Fe, Mn, Cr, Sr, Li, Zn, Cu, As, Ni, P i Si.

Elementi su izraženi u $\mu\text{g/l}$, izuzev Si, koji je izražen u mg/l . Analiziranje mikroelemenata obavljeno je u Laboratoriji Hemijskog fakulteta.

Utvrđivanje sadržaja plemenitih gasova vršeno je na ukupno 10 uzoraka. Uzorak vode uziman je pomenutim uređajem za uzorkovanje plemenitih gasova sa bakarnim cevima (slika 5.32), direktno u zoni isticanja vode iz podzemlja. Voda se pomoću creva uvlači u bakarne cevi, koje se nakon toga ključem stežu sa dve strane, nakon čega uzorak vode, koji je u cevi, postaje hermetički izolovan od vazduha. U uzorcima su utvrđivani sadržaji He, Ne, Ar, Kr, Xe i $^3\text{He}/^4\text{He}$ plemenitih gasova. Analiziranje uzoraka vršeno je u Mađarskoj u laboratoriji Instituta „ATOMKI“, na uređaju VG5400 *noble gas mass spectrometer*.



Slika 5.32. Uzorkovanje vode za analizu sadržaja plemenitih gasova

5.3.3. Negeološke metode - Meteorološki i hidrološki metod istraživanja

Osmatranje klimatoloških i hidroloških parametara sprovedeno je u cilju utvrđivanja količina voda koje prihranjuju podzemne vode, kao i količina voda koje dreniraju karstnu izdan. Ovi podaci su od velikog značaja pri tumačenju izotopskih karakteristika podzemnih voda, obzirom da sadržaj izotopa u padavinama varira sezonski, sa izraženim količinskim i temperaturnim efektima izmene izotopskog sastava (pogledaj poglavlje 5.3.1.6). Takođe, temperatura vazduha ima velikog uticaja na primarnu izotopsku frakcionaciju u vodama površinskih tokova koji poniru u karstni sistem, što može uticati

na drugačiji izotopski sastav u vodama na vrelima, a takođe nam daje uvid i u srednje vreme zadržavanja voda u podzemlju.

U svrhu utvrđivanja klimatoloških parametara razmatrani su istorijski podaci raspoloživih klimatoloških i kišomernih stanica (Crni Vrh, Žagubica i Ćuprija). Za podatke dnevnih količina padavina i temperatura za 2014-2015. godinu za Crni Vrh i Ćupriju, korišćeni su podaci sajta *Ogimet*. U okviru projekta monitoringa zaštićenih prirodnih dobara od strane Ministarstva za zaštitu životne sredine (CKH), postavljena je klimatološka monitoring stanica na Beljanici, odnosno na izvorištu Belosavac (slika 5.33. a i b), gde se od maja meseca 2015. godine vrši osmatranje padavina i temperature, pa su prilikom razmatranja klimatoloških parametara i ovi podaci uzeti u analizu (vidi poglavlje o hidrometeorološkim karakteristikama).



Slika 5.33. a) Digitalni kišomer sa logerom (*Delta Ohm*, Italija). b) Digitalni loger temperature (*MicroLite*) sa autonomijom baterije do dve godine uz mogućnost memorisanja 32 000 podataka

U cilju utvrđivanja količina voda koje poniru na ponorima, kao i količina koje ističu na vrelima i izvorima, hidrometrijskim krilom je na kvartalnom nivou vršeno merenje proticaja voda (slika 5.34.). Na određenim vrelima je od strane Centra za hidrogeologiju karsta već uspostavljen kvalitativni monitoring podzemnih voda (Mlava, Belosavac, Krupajsko i Veliko vrelo), pa su količine voda koje ističu na vrelima praćene i dalje na dnevnom nivou. Hidrometrijsko krilo koje je korišćeno u ove svrhe je Hidrometrijsko krilo - *Qurent meter - Seba Hydrometrie Z6* (Centar za hidrogeologiju karsta).



Slika 5.34. Merenje proticaja na vrelu Grze

5.3.4. Geohemijske metode istraživanja

Geohemijske metode istraživanja su u tesnoj vezi sa izotopskim i hirohemijskim metodama istraživanja i kao takve su našle mesto u istraživanjima za potrebe definisanja geneze podzemnih voda. Jović & Jovanović (2004) navode da prema opšteprihvaćenoj definiciji, geohemija predstavlja nauku koja se bavi određivanjem relativne i apsolutne zastupljenosti hemijskih elemenata i njihovih izotopa, raspodelom elemenata u različitim sferama Zemlje (litosferi, hidrosferi, biosferi i atmosferi) i otkrivanjem zakona i principa koji upravljaju odnosima i raspodelom elemenata, pa je očigledno da se kao takva, geohemija ne može zamisliti bez analiza sadržaja hemijskih elemenata i njihovih izotopa u različitim prirodnim materijalima.

U okviru geohemijskih istraživanja, vršeno je razmatranje hidrogeohemijskih uslova formiranja podzemnih voda, kao i uticaja određenih vrsta stena na formiranje hemijskog sastava vode. Za potrebe korekcije proračuna starosti voda metodom ^{14}C , utvrđen je izotopski sastav stene (^{13}C) na uzorcima uzetim na ulazu i izlazu iz karstnog sistema.

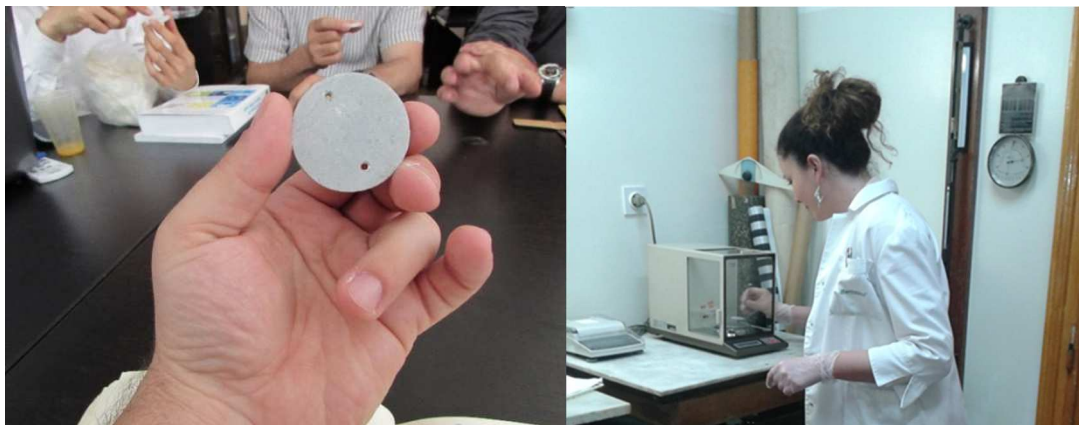
Takođe, razmatrana je brzina rastvaranja krečnjačkih pločica, postavljenih u hladnim i toplim vodama, sa ciljem da se utvrdi brzina rastvaranja krečnjaka u različitim temperaturnim i hidrohemijskim uslovima vode, odnosno na različitim dubinama proučavanih kompleksnih karstnih sistema. U cilju sagledavanja procesa karstifikacije,

odnosno spuštanja erozionog bazisa i prestanka cirkulacije podzemnih voda u višim zonama karstnih kanala, izvršeno je ispitivanje starosti stalagmita.

5.3.4.1. *Primenjene terenske i laboratorijske metode*

Određivanje sadržaja izotopa ^{13}C u steni izvršeno je na 28 uzoraka uzetih na ulazu i izlazu iz karstnog sistema. Priprema i analiziranje uzoraka izvedeno je u laboratoriji IRCK.

Karbonatne pločice (slika 5.35.) čistog krečnjaka ($100\% \text{CaCO}_3$) devonske starosti (Kina), postavljene su na terenu u cilju da se utvrdi brzina rastvaranja krečnjaka u realnim uslovima, a što se može povezati sa brzinom rastvaranja krečnjaka, odnosno sa procesom karstifikacije. Pločice su premerene na analitičkoj vagi Radwag : 0.01 mg, Centra za hidrogeologiju karsta (slika 5.36.).



Slika 5.35. Karbonatna pločica devonske starosti, Slika 5.36. Merenje pločice na analitičkoj vagi

Pločice su postavljene na površini terena, kako bi se odredilo rastvaranje krečnjaka na samoj površini terena, zatim u zemljištu na dubini od 10, 20, 30, 40 i 50 cm. Takođe, pločice su postavljene na drvetu, u izvorima sa hladnom i toplom vodom, u ponornicama i u pećini (u vodi i na vazduhu) Beljaničkog masiva. Nakon godinu i po dana, pločice su premerene u laboratoriji na analitičkoj vagi. Postavljanje i vađenje pločica prikazano je na fotografijama 5.37-5.43.



Slike 5.37. i 5.38. Levo: postavljanje pločice u izvor; desno: pločica na površini terena



Slike 5.39. i 5.40. Postavljanje pločica u zemlju na karstnom terenu



Slike 5.41 i 5.42. Pločice nakon 18 meseci (levo: termalni izvor na Krupaji; desno: naslage mladog bigra na Malom vrelu)



Slika 5.43. Pločica u pećini u vazduhu i u vodi

Za potrebe datiranja stalagmita i paleorekonstrukcije uslova koji su vladali u prošlosti, izvršeno je uzorkovanje dva stalagmita koji su poslani na analiziranje u laboratoriju IRCK. Jedan stalagmit je uzorkovan u Bogovinskoj pećini na Kučaju (slika 5.44.), drugi u pećini Velika Atula na Beljanici. U analizi su korišćene konstante raspada za uranijum i torijum:

$$\text{Za U } \lambda_{238} = 1.55125 \times 10^{-10} \text{ (Jaffey et al., 1971)}$$

$$\text{Za U } \lambda_{234} = 2.82206 \times 10^{-6} \text{ (Cheng et al., 2013) i}$$

$$\text{Za Th } \lambda_{230} = 9.1705 \times 10^{-6} \text{ (Cheng et al., 2013)}$$

Za proračun $\delta^{234}\text{U}$ korišćena je formula:

$$\delta^{234}\text{U} = ([^{234}\text{U}/^{238}\text{U}]_{\text{aktivnost}} - 1) \times 1000$$

Dok se proračun inicijalnog uranijuma, odnosno $\delta^{234}\text{U}_{\text{inicijalni}}$, vršilo jednačinom preko ^{230}Th godina, odnosno

$$\delta^{234}\text{U}_{\text{inicijalni}} = d^{234}\text{U}_{\text{izmereni}} \times e^{1234 \times T}$$

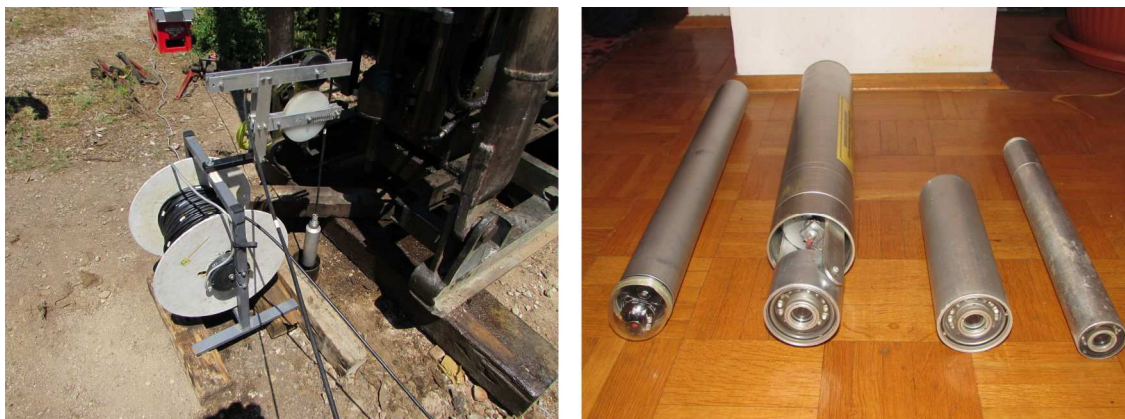


Slika 5.44. Pripremljen stalagmit iz Bogovinske pećine za datiranje

5.3.5. Videoendoskopija i reinterpretacija karotažnih merenja

Na istražnom području je sprovedena videoendoskopija bušotine B-1, kao i reinterpretacija već postojećih karotažnih merenja. Snimanje bušotine izvedeno je za potrebe definisanja karstifikacije stenske mase, zona u kojima se javljaju pukotine i kaverne, kao i definisanje zona priliva toplih voda u bušotinu. Nažalost, veliki broj bušotina na istražnom prostoru je zacevljen, zaključan ili kaptiran za vodosabdevanje, pa snimanje nije bilo moguće. Podatke o karstifikaciji i zonama intenzivnije karstifikacije, kao i informacije o prilivu i temperaturama voda u bušotinama, analiziran je i kroz karotažna merenja, pa je zbog nemogućnosti sprovođenja videoendoskopije na određenim bušotinama, urađena reinterpretaciju podataka već postojećih karotažnih merenja.

Snimanje bušotine B-1 izvedeno je rotacionom TV kamerom za snimanje pod vodom prečnika 55 mm do 300 metara (slika 5.45.), razvijenom i izrađenom u Centru za hidrogeologiju karsta, sa dobrom optikom i osvetljenjem. Kamera ima rotacionu glavu, koja se kontroliše manuelno, a koja omogućava snimanje kanala i kaverni u bušotini. Kompletan tok snimanja karstnog podzemlja se direktno posmatra sa površine, uz mogućnost regulacije jačine svetla, ispisivanja određenih komentara (dubine, pravci), kao i zvučni zapis komentara i objašnjenja u toku snimanja.



Slika 5.45. Kamera za podvodno snimanje bušotina i bunara (levo - sistem za videoendoskopiju pri radu, desno – razni tipovi sondi za snimanje)

5.3.6. Multivarijantni statistički metod obrade podataka

Multivarijantni statistički metod obrade podataka se koristi u naučnim disciplinama u cilju grupisanja podataka na osnovu njihove sličnosti ili pak različitosti određenih osobina. Kada je u pitanju korišćenje multivarijantnih metoda istraživanja u domenu hidrogeologije, najčešće se primenjuju faktorska analiza FA, među njima PCA (*principal component analyses*), odnosno analiza glavne komponente, kao i klasterska analiza CA. Ovakav metod obrade podataka naišao je na veliku primenu, iz razloga što omogućava izvlačenje značajnih zaključaka iz velikih baza podataka.

Živojinović (2013) navodi da su se pre pojave multivarijacione analize, u većini istraživanja koristile analize koje su obrađivale najviše dve varijable (promenljive) istovremeno, što je rezultiralo, javljanjem mere centralne tendencije (aritmetička sredina, modus, medijana...), mera varijacije (varijansa, standardna devijacija, kvartili...), intervala poverenja i testova na osnovu normalne raspodele. Najveći domet u proučavanju odnosa dve pojave predstavljao je koeficijent korelacije. U prirodnim situacijama postoji mnoštvo varijabli koje su međusobno povezane, kada se govori o multidimenzionalnosti pojava, odnosno o pojavama (događajima ili stanjima) koje su opisane s velikim brojem varijabli, gde je svaka varijabla posebna merljiva dimenzija. Analitički postupci kojima se analizira više varijabli istovremeno, nazivaju se multivarijacionim ili multidimenzionalnim analitičkim postupcima (Živojinović, 2013).

Kod velikog broja hidrohemijskih podataka mogu se prilikom interpretacije zanemariti određene veze između podataka, pa tako multivarijantne analize omogućavaju uočavanje korelacija između više parametara, odnosno podzemnih voda. Njihov zadatak je da grupisanjem podataka ukažu na veze nastale usled istih ili sličnih hidrogeohemijskih uslova koji su vladali u podzemlju, što interpretatoru omogućava bolje poznavanje sistema podzemnih voda. Stojković (2013) navodi da primena njihove analize u hidrogeologiji, uz poznavanje geoloških i hidrogeoloških karakteristika terena i izdani, znatno može pomoći u rešavanju problema oko definisanja geneze i putanje kretanja podzemnih voda.

Analiza glavnih komponenti. Analiza glavnih komponenata predstavlja metodološki postupak kojim se smanjuje veći broj promenljivih koje se osmatraju, na manji broj novih promenljivih. Najčešće se smanjenim brojem glavnih komponenata objašnjava dominirajući deo varijanse originalnih promenljivih, što za posledicu omogućava lakše razumevanje informacije sadržane u varijablama. Konstruisanje linearne kombinacije originalnih promenljivih predstavlja glavni zadatak (glavnih komponenata), kada je glavni uslov moguće obuhvatanja što većeg iznosa varijanse originalnog skupa promenljivih. Sukcesivne glavne komponente izdvajaju se uz ograničenje da su među sobom nekorelisane (Živojinović, 2013).

Faktorska analiza. Faktorska analiza (FA) predstavlja metod izdvajanja varijabli, odnosno parametara (hidrohemijski, izotopski) koji su međusobno povezani u manji broj faktora (grupa), koji će nakon hidrogeohemijske interpretacije ukazati i dati odgovore na pitanja o njihovoj međusobnoj korelaciji. Upravo informacije o ovim vezama daju odgovore o hidrogeohemijskim procesima koji su se odvijali u podzemlju (Stojković, 2013, Cloutier, *et al.* 2008, Drever 1997). Metoda FA je slična metodi glavnih komponenti, ali Živojinović (2013) navodi da: „za razliku od nje, pretpostavlja postojanje odgovarajućeg statističkog modela kojim se originalna promenljiva iskazuje kao linearna kombinacija faktora plus greška modela, odnosno veličina koja odražava stepen nezavisnosti posmatrane promenljive od svih ostalih. Na taj način se celokupna kovarijansa ili korelacija objašnjava zajedničkim faktorima, a neobjašnjeni deo se pridružuje grešci (naziva se specifičan faktor). Dakle, kod faktorske analize, za razliku od glavnih komponenata gde se vrši objašnjenje varijanse, interes je usmeren ka objašnjenju kovarijanse, odnosno onog dela ukupne varijanse koji promenljiva deli sa ostalim promenljivama iz posmatranog skupa varijabli“.⁸

Pored faktorske, u interpretaciji podataka značajne informacije se mogu dobiti i primenom klusterske analize, čija primena ima velikog značaja pri grupisanju podataka iz velikih baza na osnovu lokacijskog ili sezonskog kriterijuma, a što je bilo i od velikog značaja za ovaj rad. Analizom se podaci grupišu lokacijski ili sezonski u takozvane

⁸ D. Živojinović: „Razvoj i primena hemometrijskih metoda za klasifikaciju i procenu kvaliteta vode“, str. 33

klustere (zima, proleće, leto, jesen) na osnovu međusobne veze fizičko-hemijskih, jonskih ili izotopskih karakteristika voda. Klaster analiza omogućava izdvajanje uzoraka na osnovu većeg broja varijabli, a svaki klaster izdvaja uzorke koje je on prepoznao da poseduju zajedničke osobine, a koji se razlikuju po osobinama od uzoraka izdvojenih u okviru drugih klastera (Stojković, 2013, Cloutier *et al.* 2008, Güler *et al.* 2002). Hijerarhijska klaster analiza (HCA) obuhvata sve podatke izdvojene u određeni broj klastera, koji se dalje, opet po svojim sličnostima spajaju sa drugim klasterima, prema kojima korelišu sličnost, sve dok se ne završi jednim klasterom. Ovakav vid povezivanja i prikaz se naziva dendogram.

Za potrebe multivarijatne statističke obrade podataka fizičko-hemijskih i jonskih sadržaja u vodama Kučajsko-beljaničkog masiva, korišćen je softverski paket IBM SPSS Statistics 20.0, a primenjene su metode FA/PCA i HCA. U faktorskoj analizi korišćen je Kajzer-Majer-Olkinov (KMO) kriterijum provere verodostojnosti grupe podataka i kao mera podobnosti matrice za faktorsku analizu. KMO pokazatelj poprima vrednosti između 0 i 1, a najmanji iznos prihvatljiv za dobru FA je 0.5-0.6. Matrica mora da sadrži više od 140 slučajeva (Field, 2005), kako bi uzorak bio reprezentativan, a analiza pouzdana i tačna. U okviru klaster analize izdvajani su klasteri u dendograme na osnovu grupisanja parametara sezonski i lokacijski.

Analizom je obuhvaćeno ukupno 123 analiza jonskog sastava i fizičko-hemijskih karakteristika vode, pri čemu je analizirano 15 parametara: pH vrednost, temperatura (°C), rastvoreni kiseonik O₂ (mg/l), specifična provodljivost (µs/cm) i mutnoća (NTU), Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺, Na⁺, F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻ (mg/l). Takođe, u analizi sadržaja stabilnih izotopa u vodama, analizirano je na 123 uzorka ukupno 8 parametara (¹⁸O, ²H, ¹³C, temperatura (°C), rastvoreni kiseonik O₂ (mg/l), specifična provodljivost (µs/cm) mutnoća (NTU) Ca²⁺, SO₄²⁻, HCO₃⁻). Rezultati izotopskih analiza nisu uzeti u razmatranje, zbog velike sličnosti između rezultata (malo variranje vrednosti), što bi rezultiralo lošom ili nepreciznom matricom.

6. ODABIR LOKACIJA ZA ISTRAŽIVANJE GENEZE I USLOVA CIRKULACIJE VODA KUČAJSKO-BELJANIČKOG MASIVA

Za poznavanje funkcionisanja karstne izdani i uslova formiranja i cirkulacije voda unutar sistema, neophodno je sagledati kvantitativne i kvalitativne karakteristike svih pojava i objekata zastupljenih na terenu, ukoliko je to moguće. Kao što je navedeno, Kučajsko-beljanički masiv se odlikuje velikim brojem hidrogeoloških pojava i objekata, interesantnih sa aspekta proučavanja geneze podzemnih voda i vremena koje voda provede u podzemlju.

Međutim, istraživanjima za potrebe izrade disertacije nisu obuhvaćene sve pojave i objekti na istražnom prostoru, već je izvršen odabir (najkarakterističnijih) lokacija. Suženje izbora lokacija sprovedeno je, jednim delom, zbog prevelikog broja pojava i objekata, čiji bi obilazak i analiza iziskivali duži vremenski period, a drugim delom zbog finansijskih ograničenja vezanih za terenska istraživanja i izradu analiza. Jedan od bitnih uslova za odabir lokacija bio je da za određene lokacije postoji veći broj podataka, dobijenim ranijim istraživanjima.

Kako formiranje sastava podzemnih voda počinje ulaskom površinskih tokova i atmosferskog taloga u podzemni karstni sistem, u razmatranje su uzete padavine sa tri lokacije, kao i površinski tokovi, čije vode poniru u veće ponore na masivu. U okviru Kučajsko-beljaničkog masiva, razmatrano je ukupno 7 ponora, tri na Beljanici i 4 na Kučaju. Nazivi lokacija dati su u tabeli 18.

Tople vode koje se na određenim lokacijama javljaju u zoni hladnih i jakih karstnih vrela, pojavljuju se na površini istražnog prostora na severnom, severozapadnom, zapadnom i južnom obodu masiva, dok se na istočnoj strani masiva javljaju hladne vode, izuzev vrela Mrljiš (13 °C), koje ima nešto višu temperaturu u odnosu na druga vrela raspoređena po istočnom obodu masiva. Zbog svoje temperature, koja ukazuje na dublju cirkulaciju, svi subtermalni i termalni izvori, zastupljeni u okviru masiva, uzeti su u razmatranje, pa je tako broj lokacija na Beljanici sa termalnim i subtermalnim pojavama ukupno 6, dok su na Kučaju razmatrane samo dve lokacije (jedan izvor i jedan bunar), vidi tabelu 18.

Iako bez pojave subtermalnih voda, određene pojave i objekti istočnog dela masiva su uvršćeni u analizu, kako bi se sagledali i definisali uslovi funkcionisanja celog karstnog masiva (antiklinorijuma), i na taj način uvidele razlike u genezi voda, koje se primarno prihranjuju vodama sa najviših delova masiva, a zatim gravitiraju prema različitim obodnim stranama, koje se karakterišu drugačijim geološkim tvorevinama i drugačijim rasednim i pukotinskim strukturama. Iz tog razloga, u cilju definisanja uslova formiranja hladnih karstnih voda sa gravitacionom i sifonalnom cirkulacijom, u razmatranje su uzete sve jače pojave isticanja voda Kučajsko-beljaničkog masiva, a za čije se poreklo smatra da je sa ovog masiva (izvori u kanjonu Male Tisnice prihranjuju se vodama sa Crnog Vrha, pa nisu uzeti u razmatranje). U okviru sagledavanja geneze voda i dubine zaleganja karstnih kanala hladnih voda, razmatrano je 7 vrela na Beljanici, i 7 vrela i jedan bunar na Kučaju, vidi tabelu 18.

Speleološki objekti koji se nalaze u nivou podzemnih voda, od velikog su značaja pri istraživanju cirkulacije podzemnih voda koje pliće zaležu u podzemlje, obzirom da su dostupni za direktno istraživanje. Hidrohemijske i izotopske karakteristike karstnih voda koje cirkulišu kroz pećinu, odakle jedan deo voda izlazi na površinu u vidu manjeg ili većeg površinskog toka, a drugi deo voda se dalje sistemom pukotina i raseda infiltrira dublje u podzemlje, pokazatelj su uslova sredine kroz koju se voda kretala od površine terena do pećinskog sistema, a predstavljaju i ulazni podatak za definisanje geneze podzemnih voda koje dublje cirkulišu, a u direktnoj su, ili indirektnoj vezi sa pećinskim sistemom (kao što je potvrđena veza opitom obeležavanja Bogovinske pećine i vrela Mrljiš). Rastvaračka moć vode u uslovima povišenog sadržaja CO₂ u sistemu (voda i vazduh), takođe može da ukaže na drugačiji, ubrzani proces karstifikacije. U okviru osmatranja speleološkog objekta koji se nalazi u nivou oscilacije podzemnih voda, izvršen je odabir dve lokacije, pećine Živkova reka (Velika Peć na ponorima) na Beljanici i Bogovinske pećine na Kučaju (tabela 18).

Tabela 18. Odabrane lokacije za istraživanje geneze i uslova cirkulacija podzemnih voda u okviru Kučajsko-beljaničkog masiva

Oblast	Uzorkovanje kišnice i snega	Hladni izvor	Topli izvor	Ponor	Pećina
Beljanica	Uvala Busovate	Mlava	Belosavac 2*	Busovata	Živkova reka
	Selo Strmosten	Belosavac*	Topli izvor u Suvom Dolu	Rečka	
		Suvi Do	Krepoljinska banjica	Suvi Do	
		Krupajsko vrelo**	Milanovačka banjica		
		Veliko Vrelo	Krupaja termalni izvor**		
		Malo vrelo	Krupaja bušotina B – 1 **		
		Izvor iz epikarsta			
Kučaj	Uvala Velike Brezovice	Zlotsko vrelo 1	Bušotina SIS – 1 u Sisevcu ****	Nekudovo	Bogovinska pećina
		Zlotsko vrelo 2	Krivovirska banjica ***	Velika Brezovica	
		Beljevina (Gaura Mika i Gaura Mare)		Vojal	
		Mrljiš bunar		Gajine Mlake	
		Mrljiš izvor			
		Radovansko vrelo			
		Vrelo Crnog Timoka***			
		Grza			
		Vrelo Crnice****			

LEGENDA:

* - Vezane hladno-tople pojave: Belosavac i Belosavac 2

** - Vezane hladno-tople pojave: Krupajsko vrelo, termalni izvor na Krupaji i Krupaja bušotina B-1

*** - Vezane hladno-tople pojave: Vrelo Crnog Timoka i Krivovirska banjica

**** - Vezane hladno-tople pojave: Vrelo Crnice i bušotina u Sisevcu SIS-1

U tabeli 19. je dat prikaz svih istraživanih pojava i objekata sa njihovim koordinatama kao i apsolutnim nadmorskim visinama.

Tabela 19. Nazivi istraživanih objekata i pojava sa koordinatama i apsolutnim nadmorskim visinama.

Naziv	x	y	z (m n.m.)
Mlava	7563093	4894422	305
Belosavac	7560497	4895154	295
Belosavac subtermalna	7560315	4895314	294
Suvi Do	7558363	4896250	300

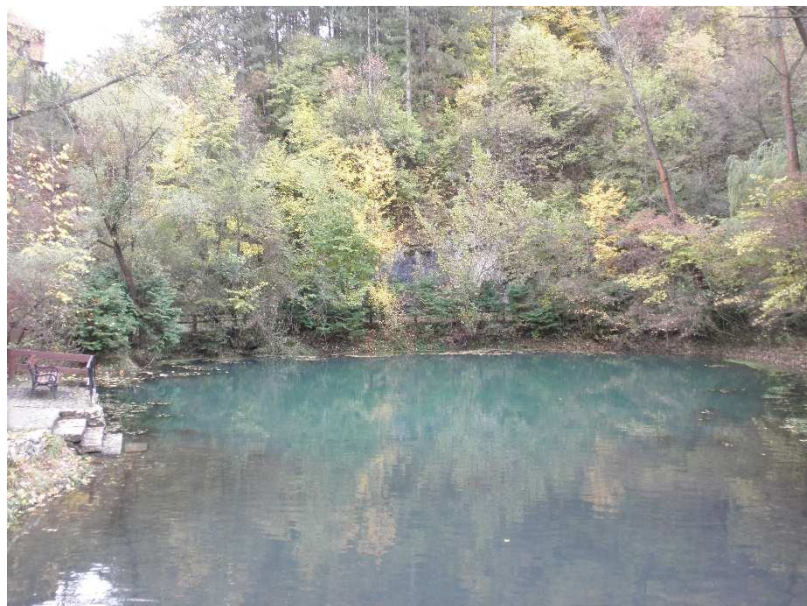
Suvi Do subtermalna	7557299	4897096	282
Epikarst	7565850	4889858	750
Suvi Do ponor	7564742	4890212	590
Busovate ponor	7559421	4887114	1020
Ivkov ponor	7554039	4887348	995
Veliko vrelo	7551756	4884646	417
Malo vrelo	7549845	4884896	330
Nekudovo ponor	7554600	4873839	630
Velika Brezovica ponor	7561509	4868217	845
Vojala ponor	7568700	4879752	850
Zlotsko vrelo	7577632	4876462	290
Zlotsko vrelo ispod pecine	7577569	4876530	292
Bogovinska pecina	7574783	4861817	270
Mrljis bunar	7574342	4858092	240
Mrljis izvor	7574410	4858101	240
Radovansko vrelo	7563319	4861550	435
Krivovirska Banjica	7560494	4853484	362
Vrelo Crnog Timoka	7560557	4853782	375
Grza	7552337	4861793	410
Vrelo Crnice	7547826	4868024	350
Sisevac termalna	7547677	4867996	348
Zivkova reka	7547662	4890384	281
Krupajsko vrelo	7549152	4893403	228
Krupaja termalna	7549103	4893433	220
Krupaja busotina	7549078	4893432	220
Milanovacka banjica	7548518	4895614	231
Krepoljinska banjica	7550756	4901015	230
Beljevina	7576274	4880275	347
Gajine Mlake	7561343	4865632	819

6.1. Opis odabranih lokacija

POJAVE NA BELJANIČKOM MASIVU

Vrelo Mlave

Vrelo Mlave predstavlja jako vrelo sa sifonalnim tipom cirkulacije, koje na površini terena obrazuje manje jezero (slika 6.1.), čija je morfologija kanala već opisana u poglavlju 4.4., a koja ukazuje na duboku bazu karstifikacije u ovom delu masiva.



Slika 6.1. Vrelo Mlave

U Cvijićevim radovima (1895, 1896) se prvi put pominje nesvakidašnja pojava kod isticanja ovog vrela, odnosno totalni prekid isticanja vode, kada nizvodni tok u potpunosti presušuje, dok u jezeru ostaje voda koja ne otiče. O ovim prekidima svedočili su samo stanovnici Žagubice, a prekidi se dešavaju povremeno, pa se tako među poslednjim prekidima beleži prekid iz sredine osamdesetih godina prošlog veka, dok je najnoviji prekid isticanja prijavljen u jesenjem periodu 2006. godine (Stevanović, 2009).

Milanović S. (2010) navodi da: „Ovakvi kratkotrajni prekidi isticanja mogu se vezati samo za kolapsiranje tavanica karstnih kanala ili nataloženih frakcija u užim delovima kanala ili kavernama u zonama oscilacija podzemnih voda. Kolapsiranjem bi se kratkotrajno prekinuo pun dotok kroz kanal, dok bi se u uzvodnom delu od kolapsa tj. u delu karstnog kanala, koji je razvijen prema unutrašnjosti masiva veoma brzo povećavao nivo podzemne vode i sam pritisak u zaleđu. Kada pritisak pređe granicu probijanja kolapsa, na samom vrelu bi dolazilo do nagle pojave isticanja povećanja nivoa podzemnih voda i isticanje veoma mutne i gotovo blatnjave vode. Iako je ovakvu teoriju veoma teško potkrepiti konkretnim podacima kao argument se mogu dati samo višegodišnja speleoronilačka istraživanja, kako kod nas tako i u svetu gde se mogu naći primeri kolapsa

i obruvavanja u aktivnim kanalima kao i taloženja naslaga u zonama fluktuacija podzemnih voda“.⁹

Vrelo izbija na kontaktu urgonskih krečnjaka i bazalnog dela tercijarne serije i nalazi se na rasedu pravca pružanja I –Z. Nije kaptirano, a jedan deo voda se koristi za potrebe ribnjaka, dok se drugi deo spaja sa Velikom Tisnicom obrazujući reku Mlavu. Količine voda, koje se dreniraju na ovom izvoru kreću se od 0.34-16.55 m³/s, što ga ujedno čini jednim od najjačih vrela sa potvrđenom sifonalnom cirkulacijom na Kučajsko-beljaničkom masivu i, uopšteno, u Srbiji.

Na vrelo Mlave je za potrebe disertacije vršen monitoring kvaliteta i kvantiteta voda na kvartalnom nivou, uz kvartalno uzorkovanje vode za izradu analiza stabilnih i radioaktivnih izotopa, kao i jedno uzorkovanje vode za utvrđivanje sadržaja plemenitih gasova u vodi.

Vrelo Belosavac (slika 6.2.), takođe, ima sifonalnu cirkulaciju podzemnih voda, a kaptirano je za potrebe vodosnabdevanja naselja Žagubica. Prema Stevanoviću (1981) ovo vrelo, zajedno sa Mlavom i vrelom Suvi do, pripada istom ležištu izdanskih voda, dok Milanović (2010) govori o postojanju dva zasebna sistema, gde izdvaja vrelo Mlave kao zasebni sistem, a Belosavcu pripaja vrelo Živkovu rupu, koje se nalazi neposredno iznad vrela Belosavac (aktivno je samo u periodu velikih voda), i vrelo Suvi Do, kao drugi zaseban sistem.

⁹ S. Milanović: “Formiranje fizičkog modela karstne izdani na primeru Beljanice (istočna Srbija)”, str. 112, 113



Slika 6.2. Vrelo Belosavac

Vrelo Belosavac, čiji je deo voda kaptiran za potrebe Žagubice, nalazi se na kontaktu urgonskih krečnjaka i tercijarnih sedimenata, a minimalni zabeležen proticaj iznosi svega 50 l/s. Vode ovog vrela se karakterišu izuzetno dobrim i postojanim fizičko-hemijskim karakteristikama voda, što ide u prilog dužini cirkulacije i boravku vode u podzemnom karstnom sistemu. Prema podacima osmatranja ovog vrela, može se zaključiti da vrelo ima režim izdašnosti sličan vrelu Mlave. Osmatranja ovog vrela, vršena su u periodu 1993-2001., kao i 2006-2007. godine od strane Vodoprivrednog preduzeća Srbija vode, Vodoprivrednog centra Dunav - Novi Sad i Vodoprivrednog centra - Smederevo. Od 2010. godine osmatranja režima isticanja vrela Belosavac, kao i Živkove rupe osmatra CHK-DHG-RGF (vidi poglavlje o režimu podzemnih voda). Maksimum isticanja zabeležen je u februaru 2010. godine i iznosio je 1.91 m³/s. Na osnovu količina koje ističu, ovo vrelo ne spada među najjača vrela masiva, ali se ističe po svojim postojanim kvalitativnim karakteristikama.

Na vrelu Belosavac vršen je monitoring kvaliteta i kvantiteta voda na kvartalnom nivou, uz kvartalno uzorkovanje vode za izradu analiza stabilnih i radioaktivnih izotopa, kao i jedno uzorkovanje vode za utvrđivanje sadržaja plemenitih gasova i mirkoelemenata u vodi.

Belosavac 2 predstavlja mali subtermalni karstni izvor (slika 6.3. a) koji se javlja oko 200 metara od vrela Belosavac i takođe predstavlja pojavu sa dubokom cirkulacijom, koja na površini terena formira malo jezero. Na površini vode se uočavaju mehurići, kao posledica izdvajanja gasova pri isticanju vode (slika 6.3. b). Kako se nalazi u neposrednoj blizini Belosavca i ima malo povišenu temperaturu vode koja varira od 13-16 °C, može se zaključiti da vode ovog vrela, zapravo predstavljaju dublju cirkulaciju voda vrela Belosavac, koje se sistemom pukotina i kanala manjih dimenzija proceđuju dublje u podzemlje u centralnom delu Beljanice i kasnije ka površini.



Slika 6.3. a) Izvor Belosavac 2; b) gasovi na površini vode (foto: M. Kličković)

Na vrelu Belosavac 2 vršen je monitoring kvaliteta i kvantiteta voda na kvartalnom nivou, uz kvartalno uzorkovanje vode za izradu analiza stabilnih i radioaktivnih izotopa, kao i jedno uzorkovanje vode za utvrđivanje sadržaja plemenitih gasova i mirkoelemenata u vodi.

Vrelo Suvi Do (slika 6.4. levo) se nalazi u istoimenom selu, na 300 m n.v., a kaptirano je u vidu česme sa četiri slavine i izdašnošću koja varira 2 do 80 l/s. Vode sa česme koriste meštani sela. U periodu velikih voda na česmama ističe jak mlaz vode, dok jedan deo voda izbija iz šahte levo od česme (slika 6.4. desno), a drugi ispod česme, odakle zbirno nastavljaju dalje da teku tokom. Izuzetak su poplave u maju 2014. godine, kada je čitav plato na kome se nalazi česma bio poplavljen vodom jako povišene mutnoće (žuto-mutna

voda). U periodu niskih voda znatno manje količine ističu na česmi, uz isticanje vode iz kanala ispod česme, a uočavani su i minimumi, tokom kojih na česmama voda nije tekla uopšte, već je mali tok isticao iz kanali ispod česme.



Slika 6.4. Levo: kaptirano vrelo u vidu česme; desno: isticanje voda za vreme velikih voda

Izvor kod „banje“ u Suvom dolu

Subtermalni izvor (slika 6.5.) ističe na nadmorskoj visini od 282 m n.m. (tabela 19), a nalazi se na oko 3.5 km udaljenosti od vrela Suvi Do i svega 10-ak metara, od pomenutog hladnog izvora. Njegova izdašnost varira sezonski, a prosečna izdašnost iznosi oko 15 l/s. Izvor se javlja na kontaktu urgonskih krečnjaka sa neogenim Žagubičkim basenom i perdisponiran je velikom rasednom zonom. Njegova temperatura (19-20 °C) i hemizam vode ukazuju na znatno dublju cirkulaciju podzemnih voda.



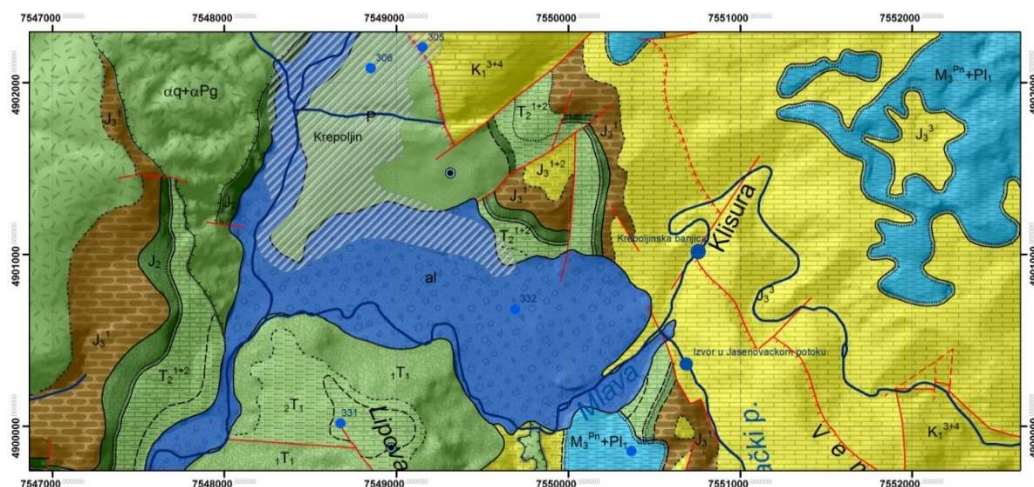
Slika 6.5. Kaptaza na subtermalnom izvoru u Suvom Dolu (foto: M. Kličković)

Krepoljinska banjica (slika 6.6.) izvire u zoni grada Krepoljin, na levoj obali reke Mlave u kanjonu. Pojava ovog izvora predisponirana je sistemom raseda pravca pružanja I-Z i

SZ-JI (slika 6.7.). Izvor je razbijenog tipa, a na površinu terena izbija na nadmorskoj visini od 230 m n.m., sa konstantnim kapacitetom od 7.2 l/s. Vode ovog izvora ukazuju da su formirane u okviru karstne izdani, a posebni značaj daje mu povišena temperatura vode od prosečno 16.5 °C. Kako ovaj izvor predstavlja prvi, odnosno izvor koji se nalazi na samom severozapadnom obodu masiva, od tri izvora subtermalnog karaktera koji se javljaju po severnom obodu Kučajsko-beljaničkog masiva, veoma je značajan sa aspekta geneze i dubine cirkulacije voda karstnog masiva.



Slika 6.6. Izvor Krepoljinska banjica na levoj obali reke Mlave u zoni Krepoljina (foto: S. Milanović)



Slika 6.7. Detalj hidrogeološke karte sa položajem Krepoljinske Banjice (Milanović S, 2014)

Milanovačka banjica (slika 6.8.) predstavlja izvor sa subtermalnom vodom koji se nalazi oko 2260 metara od Krupajskog vrela, na severozapadnom delu masiva u selu Milanovac. Izvor je uzlaznog tipa sa srednjim kapacitetom oko 3.5 l/s, a formiran je na kontaktu krečnjaka i crvenog permskog peščara. Izvor ističe u podnožju krečnjačkog masiva, formirajući manje jezero, u kome se periodično javljaju pulsacije gasova. Zbog svojih fizičko-hemijskih karakteristika, donekle drugačijih od ostalih voda Kučajsko-beljaničkog masiva, veoma je značajan za potrebe izrade disertacije. Sifonalni izvor ističe na 231 m n.m. i ima postojanu temperaturu od 22°C, što ukazuje na potpuni izostanak ili smanjeno mešanje ovih voda sa skorije infiltriranim vodama. U neposrednoj blizini masiva javljaju se proboji vulkanita (dacita), koji bi mogli da budu razlog ovakvog hemijskog sastava i povišene temperature vode.



Slika 6.8. Ujezereni izvor Milanovačke banjice (foto: M. Kličković)

Pojave na Krupajskom vrelu.

Krupajsko vrelo je jako vrelo uzlaznog tipa, formirano u zoni navlake crvenih permskih peščara preko urgonskih krečnjaka (slika 6.9. a). Količine voda, koje se dreniraju na ovom vrelu variraju sezonski (251 do 8776 l/s), a maksimalni proticaj zabeležen je u poplavnom talasu maja 2014. godine, kada je na vrelu isticalo oko 31 m³/s (slika 6.9. b).



Slika 6.9. a) Isticanje Krupajskog vrela iz pećinskog otvora (foto: M. Kličković)

b) maksimum u maju 2014. godine

Termalni izvor kod Krupajsko vrela (slika 6.10.) ima povišenu temperaturu od 26 °C i kao takav predstavlja prirodni izvor najtoplije vode (termalne) u okviru Beljaničkog masiva, zbog čega je utvrđivanje starosti voda sa ovog izvora od velikog značaja za poznavanja uslova formiranja i dubine cirkulacije. Vrelo se nalazi na oko 50 m udaljenosti od Krupajskog vrela, ističe na nadmorskoj visini od 220 m n.m., na kontaktu čela navlake permskih pešćara preko urgonskih krečnjaka, i uzlaznog je tipa sa konstantnim proticajem od oko 2 l/s.



Slika 6.10. Termalni izvor na Krupajskom vrelu

Pored ove dve prirodne pojave, razmatrane su i karakteristike voda sa bušotine B-1, koja se nalazi svega 10 metara od prirodnog termalnog izvora (slika 6.11.) na Krupaji.



Slika 6.11. Bušotina B-1 i termalni izvor na Krupajskom vrelu

U cilju dobijanja većih količina termalnih voda, 80-ih godina prošlog veka, izvedena su detaljna hidrogeološka istraživanja i izrađene dve bušotine. Istraživanja su sprovedena u periodu 1980–1984. godine, od strane OOUR Grupe za hidrogeologiju Rudarsko-geološkog fakulteta iz Beograda, koja su rezultirala izradom studije o mogućnosti iskorišćavanja subtermalnih voda u zoni Krupajskog vrela (Filipović *et al*, 1982).

U toku 1983. i 1984. godine započeto je istražno bušenje dve bušotine. Prva istražna bušotina izrađena je na Krupajskom vrelu (bušotina B-1), dok je druga bušotina izvedena u blizini subtermalnog izvora Milanovačka banjica (bušotina B-2). U obe bušotine javlja se voda sa povišenom temperaturom B-1 – 18 °C, B-2 – 22 °C i sa hemijskim sastavom sličnim onom na prirodnom termalnom izvoru Krupajskog vrela (niske mineralizacije), ali je detektovan i povećan sadržaj pojedinih mikrokomponenti (Al, Fe, Mn, SiO₂ itd).

Tokom opita crpenja, koji je vršen na istražnoj bušotini B-1, došlo je do povišenja temperature na 22°C, što je potvrdilo geofizička karotažna istraživanja, kojim je navedeno da je na 64.2 metru temperatura iznosila 22°C, dok je na 383.5 metru detektovana temperatura od 25°C. Tom prilikom konstatovano je da količine voda, koje ističu iz bušotine B-1 iznose 23 l/s (Filipović & Stevanović, 1984).

Novija istraživanja pokazuju da bušotina B-1, duboka 400 metara, ima samoizliv od 5 l/s, dok temperatura vode konstantno iznosi 18 °C. Opitom crpenja iz 2015. godine za potrebe

vodosnabdevanja sela Milanovac, Krupaja i Sige vodom iz bušotine B-1, utvrđeno je da maksimalne količine voda koje se mogu zahvatati iznose 26 l/s, i tom prilikom je nakon dugotrajnog rada pumpe došlo do povećanja temperature na 22 °C.

Pećina Živkova reka

Pećina Živkova reka, ili Velika Peć na ponorima, se nalazi u selu Krupaja na nadmorskoj visini od 281 m n.m. (tabela 19), a za istraživanje je posebno značajna, obzirom da se nalazi nedaleko od Krupajskog vrela i da ima aktivan tok, dostupan za istraživanje i ispitivanje karstnih podzemnih voda direktno u speleološkom objektu. Voda koja cirkuliše kroz pećinu drenira zapadni deo Beljaničkog masiva i kontinualnim monitoringom je utvrđeno da ima veoma interesantan hemijski sastav, karakterističan za strukture koje ne zaležu duboko u podzemlje, već gravitaciono cirkulišu prema obodu masiva. Takođe, speleološkim istraživanjima (vidi poglavlje o geomorfološkim karakteristikama) je potvrđeno da voda iz ove pećine dalje ponire u podzemlje, pa je novijim istraživanjima izvršen pokušaj da se definiše moguća veza ovih voda sa vodama Krupajskog vrela, termalnog izvora i bušotine B-1. Uzorkovanje vode i merenje proticaja vršeno je kvartalno, a pored toga, u pećini su postavljene i karbonatne pločice sa ciljem da se utvrdi rastvaračka moć vode obogaćene CO₂, kao i rastvaračka moć vazduha obogaćenog CO₂.

Veliko i Malo vrelo predstavljaju izvore sa brzom gravitacionom cirkulacijom podzemnih voda, koji pripadaju slivu Resave i dreniraju južni obod Beljaničkog masiva. Malo vrelo (slika 6.12.) ističe iz pećinskog otvora, čija je morfologija kanala objašnjena u poglavlju o geomorfološkim karakteristikama terena i kaptirano je za potrebe vodosnabdevanja sela Strmosten, dok Veliko vrelo ističe iz razbijene izvorišne zone koja se vertikalno pomera u zavisnosti od stanja nivoa izdani (slika 6.13.). Vrelo nije kaptirano. Kapacitet Malog vrela se kreće od 20-2500 l/s, dok se kapacitet Velikog vrela kreće od 85-7000 l/s.

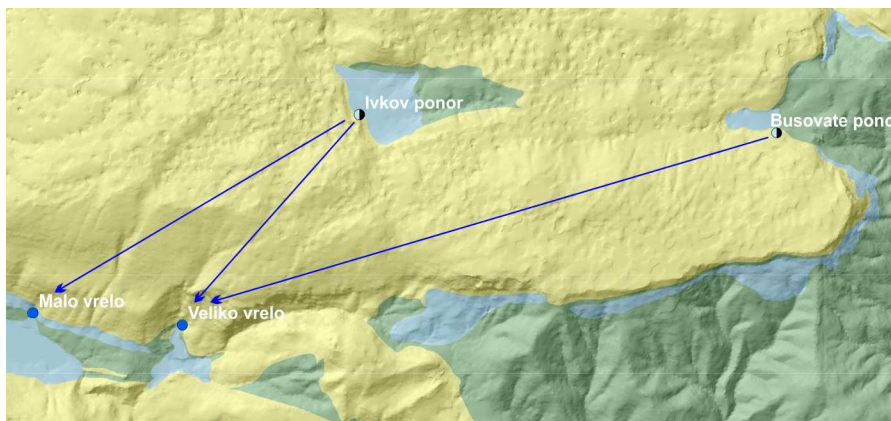


Slika 6.12. Pećinski otvor iz koga ističe Malo vrelo



Slika 6.13. Vertikalno pomeranje zone isticanja Velikog vrela (levo: srednje vode; desno: maksimum u maju 2014)

Opitima obeležavanja koji su pomenuti u prethodnom poglavlju je potvrđeno da su Malo vrelo i Veliko Vrelo povezani sa Ivkovim ponorom, dok je Veliko vrelo povezano sa ponorom Busovate, a prema tipu cirkulacije pripadaju grupi gravitacionih vrela (slika 6.14.).



Slika 6.14. Utvrđena veza ponora Busovate i Ivkovog ponora sa Velikim i Malim vreloom

Izvor Epikarst

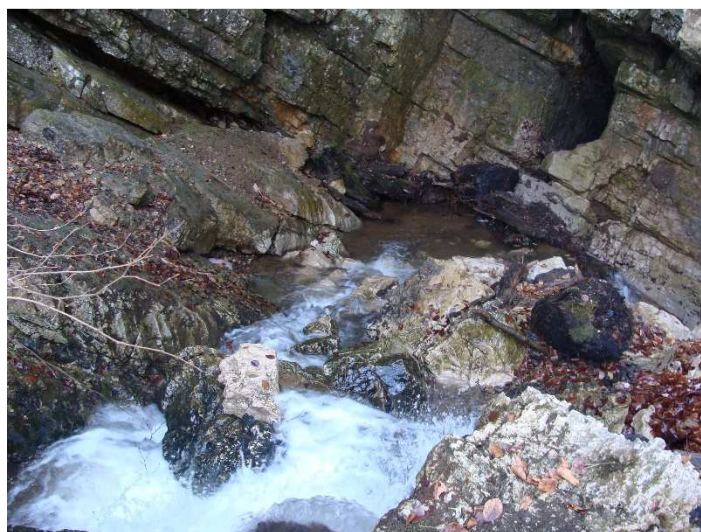
Mali izvor Epikarst (drenira lokalnu plitku epikarst zonu) (slika 6.15.) nalazi se na severnom delu Beljanice, na nešto višoj nadmorskoj visini u odnosu na ostale izvore, odnosno na 750 m n.m. (tabela 19). Izvor je mali, sa količinama vode koje retko prelaze 1 l/s, dok u periodu minimuma, izdašnost opada ispod 0,01 l/s. Izvire u podini jednog od krečnjačkih vrhova sa istočnog oboda Suvodolskog kanjona. Pretpostavlja se da vreme koje voda provede u podzemlju nije dugo, te ima značaj za utvrđivanje geneze voda koje cirkulišu u pripovršinskim zonama, kao i izmene fizičko-hemijskih parametara vode i jonskog sastava tokom kraćeg boravka u podzemlju. Na izvoru su vršena merenja izdašnosti, fizičko-hemijski i jonski sastav voda, kao i sadržaj stabilnih izotopa, u periodu zima, proleće i jesen. Obzirom da je izvor bio suv u avgustu mesecu, uzorkovanje vode tada nije izvršeno. Uzorkovanje vode za izradu analiza radioaktivnih izotopa takođe nije vršeno, obzirom da se radi o evidentno mladoj vodi, odnosno o vodi koja brzo procirkuliše kroz stensku masu.



Slika 6.15. Izvor „Epikarst“, koji drenira epikarst zonu

Ponor Rečke

Ponori Rečke 1 i 2 predstavljaju koncentrične zone uviranja na uvali Rečke. Rečka 1 je veći morfološko-speleološki oblik, u koji poniru vode istoimenog potoka (slika 6.16.) na nadmorskoj visini od 995 m (tabela 19).



Slika 6.16. Ponor Rečke za vreme srednjih voda

Na osnovu podataka J. Petrovića iz 1971. godine, definisan je proticaj voda na ponoru, koji varira od 5-520 l/s, dok prema podacima Mandić & Zlokolica iz 1984. godine ovaj proticaj iznosio od 20-100 l/s. U slučaju velikih voda, gde količine iznose 500 l/s i više, na površini terena ispred ulaza se formira manje jezero, te se prema nekim istraživačima procenjuje da je maksimalni kapacitet gutanja ponora 200 l/s. Milanović S (2010) navodi

da prema morfologiji ulaznog otvora i poznavanju razvića velikih kanala ovog ponorskog objekta može se pretpostaviti da bi u vreme maksimalnih voda ponor mogao da primi i više od 800 l/s.

Ponor Rečke 2 (slika 6.17.) se nalazi oko pola kilometara severno od ponora Rečke 1, i predstavlja drugu ponorsku zonu u uvali, koja se nalazi ispod krečnjačkog otvora. Ponor koji prima vode tokova dužine oko 2.5 km, ima maksimalni vodoprijemni kapacitet od oko 50 l/s. Minimalne količine voda koje uviru u ovaj ponor su 3 l/s.



Slika 6.17. Ponorska zona Rečke 2 (foto: S. Milanović)

Ponor Busovate

Ponori Busovata i Busovata 2 se nalaze u istoimenoj uvali Busovate na 1020 m n.m (tabela 19) i predstavljaju ponorsku zonu sa dva otvora od kojih svaki prima površinski tok koji dolazi sa paleozojskih stena. Pored ove, koncentrične zone poniranja voda, pretpostavlja se da čitav obod uvale predstavlja difuznu ponorsku zonu, koja je povezana sa znatno dubljim sistemom koji gravitira prema Velikom Vrelu (Milanović S, 2010).

O ponoru Busovate, koji je znatno veći i razvijeniji u ulaznom delu od severnijeg ponora, a i predstavlja glavnu ponorsku zonu, već je bilo reči. Kod ovog ponora se nalaze dve ponorske zone, u periodu malih voda, tok ponire desetak metara pre pećinskog otvora, dok u periodu velikih voda, vode koje ne može da primi prva zona poniranja, preuzima

druga zona, odnosno jamska zona ponora Busovate. Maksimalni kapacitet gutanja ponora prelazi i više od 50 l/s, a po samom izgledu ponora može se zaključiti da ponor može da primi i znatno veće količine voda. Minimalne registrovane količine su 2-3 l/s, i nije konstatovano da je ponor nekada presušio.

Ponor Busovate 2 (slika 6.18.) je manji i prima količine vode od oko 30 l/s. Nalazi se posle prvog ponora u deluvijalnom nanosu uvale na nižoj nadmorskoj visini, pa je samim tim i potpuno zaplavljen kvartarnim naslagama. Kako je ovaj ponor uglavnom suv, i kako u periodu velikih voda u njega utiču vode istih fizičko-hemijskih karakteristika, kao i u glavni ponor Busovate, osmatrane su vode samo na glavnom ponoru.



Slika 6.18. Ponor Busovate 2

Ponor Suvog Dola se nalazi u kanjonu (slika 6.19.) na oko 4 km udaljenosti od vrela Mlave, i predstavlja razbijenu ponorsku zonu, koja počinje na nadmorskoj visini od 590 m n.m. (tabela 19). Prema nekim podacima, maksimalni kapacitet gutanja ponora iznosi oko 30 l/s, međutim Milanović (2010) navodi da maksimalni kapacitet gutanja iznosi preko 60 l/s, kada se voda u koritu gubi u brojnim izduhama, ali da je realno smatrati da je kapacitet gutanja površinskih voda veći, obzirom da tok Suvog Dola premašuje i 100 l/s.



Slika 6.19. Tok ponornice Suvi Do prema kanjonu – ponorskoj zoni

Stevanović *et al.* (2015) navode da je princip funkcionisanja ponora u Suvom Dolu znatno različit mehanizam od ostalih ponora Beljanice. Tokom istraživanja Suvog Dola za potrebe bojenja ponora, iako pri minimalnim vodama (20. jula 2007 godine), umesto da se na kraju toka, koji se nalazio neposredno posle lakta kanjona Suvog Dola, naiđe na ponorsku zonu, naišlo se na podizanje nivoa podzemnih voda i praktično isticanja-izviranja voda, koje su nastavile da teku nizvodno. Takav dokaz upravo potvrđuje složenost sistema Suvog Dola i njegovu ulogu u hidrogeološkom sistemu Beljanice.

POJAVE NA KUČAJSKOM MASIVU

Vrelo Crnice (slika 6.20.) se nalazi na jugozapadnoj strani masiva, u naselju Sisevac i spada u jaka karstna vrela razbijenog tipa, čije vode delom potiču od Nekudovske reke, o čemu je već bilo reči. Vrelo se javlja na 350 m.n.m. (tabela 19), na kontaktu urgonskih krečnjaka i crvenog permskog peščara. Izdašnost vrela varira od 275-1350 l/s.

Pored vrela Crnice, ispitivanja voda u naselju Sisevac vršena su i na bušotini SIS-1, koja je izvedena za banjsko-turističke, energetske i druge potrebe privatnog vlasnika. Bušotinom izrađenom do 216 metara dobijen je samoizliv od 18 l/s, sa temperaturom vode od 36 °C, što predstavlja najvišu temperaturu na Kučajsko-beljaničkom masivu, a rezultat ove bušotine je i jedini slučaj dobijanja viših temperatura voda izradom bušotine,

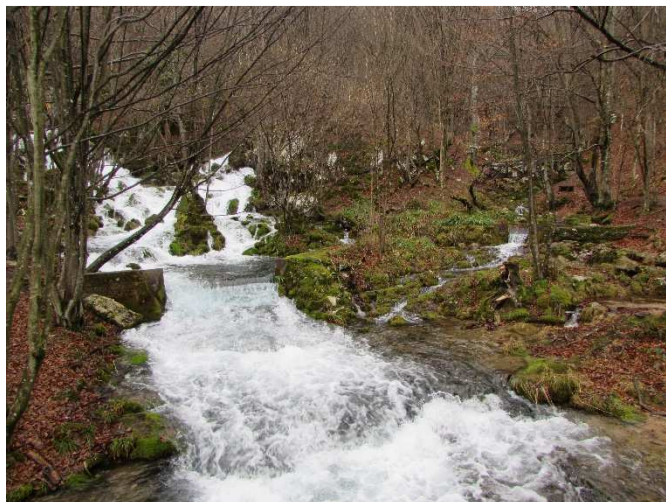
u odnosu na prirodno isticanje termalnih voda. Koordinate bušotine SIS-1 date su u tabeli 19.



Slika 6.20. Vrelo Crnice

Pojava termalnih voda uz hladno vrelo sa gravitacionim tipom cirkulacije, ukazuje na različite dubine zaleganja karstnih kanala, kao i na drugačije kontakte voda sa stenskim masama, što i jeste predmet disertacije, pa je na vrelu i bušotini vršen monitoring kvaliteta i kvantiteta voda na kvartalnom nivou, uz kvartalno uzorkovanje vode za izradu analiza stabilnih i radioaktivnih izotopa, kao i jedno uzorkovanje vode za utvrđivanje sadržaja plemenitih gasova i mikroelemenata u vodi.

Vrelo Grze (slika 6.21.) se nalazi na nadmorskoj visini od 410 m n.m. (tabela 19), a na površinu terena izbija na kontaktu urgonskih krečnjaka i crvenih permskih peščara. Razbijeno izvorište ima nekoliko zona isticanja, koje se pomeraju vertikalno u zavisnosti od nivoa podzemnih voda u karstnoj izdani. Veza sa ponorom Velike Brezovice je bojenjem potvrđena više puta, a istraživanjima i hidrogeološkim analizama je utvrđeno da se radi o vrelu sa gravitacionim tipom isticanja. Vrelo nije kaptirano, a količine voda koje ističu se kreću od minimalnih 15 l/s do preko 4000 l/s.



Slika 6.21. Vrelo Grze

Vrelo Crnog Timoka (slika 6.22.) drenira veći deo južnog Kučaja, a javlja se na 375 m n.m. u selu Krivi Vir (tabela 19). Vrelo ističe iz pećinskog kanala i delimično je kaptirano za potrebe lokalnog vodosnabdevanja dela stanovnika sela Krvi Vir, a javlja se na kontaktu urgonskih krečnjaka i neogenih sedimenata Krivovirske kotline na rasedu pravca I-Z. Opitom bojenja utvrđena je veza ovog vrela sa ponorom Gajine Mlake (Stevanović, 2010). Vrelo je gravitacionog tipa, sa količinama voda koje variraju od minimalnih 20 l/s do preko 2500 l/s.



Slika 6.22. Vrelo Crnog Timoka

U Krivom viru se javljaju i pojave subtermalnih voda, u samom centru sela, koje izvire u vidu razbijenog izvora oko 400 metara nizvodno od izvora Crnog Timoka. Istraživanja podzemnih voda na ovom području su vršena povremeno, tokom kojih su konstatovane

povoljne kvalitativne karakteristike voda, naročito voda subtermalnog izvora Krivovirska banjica.

Subtermalni izvor Krivovirske banjice (slika 6.23.) ima temperaturu koja varira od 15-23 °C, što ukazuje na veliko mešanje hladnih voda u periodu velikih voda. Izvor izbija na površinu terena na 362 m n.m. (tabela 19). Količine voda koje ističu kreću se od 50 do 180 l/s, a dalje se ulivaju u tok Crnog Timoka (slika 6.24.). Na vrelu Crnog Timoka i Krivovirskoj banjici vršen je monitoring kvaliteta i kvantiteta voda na kvartalnom nivou, uz kvartalno uzorkovanje vode za izradu analiza stabilnih i radioaktivnih izotopa, kao i jedno uzorkovanje vode za utvrđivanje sadržaja plemenitih gasova i mikroelemenata u vodi.



Slika 6.23. Zona isticanja Krivovirske banjice

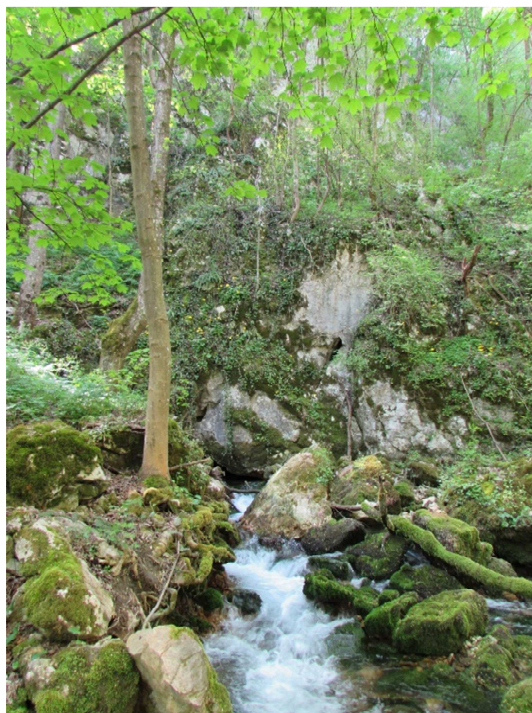


Slika 6.24. Ulivanje Krivovirske banjice u tok Crnog Timoka zabeležen i termovizijskom kamerom FLIR

Ranija hidrogeološka istraživanja u zoni Krivog Vira su vršena, uglavnom za potrebe vodosnabdevanja. Istraživanja vezana za eksploataciju i uslove formiranja subtermalnih

voda vršena su 1978. godine od strane Filipovića i saradnika. Ova istraživanja su nastavljena 1987. godine, a rezultat istraživanja bila je izrada istražne bušotine TKV-1 (Filipović *et al*, 1979, 1988). Bušotina je izbušena do dubine od 254 m. Bušenjem je konstatovana duboka sifonalna cirkulacija karstnih izdanskih voda, a količine vode koje su dobijene samoizlivom iz bušotine iznose 0.14 l/s, dok temperatura ovih voda iznosi 20.5 °C (Filipović, 1988).

Radovansko vrelo je jedno od jačih vrela koje drenira površ Velike Brezovice, što je potvrđeno ranije pomenutim opitima obeležavanja, a ističe na kontaktu gornjojurskih krečnjaka i tvorevina devonske starosti. Vrelo ističe na 435 m n.m. (tabela 19) iz krupnih krečnjačkih blokova na desnoj obali Radovanske reke (slika 6.25.). Tipično je gravitaciono vrelo, sa količinama vode koje variraju od 200-2500 l/s. Sa leve strane izvorišne zone, nalazi se pećinski otvor Pećure (slika 6.26.) iz kojeg ističu vode, koje predstavljaju samo “prolaz” jednog dela Radovanske reke, utvrđen opitom bojenja, gde vode poniru par stotina metara iznad pećine i ponovo se javljaju na površini terena izbijajući iz pećine. Za potrebe izrade disertacije, na Radovanskom vrelu vršen je kvalitativni i kvantitativni monitoring na kvartalnom nivou, uz uzorkovanje vode za izradu izotopskih analiza i analiza jonskog sastava voda.

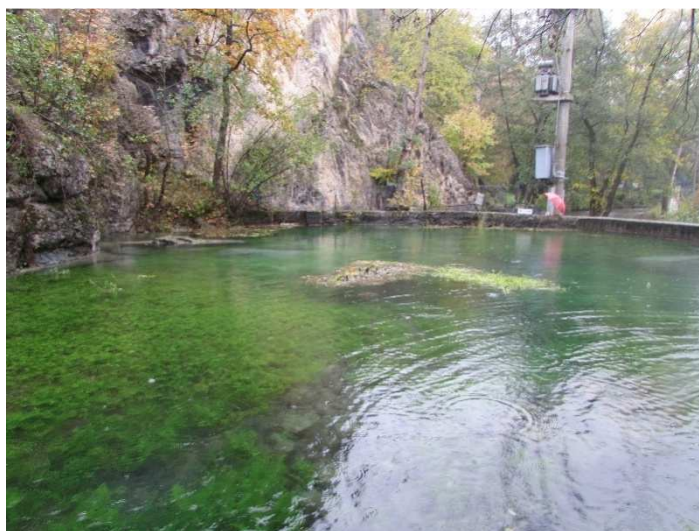


Slika 6.25. Radovansko vrelo



Slika 6.26. Ponor Radovanske reke; desno: pećinski otvor Pećure iz kojeg ističe jedan deo toka Radovanske reke

Vrelo Mrljiš (slika 6.27) drenira veći deo jugoistočnog dela Kučaja, a izvire 240 m n.m. (tabela 19) na kontaktu urgonskih krečnjaka i aluvijalnih tvorevina. Vrelo je sifonalnog tipa, a kretanje podzemnih voda uslovljeno je položajem serije orbitolinskih peščara. Količine voda koje se dreniraju na ovom vrelu kreću se od 80-1500 l/s. Vrelo je, zajedno sa jednom od izvedenih bušotina na izvoristu Mrljiš, osmatrano za potrebe izrade disertacije. Vode na vrelu imaju blag subtermalni karakter, sa temperaturom vode od oko 13°C, dok temperatura vode na bušotini varira i kreće se do 14°C, što ukazuje na priliv voda iz nešto dubljih karstnih kanala.



Slika 6.27. Vrelo Mrljiš

Bušotina na vrelu Mrljiš IEBOG – 2 se koristi za vodosnabdevanje Bora i ima samoizliv od oko 40 l/s, dok su opitima crpenja, pri sniženju od 1.03 m dobijene maksimalne količine voda od 114 l/s. Ovim opitom crpenja, uočeno je sniženje nivoa vode i na samom

vrelu, što ukazuje na vezu karstnih kanala vrela i bušotine IEBOG – 2 (Stevanović, 2010). Na vrelu Mrljiš je i u bušotini vršen monitoring kvaliteta i kvantiteta voda na kvartalnom nivou. Uz kvartalno uzorkovanje vode za izradu analiza stabilnih i radioaktivnih izotopa, izvedeno je i jedno uzorkovanje vode za utvrđivanje sadržaja plemenitih gasova i mirkoelemenata u vodi.

Bogovinska pećina je uzeta u razmatranje kao speleološki objekat sa povremeno aktivnim isticanjem. Iz pećine izbija tok u periodu velikih voda, dok u periodu malih voda pećinski tok ne ističe direktno iz pećine, već se pomera i ističe nizvodno od pećine iz nanosa u koritu. Opiatom bojenja utvrđena je veza ovog toka sa vodama na izvoru Mrljiš, što je posebno interesantno sa aspekta definisanja promene fizičko-hemijskih karakteristika voda od ulaza u sistem (padavine), kroz sistem (u pećini), do javljanja na vrelu (Mrljiš). Merenje proticaja i fizičko-hemijskih parametara, kao i uzorkovanje vode za utvrđivanje jonskog i izotopskog sastava voda, vršeno je kvartalno.

Vrelo u Zlotu (ispod hotela) predstavlja gravitaciono vrelo, koje drenira karstnu površinu Kota i Stobora. Izbija na površinu terena na nadmorskoj visini od 290 m n.m. (tabela 19), u dnu skaršćenog kanjona Lazareve doline i jedno je od dve pojave koje su na ovoj lokaciji osmatrane za potrebe disertacije. Iako je Zlotsko vrelo znatno jače, nije uzeto u razmatranje jer ističe u površinski tok reke, gde se meša sa rečnom vodom, pa rezultati ne bi bili reprezentativni. Zbog pristupačnosti i generalno istih fizičko-hemijskih karakteristika voda, vrelo kod hotela je uzeto u razmatranje. Merenje proticaja i fizičko-hemijskih parametara, kao i uzorkovanje vode za utvrđivanje jonskog i izotopskog sastava voda, vršeno je kvartalno.

Pored ovog vrela, osmatrane su i vode manjeg izvora koje ističe tik ispod Zlotske pećine, a koje je aktivno samo u periodu velikih voda. Vode sa ovog vrela su direktno vezane za niže karstne kanale pećine, što ga čini interesantnim za osmatranje. Količine voda koje ističu kreću se od 3-10 l/s.

Vrelo Beljevine se sastoji od više izvora i vrela, koji dreniraju severoistočni deo masiva. Vrelo Gaura Mika se nalazi na 350 m n.m. i izbija iz manje pećine na desnoj obali reke

Beljevine. Izdašnost ovog vrela varira od 10-800 l/s. Vrelo Gaura Mare se, takođe, nalazi na desnoj obali pomenute reke i takođe izbija na površinu iz manje pećine. Količine voda koje se dreniraju iznose od 20-1250 l/s, a kaptirane su se za vodosnabdevanje Bora (Stevanović, 1981). Merenje proticaja i fizičko-hemijskih parametara, kao i uzorkovanje vode za utvrđivanje jonskog i izotopskog sastava voda, vršeno je kvartalno.

Ponor Nekudova (slika 6.28.) se nalazi u kanjonu, na nadmorskoj visini od 630 m n.m. (tabela 19), na kontaktu paleozojskih škriljaca i krečnjaka. Ponor u potpunosti prima vode istoimenog toka, čija maksimalna količina iznosi oko 200 l/s. Njegova veza sa vrelom Crnice čini ga značajnim za potrebe disertacije, odnosno za potrebe definisanja funkcionisanja karstne izdani.



Slika 6.28. Ponor Nekudova

Ponor Velike Brezovice (slika 6.29.) se nalazi u uvali Velike Brezovice, gde prima površinski tok koji se formira na devonskim peščarima i konglomeratima i teče duž deluvijalno-proluvijalnih naslaga do kontakta sa jurskim krečnjacima. Maksimalni kapacitet gutanja ovog ponora iznosi 150 l/s, ali zbog znatno većih količina voda koje teku površinskim tokom, često se javlja zajezeravanje zone ponorskog otvora. Veza ponora sa Radovanskim vrelom i vrelom Grze je utvrđena opitima obeležavanja. Merenje proticaja i fizičko-hemijskih parametara, kao i uzorkovanje vode za utvrđivanje jonskog i izotopskog sastava voda, vršeno je kvartalno.



Slika 6.29. Ponor Velike Brezovice

Ponor Gajine Mlake (slika 6.30.) se nalazi 2,5 km južno od ponora Velike Brezovice, ispod krečnjačkog odseka u uvali Gajine Mlake. Ponor guta vode površinskog toka, ali je tok u većem delu godine suv. Maksimalni kapacitet gutanja ovog ponora je oko 50-80 l/s. Utvrđena veza sa vrelom Crnog Timoka čini ga izuzetno važnim sa aspekta utvrđivanja izmene kvalitativnih karakteristika voda tokom cirkulacije podzemnih voda od zone prihranjivanja do zone dreniranja. Kako je tok, uglavnom, bio suv prilikom terenskog obilaska, samo jednom je izvršeno uzorkovanje vode za izradu analize sadržaja stabilnih izotopa i jonskog sastava vode.



Slika 6.30. Ponor Gajine Mlake



Slika 6.31. Uzorkovanje stene na ulazu u ponor Vojal

Ponor Vojal se nalazi na severoistočnoj strani masiva na 850 m n.m. i predstavlja hidrogeološki aktivan speleološki objekat. Kapacitet gutanja ovog objekta procenjuje se na oko 500 l/s, a u njega uviru vode površinskog toka istoimene reke.

Kako je opitima obeležavanja utvrđena njegova veza sa izvorima Beljevine, kvartalno je vršeno merenje proticaja i fizičko - hemijskih parametara, uzorkovanje vode za utvrđivanje jonskog i izotopskog sastava voda, kao i uzimanje stene za utvrđivanje sadržaja izotopa ^{13}C (slika 6.31.).

6.2. Izdvajanje karstnih sistema u okviru Kučajsko-beljaničkog masiva

Prema kriterijumima za izdvajanje karstnih sistema datih u poglavlju 5.2., u okviru Kučajsko-beljaničkog masiva se na osnovu geologije terena, pružanja i dubine zaleganja karstnih kanala, kao i temperature vode, hidrohemijskih karakteristika i količina voda koje se dreniraju na karstnim vrelima i izvorima, mogu izdvojiti četiri sistema, od kojih dva klasična i dva mešovita, odnosno kompleksna karstna sistema. Takođe, su sistemima kojima je poznata zona prihranjivanja, odnosno izvorima i vrelima, kojima je opitom obeležavanja dokazana veza sa određenim ponorima, pripojeni odgovarajući ponori.

U okviru klasičnih sistema (gravitacioni i ascendentni), izdvajaju se:

Beljanički masiv

a) Gravitacioni sistemi

1. Sistem: Suvi Do
2. Sistem: Izvor epikarst

3. Sistem: Pećina Živkova reka

4. Sistem: Veliko i Malo vrelo

b) Ascendentni sistemi

1. Grupa severnih sistema **S**

S1. Sistem: Mlava – Belosavac – Belosavac 2

S2. Sistem: Subtermalni izvor u Suvom Dolu – Krepoljinska banjica

2. Sistem: Milanovačka banjica

Kučajski masiv

a) Gravitacioni sistemi

1. Sistem: Istočni obod (Zlotska vrela – vrela Beljevine)

2. Sistem: Bogovinska pećina

3. Sistem: Radovansko vrelo

4. Sistem: Grza

U okviru kombinovanih, odnosno kompleksnih karstnih sistema izdvojenih na osnovu preovlađujućeg tipa isticanja, na Beljaničkom masivu se izdvaja jedan sistem:

1. Gravitaciono – ascendentni sistem

Sistem Krupajske pojave – sistem se sastoji od preovlađujućeg Krupajskog vrela, bušotine sa subtermalnom vodom i termalnim izvorom na Krupaji.

U okviru Kučajskog masiva izdvajaju se tri kompleksna sistema:

1. Gravitaciono – ascendentni sistem

Sistem Sisevac – sistem se sastoji od preovlađujućeg vrela Crnice i bušotine u Sisevcu SIS-1.

2. Ascendentno – gravitacioni sistemi

a) Sistem Krivi Vir – sistem se sastoji od preovlađujućeg subtermalnog izvora Krivovirska banjica i vrela Crnog Timoka.

b) Sistem Mrljiš - sistem se sastoji od preovlađujuće bušotine na Mrljišu IEBOG-2 i izvora Mrljiš i slabijih hladnih izvora u široj zoni.

Položaj sistema prikazan je na slici 6.32. **Gravitacioni sistemi** na Kučaju i Beljanici izdvojeni su na osnovu dosadašnjih saznanja i rezultata opita bojenja, sprovedenih na ponorima sa kojima je utvrđena veza. Speleološki objekti, kao i izvor epikarst zone,

takođe, se izdvajaju kao gravitacioni sistemi. Dva speleološka objekta, koja su izdvojena, imaju aktivnu hidrogeološku funkciju, a takođe i funkciju sprovođenja voda u dublje karstne kanale. Živkova reka i Bogovinska pećina bi se mogle izdvojiti kao sistemi sa dvojakom funkcijom, obzirom da obe pećine predstavljaju gravitacione izvore, kao i prelaznu zonu, odakle se jedan deo voda u pećini (Bogovinska pećina) dalje infiltrira u podzemlje i predstavljaju izvor prihranjivanja dubljih karstnih kanala.

Izvor Epikarst dobio je svoj naziv zbog epikarst zone karstne izdani koju drenira. Stoga, njegov relativno kratak put cirkulacije do zone isticanja na hipsometrijski nižim zonama ga svrstava u grupu gravitacionih izvora.

Sistem gravitacionih vrela Velikog i Malog vrela prema zoni prihranjivanja pripada različitim slivovima, ali obzirom da se dreniraju u lokacijski istoj zoni, odnosno u podnožju Beljaničke kape, kao i da se po fizičko-hemijskim karakteristikama podzemnih voda podudaraju, svrstani su i razmatrani kao zajednički karstni sistem, sa dve karstne pojave. Takođe, jedan od uslova objedinjavanja ova dva izvora je i podatak da je opitom obeležavanja utvrđeno da pored veze Ivkov ponor (ponor Rečke) vode pri određenim hidrogeološkim uslovima gravitiraju i ka Velikom vrelu.

Zlotska vrela i vrela Beljevine, takođe, predstavljaju tipična gravitaciona vrela, na šta ukazuje i njihov hemijski sastav. Radovansko vrelo i vrelo Grze imaju istu zonu prihranjivanja sa dominantnim koncentričnim prihranjivanjem (ponor Velika Brezovica), što vodi ka zaključku da pripadaju istom karstnom sistemu, sa različitim zonama dreniranja. Međutim, kako ova dva vrela lokacijski ne pripadaju istom sistemu, razmatrana su pojedinačno.

Ascendentni sistemi se kao samostalni izdvajaju samo na Beljanici, obzirom da se na Kučaju u zoni vrela i objekata sa dubokom cirkulacijom subtermalnih voda uvek nalaze i pojave hladnih voda. Na Beljanici su izdvojena dva sistema sa dubokom, ascendentnom cirkulacijom podzemnih voda. Prvi i veći sistem pripada severnom obodu Beljaničkog masiva i podeljen je na dve podgrupe severnih sistema (istraživanjima je utvrđeno da se po svojim karakteristikama znatno razlikuju). Dva pomenuta sistema Severne grupe su

predstavljeni kombinacijom dve i tri hidrogeološke pojave (sistem S1 – 3 pojave i sistem S2 – dve pojave), dok se na severozapadnoj strani izdvaja Milanovačka banjica kao samostalni ascendentni sistem. Sistem S1 sastoji se od vrela Mlave, Belosavca i Belosavca 2, za koje se smatra da pripadaju istom sistemu sa različitom dubinom cirkulacije. Krepoljinska banjica i termalni izvor u Suvom Dolu, koji su svrstani u drugi severni sistem S2, imaju slične i u velikoj meri podudarne hidrogeološke karakteristike, što je i potvrđeno tokom izvođenja terenskih i laboratorijskih istraživanja.

Kombinovani sistemi izdvojeni su prema preovlađujućem tipu isticanja, te se kao sistemi sa preovlađujućim isticanjem hladnih voda izdvajaju sistemi Krupajskih vrela i sistem Sisevca. U sistemu Krupajskih vrela se, sa povećanjem dubine zaleganja karstnih kanala, povećava i temperatura (posebno od zone baznog oticaja za koji se smatra da zaleže do dubine od 150 m) i smanjuju količine voda. Tako, hladno Krupajsko vrelo u ekstremnim slučajevima dostiže količine od 30 m³/s, dok su vode iz bušotine B-1 i termalnog Krupajskog vrela ujednačenog kapaciteta i ne prelaze 5 l/s. Istraživanjima izvedenim u dubokoj bušotini na Krupajskom vrelu je utvrđeno da i na velikim dubinama postoji mešanje hladnih i toplih voda, kao i konstantan porast temperature sa dubinom.

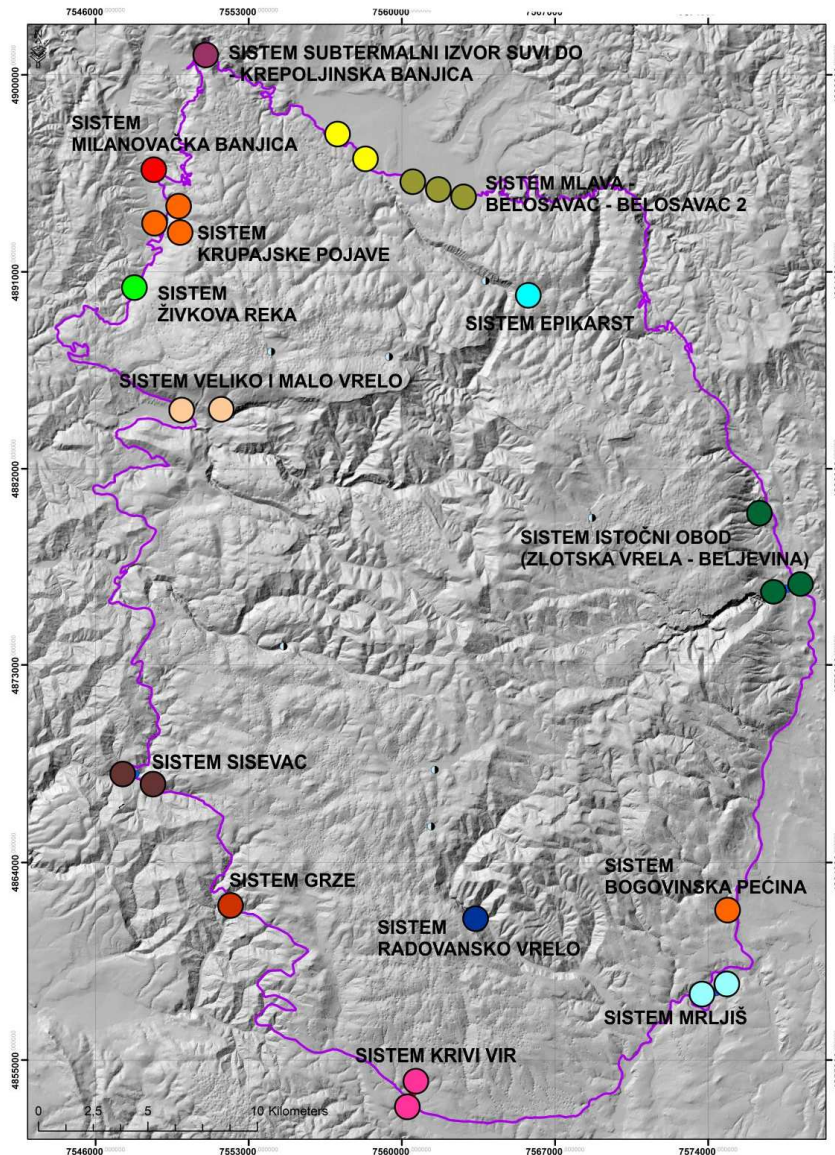
Sistem Sisevac se sastoji od preovlađujućeg karstnog vrela Crnice (hladna voda) i bušotine SIS-1 izbušene do dubine od 216 m. Vrelo Crnice ima dokazanu zonu prihranjivanja (ponor Nekudova), a izotopskim istraživanjima je dokazano i da deo voda konstanto prihranjuje dublje karstne kanale, pa vode bušotine SIS-1 predstavljaju miks termalnih i mladih „svežih“ voda.

Ascendentno – gravitacionih sistema u okviru Beljaničkog masiva nema.

U okviru Kučajskog masiva, ascendentno – gravitacioni sistem se javlja u selu Krivi Vir, gde u periodu velikih voda dominira izdašnost vrela Crnog Timoka. Iako je izdašnost subtermalnog vrela Krivovirske banjice značajna, u periodu malih voda, vrelo Krivovirske banjice preuzima dominaciju u količinama koje ističu, pa je tako minimalnih 20 l/s koje se dreniraju na Crnom Timoku značajno manje od minimalnih 50 l/s koje se

dreniraju u letnjem periodu na Krivovirskoj banjici. Iz tog razloga, ovaj kompleksni kombinovani sistem svrstan je u grupu ascendentno – gravitacionih sistema.

Pored njega, u okviru Kučajskog masiva izdvaja se još jedan sistem sa ovakvom funkcijom, odnosno sistem Mrljiš, koji obuhvata istoimeno vrelo i bušotinu u zoni isticanja vrela. Kako su opitima crpenja na bušotini dobijene maksimalne količine voda od 114 l/s, bez značajnijeg obaranja nivoa podzemnih voda, a kako minimumi na vrelu iznose oko 80 l/s, zaključeno je da vode pripadaju ascendentno – gravitacionom sistemu, gde dominantnu ulogu imaju karstni kanali razvijeni dubljom ascendentnom cirkulacijom.



Slika 6.32. Položaj izdvojenih sistema u okviru Kučajsko-beljaničkog masiva

7. TERENSKA ISTRAŽIVANJA I DOBIJENI REZULTATI

Terenska istraživanja sprovedena na Kučajsko-beljaničkom masivu vršena su u toku hidrološke 2015. godine, izuzev jednog uzorkovanja vode za utvrđivanje sadržaja stabilnih izotopa u septembru 2014. godine, kada su u vodi utvrđivani samo sadržaji stabilnih izotopa kiseonika i deuterijuma. U periodu 2015. godine osmatrane su fizičko-hemijske, izotopske, hidrohemijske i kvantitativne karakteristike svih pojava i objekata u okviru sistema izdvojenih u prethodnom poglavlju, prilikom čega je na kvartalnom nivou merena izdašnost vode na ponorima i izvorima, i izrađeno ukupno:

- 140 analiza sadržaja stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H (140 analiza ^{18}O i 140 analiza ^2H) u vodi,
- 123 analize sadržaja stabilnog izotopa ^{13}C u vodi,
- 30 analiza sadržaja stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H u padavinama,
- 21 analiza sadržaja jonskog sastava u padavinama,
- 123 analize sadržaja jonskog sastava u vodi,
- 123 merenja fizičko-hemijskih karakteristika voda *in situ*, uz hidrometrijska merenja.

Za ceo Kučajsko-beljanički masiv formirana je **Lokalna Izotopska Meteorska Linija (LIML)**, sastavljena od podataka sa tri lokacije, od ukupno 30 uzoraka kišnice i snega (10 uzoraka sa Busovate, 14 uzoraka iz Strmostena i 6 uzorka sa Velike Brezovice). Obzirom na broj podataka, za svaku od ovih lokacija, napravljena je i pojedinačna LIML, koje služe za preciznije tumačenje podataka izotopskih analiza toplih i hladnih voda.

Takođe, terenskim obilascima izvedeno je uzorkovanje vode i stene, prilikom čega je izrađeno:

- 25 analiza sadržaja izotopa tricijuma ^3H u toplim i hladnim vodama,
- 14 analiza sadržaja izotopa ^{14}C u toplim i hladnim vodama,
- 28 analiza sadržaja izotopa ^{13}C u steni,
- 9 analiza sadržaja izotopa $\text{T}+^3\text{He}$ u hladnim vodama,
- 12 analiza sadržaja mikroelemnata u toplim i hladnim vodama,
- 10 analiza sadržaja plemenitih gasova u vodi,
- Analiza 1 stalagmita uzorkovanog u pećini.

7.1. Rezultati sadržaja stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H (formiranje LIML) i jonskog sastava u padavinama

Formiranje LIML bilo je neophodno kako bi se razumelo i pratilo poreklo podzemnih toplih i hladnih voda. Korišćenjem Craig-ove Globalne Izotopske Meteorske Linije (GIML) (eng. GWML) ili druge lokalne ili regionalne linije formirane u Srbiji dobili bi se nedovoljno precizni rezultati istraživanja, a najbolji rezultati se dobijaju poređenjem sadržaja stabilnih izotopa podzemnih voda, sa sadržajem stabilnih izotopa padavina koji formiraju lokalnu izotopsku meteorsku liniju na istoj lokaciji, obzirom da se radi o vodama koje učestvuju u vodnom ciklusu samog masiva.

Uzorkovanje padavina u cilju formiranja lokalne izotopske meteorske linije vršeno je u dva navrata. Prvi uzorci su uzeti tokom 2010. godine (ukupno 9 uzoraka), a nastavljeno je 2015. godine, kada je uspostavljena mreža uzorkovanja na pomenute tri lokacije. Na lokacijama su postavljeni uređaji „RainCo“.

Podaci sadržaja izotopskog sastava padavina u selu Strmosten (tabela 20) ukazuju da se najniže vrednosti izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ uočavaju u oktobru 2010. godine, kao i u aprilu, maju i junu 2015. godine, kada se kreću u vrednosti od -3.3 do -5.05 ‰. Ovakav sadržaj izotopa u padavinama ukazuje na padavine formirane od teških izotopa, odnosno ukazuju na intenzivno izlučivanje padavina formiranih u neposrednoj blizini zone izlučivanja, u periodu prolećnih pljuskova. Niže vrednosti, odnosno vrednosti sa većom negativnom vrednošću, vezane su za zimski period (do -13.65 ‰ u februaru), pa ukazuju na atmosferski talog formiran od susnežice ili snega.

Tabela 20. Sadržaj stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H u padavinama – Strmosten (Beljanica)

STRMOSTEN	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰	δD (V-SMOW) ‰	GIML (V-SMOW) ‰
Oktobar 2010	-3.33	-20.9	-16.64
Novembar 2010	-9.02	-58.1	-62.16
Decembar 2010	-9.49	-64.9	-65.92
Januar 2011	-12.79	-91.29	-92.32

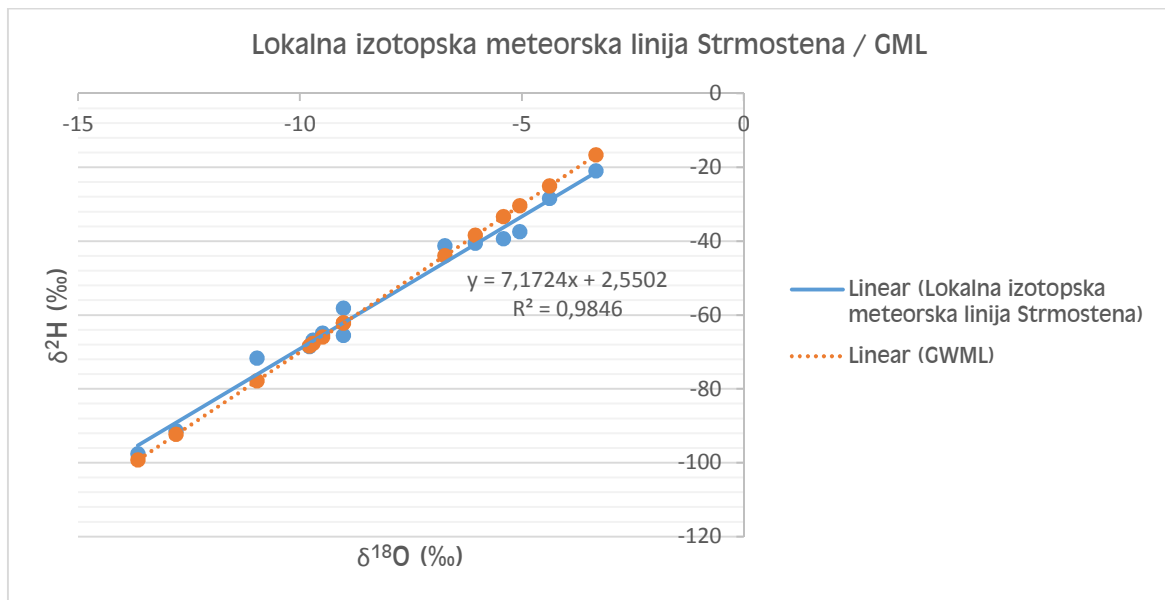
Februar 2011	-13.65	-97.6	-99.2
April 2011	-9.79	-68.5	-68.32
Maj 2011	-9.02	-65.5	-62.16
Oktobar 2011	-9.71	-66.8	-67.68
Jun 2011	-6.05	-40.5	-38.4
April 2015	-5.42	-39.36	-33.36
May 2015	-5.05	-37.41	-30.4
June 2015	-4.38	-28.41	-25.04
Jul-Avgust 2015	-6.74	-41.18	-43.9227
Novembar 2015	-10.97	-71.62	-77.7707

Plotovanjem rezultata na dijagram (slika 7.1.), dobija se jednačina LIML za Strmosten, sa R^2 faktorom:

$$y = 7.1724x + 2.5502$$

$$R^2 = 0.9846$$

Primenom formule za GML ($\delta^2\text{H}=\delta^{18}\text{O}+10$) na podatke stabilnih izotopa padavina Strmostena, dobija se položaj LIML Strmostena u odnosu na GML.



Slika 7.1. Lokalna izotopska meteorska kriva formirana na lokaciji Strmosten
Lokalna meteorska linija Strmostena formirana je na nižoj nadmorskoj visini (400 m n.m.), pa reflektuje padavine koje odgovaraju umerenim kontinentalnim klimatskim uslovima. Linija preseca GML tako da jedan deo linije pada iznad, a drugi ispod GML,

pa se može zaključiti da je deo linije koji pada iznad GML linije formiran od padavina obogaćenim težim izotopima koje se formiraju u prolećnim mesecima, dok je drugi deo, koji pada ispod linije, obogaćen lakšim izotopima, što odgovara periodu zime, a što i jeste karakteristika umerenijeg klimata. Međutim, karakter izotopske meteorske linije zavisi od klimatskih faktora koji pored sezonskog variranja, zavise i od godišnjih kolebanja. Iz tog razloga je bilo neophodno formirati meteorsku liniju za period tokom koga su i obavljena istraživanja.

Sadržaj stabilnih izotopa padavina na višim nadmorskim visinama formirao je lokalnu izotopsku meteorsku liniju Busovate i Velike Brezovice (slike 7.2. i 7.3.). Niske vrednosti, odnosno teži izotopski sastav $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ (tabele 21 i 22) se zapaža u padavinama formiranim u prolećnim i letnjim mesecima, dok se u jesenjim i zimskim mesecima uočavaju znatno više vrednosti, do čak -14.66% . Ovakav izotopski sastav padavina odlika je planinskih klimata.

Rezultati sadržaja stabilnih izotopa u padavinama formiranih u planinskim predelima posledica su izotopskih efekata o kojima je bilo reči u poglavlju 5.3.1.6, pa se tako u podacima izotopa padavina na Kučajsko-beljaničkom masivu jasno uočavaju, na prvom mestu temperaturni (variranje izotopskog sastava sezonski), zatim efekat nadmorske visine (izotopski lakše padavine prema višim planinskim predelima), kao i količinski efekat, koji odgovara intenzivnim padavinama u prolećnom periodu i početkom jeseni u Strmostenu. Takođe, može se zaključiti da se u izotopskom sastavu padavina uočava i kontinentalni efekat, ali obzirom na jasno postojanje visinskog efekta, ovaj efekat izmene izotopskog sastava treba zanemariti.

Plotovanjem rezultata na dijagrame, dobijaju se jednačine LIML za Busovatu i Veliku Brezovicu, sa R^2 faktorima:

$$\text{Busovata: } y = 7.1282x + 4.7941$$

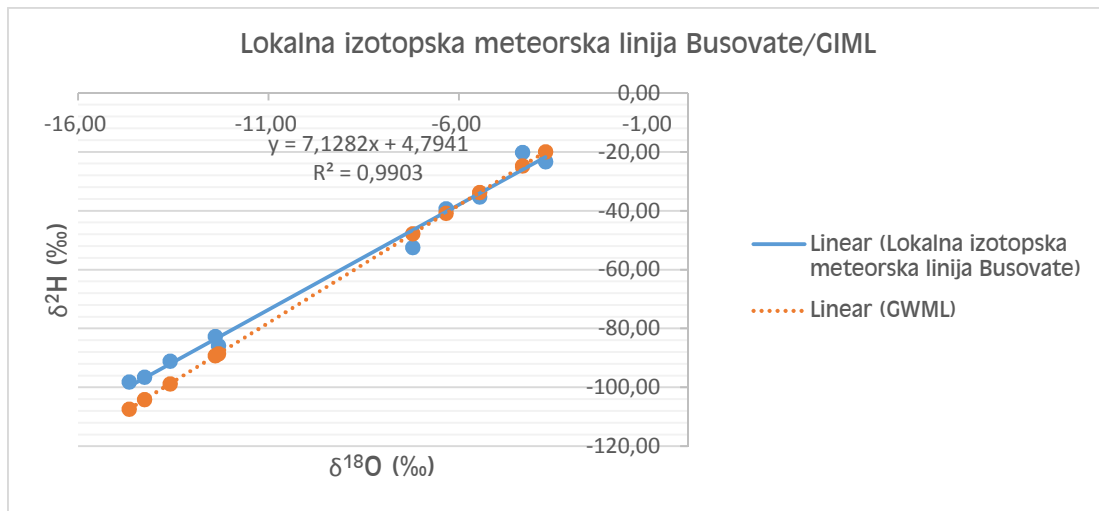
$$R^2 = 0.9903$$

$$\text{Velika Brezovica: } y = 6.6441x - 2.4096$$

$$R^2 = 0.9926$$

Tabela 21. Sadržaj stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H u padavinama – Busovata (Beljanica)

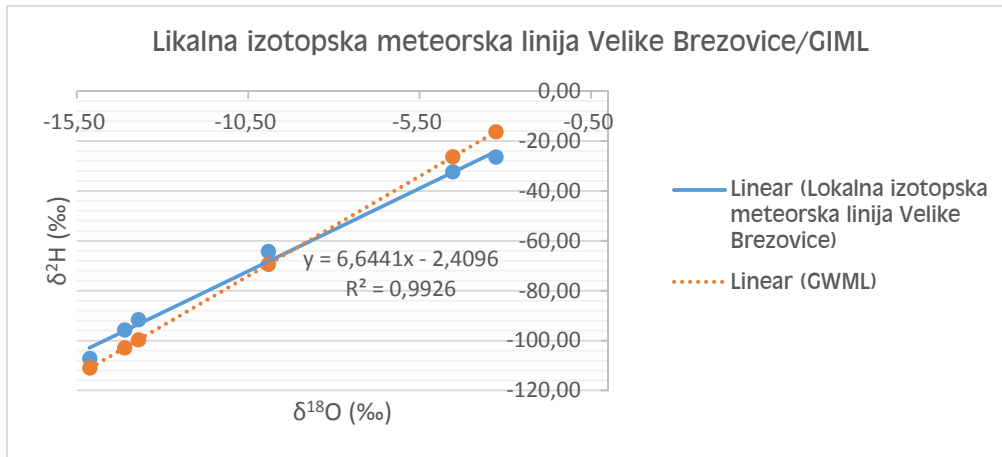
Uvala Busovate	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰	δD (V-SMOW) ‰	GIML (V-SMOW) ‰
Decembar 2014	-14.26	-96.52	-104.052
Jan/Feb/Mar 2015	-13.59	-91.07	-98.72
April	-6.35	-39.32	-40.8
Maj	-7.22	-52.47	-47.76
Jun	-5.47	-35.26	-33.76
Jul i Avgust	-3.74	-23.26	-19.8873
Septembar	-4.34	-20.14	-24.7434
Oktobar	-12.32	-85.77	-88.533
Novembar	-12.40	-82.68	-89.2023
Decembar	-14.66	-98.09	-107.314



Slika 7.2. Lokalna izotopska meteorska kriva formirana na lokaciji uvale Busovate

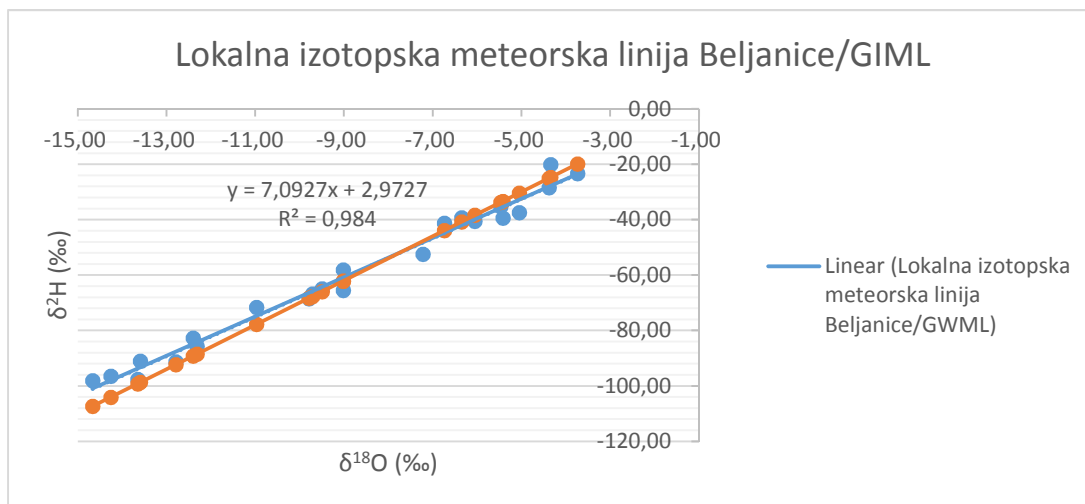
Tabela 22. Sadržaj stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H u padavinama – Velika Brezovica (Kučaj)

Uvala Velike Brezovice	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰	δD (V-SMOW) ‰	GML
Decembar 2014	-13.70	-91.60	-99.6175
Jan/Feb/Mart 2015	-14.11	-95.7	-102.88
April	-4.54	-32.31	-26.32
Jun	-3.28	-26.45	-16.24
Oktobar	-9.92	-64.32	-69.3452
decembar 2015	-15.12	-107.18	-110.963



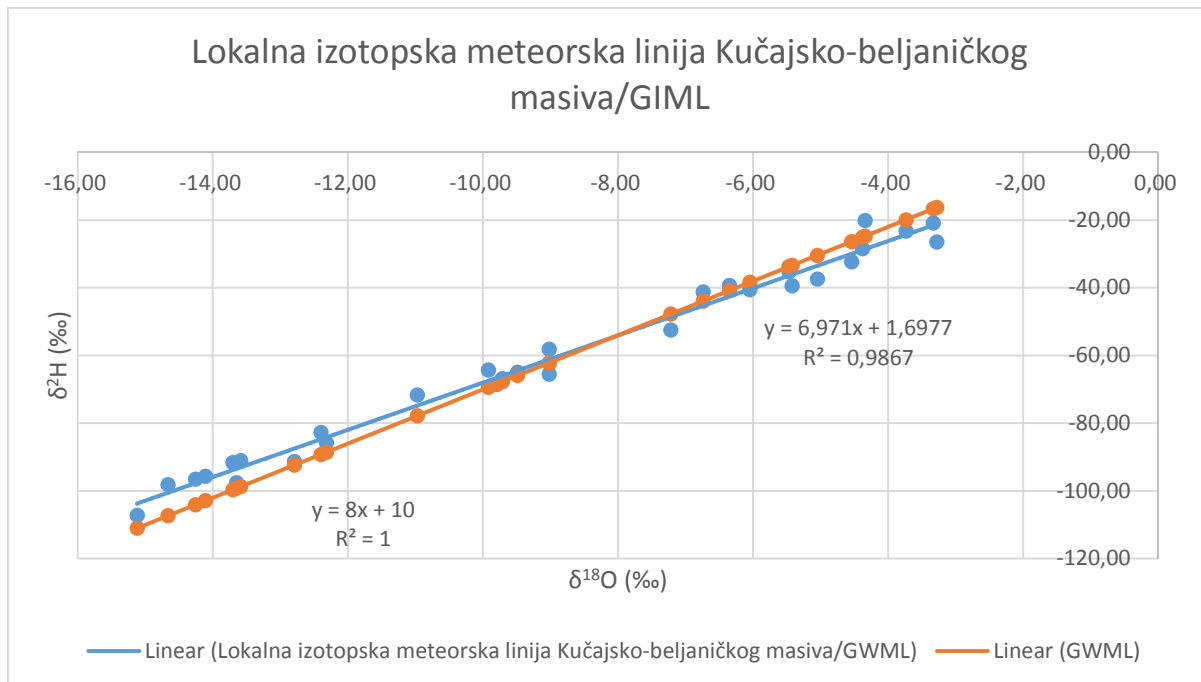
Slika 7.3. Lokalna izotopska meteorska kriva formirana na lokaciji uvala Velika Brezovica

Sumiranjem podataka Strmostena i Busovate formirana je lokalna izotopska meteorska linija Beljanice (slika 7.4.), koja će se po potrebi koristiti za preciznije tumačenje podataka pojava i objekata na ovom masivu.



Slika 7.4. Lokalna izotopska meteorska linija formirana na lokaciji Velika Brezovica

Finalna lokalna izotopska meteorska linija Kučajsko-beljaničkog masiva (slika 7.5.), predstavlja liniju koja objedinjuje izotopski sadržaj svih padavina sakupljenih u okviru ove tri lokacije i dva perioda uzorkovanja. Presek sa GML i blagi nagib u odnosu na ovu liniju ukazuje da su padavine izlučene u oblastima povišene vlažnosti vazduha.



Slika 7.5. Lokalna izotopska meteorska linija Kučajsko-beljaničkog masiva

Pored prikazanih rezultata izotopskih istraživanja na formiranju LIML, na istim uzorcima su izvedene analize na definisanju jonskog sastava kišnice (Tabela 23), koje su korišćene za definisanje promene hemijskog sastava cirkulacije podzemnih voda na Kučajsko-beljaničkom masivu od zone prihranjivanja do zone dreniranja.

Tabela 23. Rezultati osnovnog jonskog sastava padavina Kučajsko-beljaničkog masiva

Lokacija i period uzorkovanja	Koncentracija (mg/L)									TDS*
	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	
Sneg Busovata	1.755	0.67	0.12	0.29	0.00	0.76	0	1.102	3.9167	8.6374
Sneg Kučaj	9.301	0.54	0.51	0.70	0.02	1.39	0	1.811	8.4027	22.692
jan/feb/mart Sneg Kučaj	0.8821	3.47	0.15	1.80	0	3.14	0.379	0.707	17.634	28.194
jan/feb/mart sneg Beljanica	0.2365	0.55	0.07	0.31	0.01	0.81	0.265	0.67	6.7557	9.6859
Kiša April-Velika Brezovica	5.86	0.49	0.72	6.98	0.05	3.21	11.50	11.07	13.557	53.462
Kiša April-Strmosten	24.31	5.59	1.29	1.26	0.06	2.03	22.03	11.28	58.865	126.74
Kiša April-Busovata	2.523	0.58	0.37	5.10	0.04	2.49	1.812	8.040	17.949	38.930
Kiša Maj-Busovata	2.351	0.65	0.31	0.41	0.02	0.64	1.746	3.611	6.3541	16.135
Kiša Maj-Strmosten	17.42	3.07	0.86	6.73	0.06	2.86	12.73	11.08	50.706	105.55
Kiša Jun-Velika Brezovica	4.866	6.04	0.73	1.34	0.07	2.82	1.184	11.78	5.9424	34.785
Kiša Jun-Strmosten	10.41	1.05	0.42	0.20	0.03	0.40	0	4.669	34.297	51.489

rian June-Busovata	1.342	0.60	0.14	0.12	0.02	0.45	0.991	3.472	3.5496	10.715
Busovata Jul i Avgust	22.56	2.72	0.56	0.52	0.17	0.59	0	5.791	71.878	104.81
Busovata Septembar	2.378	0.71	0.19	0.48	0.01	0.62	1.529	3.720	12.576	22.239
Strmosten Jul i Avgust	1.179	1.36	0.15	0.32	0.01	0.51	8.464	3.620	3.4724	19.116
Sneg Beljanica Decembar	0.735	1.05	0.09	0.61	0.00	1.31	1.492	1.159	10.863	17.345
Sneg Kučaj Decembar	1.168	0.17	0.09	0.88	0.01	0.21	0.420	0.479	8.4535	11.911
Kiša Velika Brezovica Oktobar	2.484	0.90	0.22	0.42	0.01	0.60	8.921	2.949	4.1912	20.720
Kiša Busovata Oktobar	38.01	5.94	1.46	0.51	0.03	0.42	0	7.002	128.1	181.49
Sneg Beljanica Decembar	0.735	1.05	0.09	0.61	0.00	1.31	1.492	1.159	10.863	17.345
Sneg Kučaj Decembar	1.168	0.17	0.09	0.88	0.01	0.21	0.420	0.479	8.4535	11.911
Kiša Busovata novembar	6.165	1.94	0.37	0.44	0.01	0.99	0	7.988	17.212	35.139
Kiša Strmosten Novembar	9.434	1.62	0.38	0.20	0.04	0.49	0.387	4.321	32.345	49.226

*TDS (*total dissolved solids* – ukupne rastvorene materije)

7.2. Rezultati istraživanja na odabranim karstnim sistemima

7.2.1. Rezultati istraživanja na sistemima sa gravitacionom cirkulacijom na Beljanici

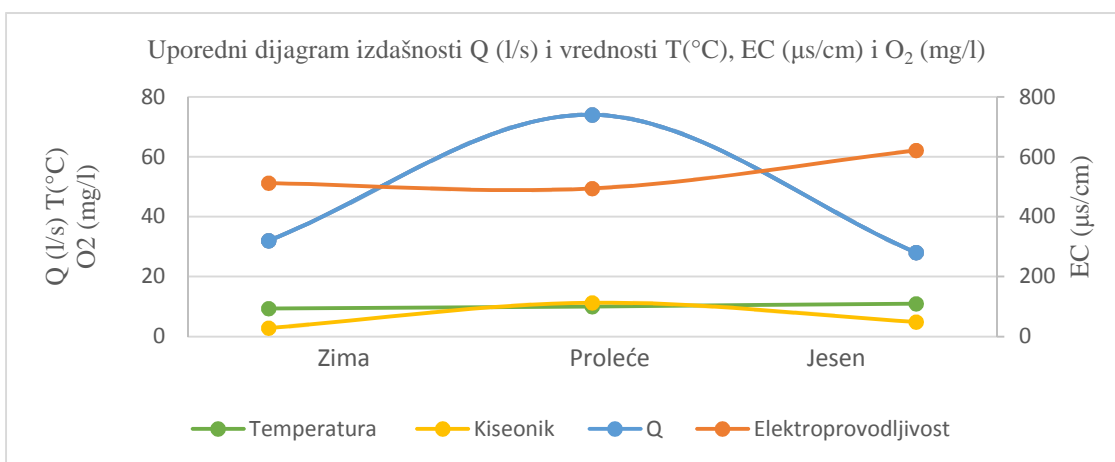
Sistem Suvi Do

Vrelo Suvi Do svrstano je u grupu sistema sa gravitacionim tipom cirkulacije. Temperatura vode je uglavnom postojana i varira sezonski za jedan stepen, dok se pH vrednost kreće od 7.25 do 7.7. Elektroprovodljivost vrela pokazuje najveću zavisnost od fizičko-hemijskih parametara u odnosu na količine voda koje se dreniraju, pa tako sa povećanjem proticaja na vrelu, elektroprovodljivost opada (slika 7.6.). Ono što ističe ovo vrelo je visoka vrednost elektroprovodljivosti podzemnih voda, koja je naročito povišena u periodu niskih voda (621 $\mu\text{s/cm}$).

Tabela 24. Rezultati monitoringa podzemnih voda vrela Suvi Do

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost ($\mu\text{s/cm}$)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	32	9.3	7.7	512	2.85	0.6
Proleće	74	10	7.3	494	11.3	0.5
Jesen	28	11	7.25	621	4.9	0.69

Kod rastvorenog kiseonika u vodi je uočena suprotna zavisnost (slika 7.6.), odnosno sa povećanjem izdašnosti, javlja se i povišena količina rastvorenog kiseonika u vodi, što ukazuje na priliv atmosferskih voda u prolećnom periodu. Niske količine od čak 2.85 mg/l u podzemnim vodama mogu da ukažu na znatno dublju cirkulaciju i zaleganje karstnih kanala. Vode sa ovog vrela su veoma bistre, što ide u prilog dubokoj cirkulaciji ili cirkulaciji kroz slabije karstifikovanu stenu, mada su u periodu maja 2014. godine, zabeležene izrazito mutne vode (slika 7.7.), a što je bila posledica obilnih kiša i aktiviranja svih kanala karstne izdani, kao i spiranja površinskog sloja zemlje.



Slika 7.6. Uporedni dijagram izdašnosti vrela Q (l/s) i vrednosti temperature, elektroprovodljivosti i kiseonika vode na Suvom dolu



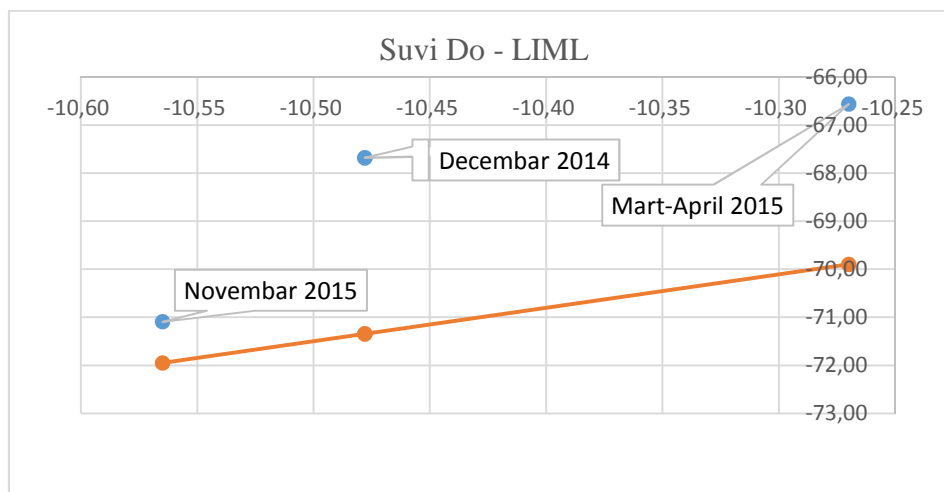
Slika 7.7. Voda jako povišene mutnoće na vrelu Suvi Do

Sadržaj stabilnih izotopa kreće se od -10.66 do 12.43 ‰ za izotop $\delta^{13}\text{C}$, dok se za δD kreću od -67.68 do -71.09 ‰, a za kiseonik vrednosti su oko 10‰ (tabela 25). Generalno,

izotopi se nalaze dosta iznad meteorske linije (slika 7.8.), što ukazuje na neku od sekundarnih frakcionacija u izotopskom sastavu voda, te se može zaključiti da vode vrela Suvi Do provode duži vremenski period u podzemlju. Međutim, sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{13}\text{C}$ relativno dobro odslikava sadržaj ugljenika iz svežih voda, pa se izvodi zaključak da vode konstantno imaju interakciju sa mladim vodama, odnosno vodama koje odslikavaju tipičnu gravitacionu cirkulaciju.

Tabela 25. Sadržaj stabilnih izotopa u vodi vrela Suvi Do

Suvi do izvor	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Zima	-12.43	-67.68	-10.48
Proleće	-10.66	-66.56	-10.27
Jesen	-9.61	-71.09	-10.56



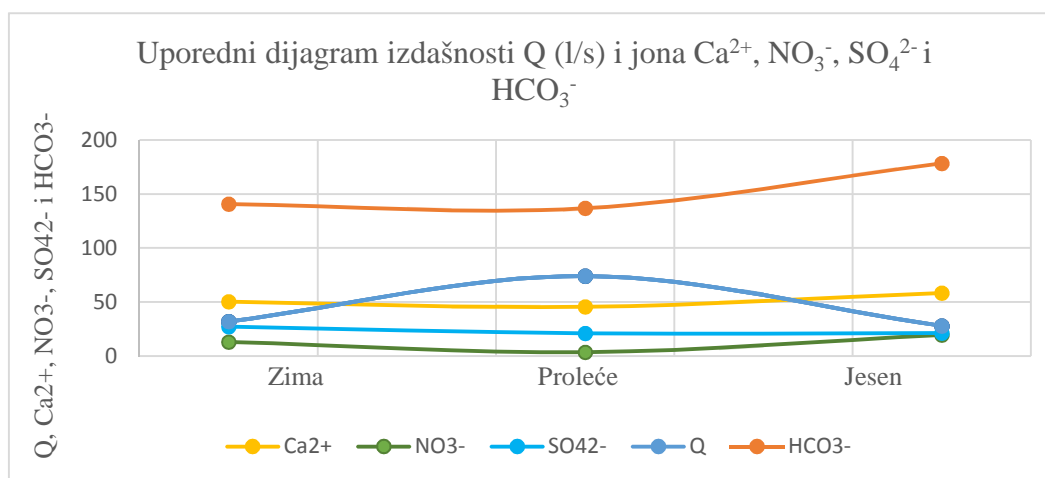
Slika 7.8. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi Suvog Dola

Na osnovu jonskog sastava može se zaključiti da se radi o $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ grupi voda, sa količinama Ca^{2+} koje imaju vrednosti i do 58.4 mg/l i vrednosti HCO_3^- do 178.37 mg/l (tabela 26). Pored ovih jona, u vodama dominiraju još i joni sulfata, čije vrednosti idu i do 27.14 mg/l, kao i nitrati (19.54 mg/l) i hloridi (10.66 mg/l). Visoke vrednosti nitrata, mogu biti posledica zagađenja unetih u sistem spiranjem nečistoća sa površine terena. Ono što vode ovog vrela čini posebno interesantnim je što se u njima nalaze i povišene vrednosti K^+ (maksimalno 4.631 mg/l), kao i vrednosti Mg^{2+} i Na^+ . Primese ovih jona ukazuju na kontakt podzemne vode Suvog dola sa stenama koje nisu karbonatnog porekla. Kao i kod osnovnih fizičko-hemijskih karakteristika, i u pogledu jonskog sastava

se uočava jasna zavisnost proticaja i sadržaja jona u vodi. Sa povećanjem izdašnosti smanjuje se sadržaj svih komponenti jonskog sastava (vidi sliku 7.9.).

Tabela 26. Jonski sastav vode vrela Suvi Do

Suvi Do	mg/L								
	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Zima	50.26	4.631	3.835	5.972	0.0433	9.9966	13.1632	27.1456	140.7067
Proleće	45.55	1.471	2.819	2.679	0.05	1.9731	3.5497	21.0344	136.7925
Jesen	58.4	3.282	4.912	6.691	0.076	10.6636	19.5447	21.2226	178.3742



Slika 7.9. Uporedni dijagram proticaja Q (l/s) i jona Ca²⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻ na vrelu Suvog Dola

Kako na vrelu Suvog Dola nisu sprovedene analize sadržaja radioaktivnih izotopa u vodi, ne može se sa sigurnošću govoriti o dužini boravka vode u podzemlju, mada definitivno treba uzeti u obzir rezultate fizičko-hemijskih karakteristika, kao i jonskog sastava, koji ukazuju na duže vreme cirkulacije voda kroz karstni sistem. Iz tog razloga, na vrelu Suvog Dola je u budućnosti potrebno sprovesti detaljnija istraživanja, kojima će se utvrditi starost voda u periodu velikih i malih voda. Tim istraživanjima bi se svakako i doprinelo boljem poznavanju funkcionisanja karstne izdani celokupnog severnog oboda Beljaničkog masiva.

Sistem Epikarst izvor

Izvor Epikarst predstavlja jedini osmatrani izvor u okviru celog masiva koji drenira zonu epikarsta. Zona epikarsta zapravo predstavlja potpovršinski deo stenske mase, odnosno

njenu najvišu zonu, koja je zbog svog položaja u steni najviše izložena procesu karstifikacije, a čija je vodopropusnost, obzirom na ispucalost, ravnomerno raspoređena u prostoru u odnosu na ostali deo stenske mase (Klimchouk 2000, Jemcov 2008). Interpretacijom izotopskih i geohemijskih rezultata prikupljenih na karstnim izvorima, Bakalowicz *et al.* (1974) su zaključili da se karstna izdan prihranjuje sa zakašnjenjem upravo zbog potpovršinskog epikarstnog sloja.

U cilju definisanja karakteristika voda koje dreniraju ovu površinu, izvršena su ispitivanja fizičko-hemijskih, jonskih i izotopskih karakteristika voda. Naime, izvor je male izdašnosti, a voda ima blago povišenu pH vrednost u odnosu na ostala tipična karstna vrela (7.6 - 7.9), kao i nešto nižu elektroprovodljivost, koja je viša u periodu malih voda, kada se voda, usled dužeg boravka u podzemlju, obogaćuje rastvorenim mineralnim materijama. Temperature vode su postojane i kreću se oko 10 °C. Usled usporene cirkulacije kroz ujednačeni sistem sitnijih pukotina ove zone, vrednosti kiseonika su niže (2.8 - 4.8 mg/l). Rezultati fizičko-hemijskih parametara su prikazani u tabeli 27.

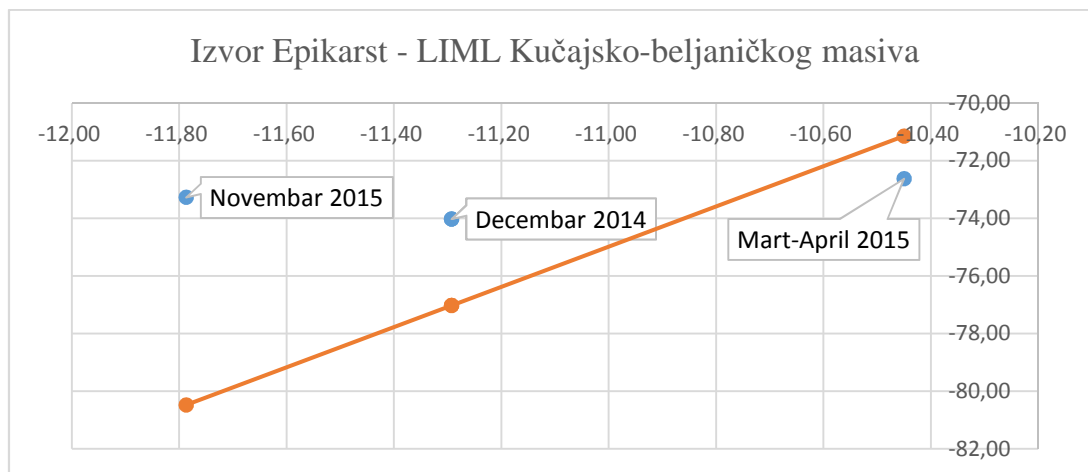
Tabela 27. Rezultati monitoringa podzemnih voda izvora Epikarst

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost (μs/cm)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	0.1	9.9	7.8	368	2.9	1.3
Proleće	0.4	9.6	7.6	360	2.8	1.9
Jesen	0.3	10.2	7.9	352	4.8	1.49

Sadržaj stabilnog izotopa $\delta^{13}\text{C}$ ukazuje na relativno neznatno izmenjeni izotopski sastav vode (-11.08 do -13.15 ‰, tabela 28) u odnosu na sadržaj u zemljišnom gasu, što ukazuje na bržu cirkulaciju vode i nedovoljno provedenog vremena u podzemlju, čime bi se sastav stabilnog izotopa $\delta^{13}\text{C}$ promenio usled duže interakcije sa matičnom stenom. Vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ i δD za decembar 2014. i novembar 2015. godine su nešto lakše od vrednosti u prolećnom periodu (slika 7.10.), što ukazuje na duži kontakt vode sa stenom, ali svakako i dalje govori o brznoj cirkulaciji kroz stensku masu.

Tabela 28. Sadržaj stabilnih izotopa u vodi izvora Epikarst

Epikarst	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Zima	-13.15	-74.02	-11.29
Proleće	-11.08	-72.62	-10.45
Jesen	-12.35	-73.27	-11.79

Slika 7.10. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi izvora Epikarst

Na osnovu jonskog sastava vidi se da su vode $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ grupe, sa količinama Ca^{2+} koje imaju maksimalne vrednosti od 53.07 mg/l, odnosno nakon letnjeg perioda, kada se voda usled dužeg boravka u ovoj zoni obogaćuje sadržajem Ca^{2+} i sadržajem HCO_3^- do 175.73 mg/l (tabela 29). Pored sulfata (maksimalno 18.37 mg/l), u vodi izvora Epikarst se uočavaju i količine Mg^{2+} (2.67 mg/l) i Na^+ (2.73 mg/l), a što sve ukazuje da je jednim delom sliv ove epikarst zone i u zoni škriljaca ili pak u sistem mogu biti unete preko padavina.

Tabela 29. Jonski sastav vode izvora Epikarst

Epikarst	mg/L								
	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Na^+	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Zima	39.47	0.8475	1.503	2.049	0.0084	0.9097	1.115	18.1544	117.6792
Proleće	38.13	0.8382	1.352	1.556	0.0352	0.5029	0.9507	17.6348	113.3075
Jesen	53.07	0.8458	2.67	2.743	0.0382	0.6348	1.78	18.3747	175.7308

Sistem izvora Epikarst drenira malu i pripovršinsku zonu stenske mase, koja se nalazi u zaleđu ovog izvora, i kao takav reflektuje neznatnu izmenu izotopskog i jonskog sastava, kao i fizičko-hemijskih karakteristika podzemnih voda tokom cirkulacije kroz podzemlje, što ujedno i potvrđuje da se radi o vodama sa brzom, gravitacionom cirkulacijom, koje malo vremena provode u podzemlju. Jedan deo voda koji se drenira preko ovog izvora se formira na škriljcima, što je i potvrđeno relativno povećanim pH tokom uzorkovanja u različitim vremenskim periodima.

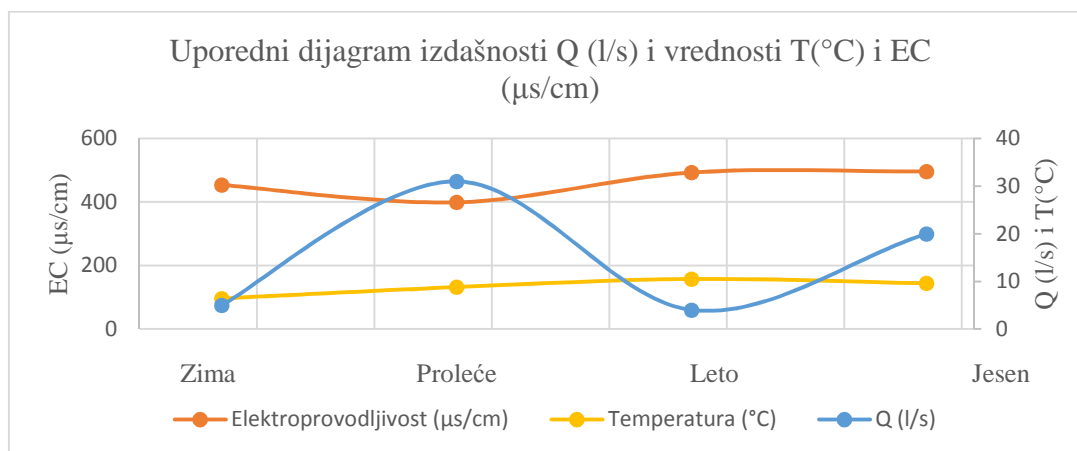
Sistem Pećina Živkova reka

Pećina Živkova reka predstavlja zonu isticanja podzemnih voda najmanjeg izdvojenog sistema zapadnog oboda Kučajsko-beljaničkog masiva, odakle jedan deo voda izbija na površinu u vidu potoka manje izdašnosti, dok se manji deo voda gubi u jednom delu pećine u dublje karstne kanale. Vrednost pH se kreće iznad 8, a maksimalno iznosi i 8.5 (tabela 30). Temperatura vode odražava sezonski karakter, pa tako raste srazmerno godišnjem dobu, dok elektroprovodljivost pokazuje obrnutu zavisnost u odnosu na proticaj (slika 7.11.).

Tabela 30. Rezultati monitoringa podzemnih voda u pećini Živkova reka

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost (μs/cm)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	5	6.4	8.48	454	6.7	0.9
Proleće	31	8.8	8.36	399	12.2	3.15
Leto	4	10.5	8.2	493	6.25	4.01
Jesen	20	9.6	8.5	496	6.4	1.16

Sadržaji rastvorenog kiseonika i mutnoće vode dosta variraju. Najviše vrednosti rastvorenog kiseonika se uočavaju u prolećnom periodu (12.2 mg/l), što je posledica velikih voda i turbulentnog režima cirkulacije. Mutnoća vode se kreće od 0.9 – 4.01 NTU, gde su najviše vrednosti zabeležene u prolećnom i letnjem periodu. Uzrok povišene vrednosti mutnoće u letnjem periodu može biti posledica iznošenja suspendovanog taloga iz pećine nataloženog u toku perioda velikih voda.



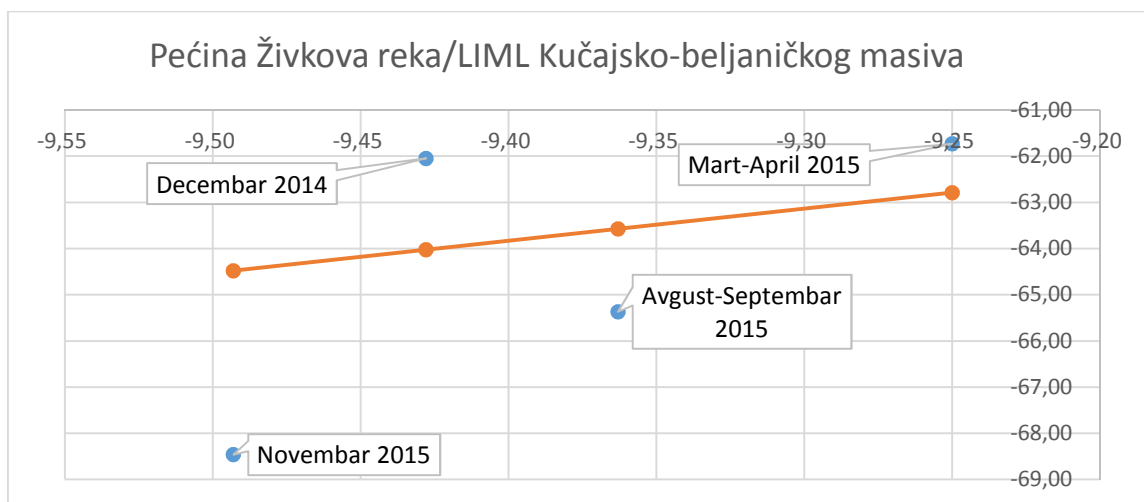
Slika 7.11. Uporedni dijagram izdašnosti Q (l/s) i vrednosti temperature i elektroprovodljivosti

Većina uzoraka stabilnih izotopa leži blizu lokalne meteorske linije, što govori da se radi o veoma brznoj cirkulaciji podzemnih voda, izuzev novembra 2015. godine, koji leži znatno ispod lokalne meteorske linije (slika 7.12.), te govori o izmenjenom izotopskom sastavu stene, što može biti posledica dužeg boravka u pećinskom sistemu ili posledica isticanja vode koja se prihranila sa druge lokacije u periodu malih voda (letnjim mesecima).

Sadržaj $\delta^{18}\text{O}$ je dosta ujednačen i iznosi oko -9 ‰, dok δD varira od -61.73 do -68.46 ‰ (tabela 31). Ugljenikov stabilni izotop ima nešto više vrednosti (do -15.25 ‰) u odnosu na prethodne sisteme i ukazuje na slabu izotopsku izmenu ugljenika $\delta^{13}\text{C}$ unetog sa površine terena, odnosno brzu cirkulaciju vode od ulaza do izlaza iz podzemnog karstnog sistema.

Tabela 31. Sadržaj stabilnih izotopa u vodi pećine Živkova reka

Živkova reka pećina	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Zima	-13.1	-62.04	-9.43
Proleće	-15.25	-61.73	-9.25
Leto	-11.66	-65.37	-9.36
Jesen	-12.72	-68.46	-9.49



Slika 7.12. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi izvora Živkova reka

Pored stabilnih izotopa, u Živkovojoj reci je vršena i analiza sadržaja tricijuma T, čija vrednost iznosi 7.7 (TJ) (tabela 32), na osnovu čega se izvodi zaključak da su vode mlade, odnosno starosti 5-10 godina (tabela 16, poglavlje 5). Međutim, kako sadašnje vrednosti tricijuma u padavinama iznose oko 9 TJ, i kako je uzorkovanje vršeno u periodu letnjeg

minimuma, može se izvesti zaključak da u pećinskim kanalima u periodu malih voda postoji priliv starijih voda, odnosno voda iz kanala koji zaležu nešto dublje u podzemlje, što dokazuje i vrednost $\delta^{13}\text{C}$, koja je u letnjem periodu iznosila -11.66‰ , i koja govori o nešto dužem kontaktu vode sa matičnom stenom u odnosu na druga godišnja doba, odnosno na druge hidrološke uslove. U svakom slučaju, ova vrednost nije visoka, te može da govori o starosti voda od svega par meseci (6 meseci do godinu dana).

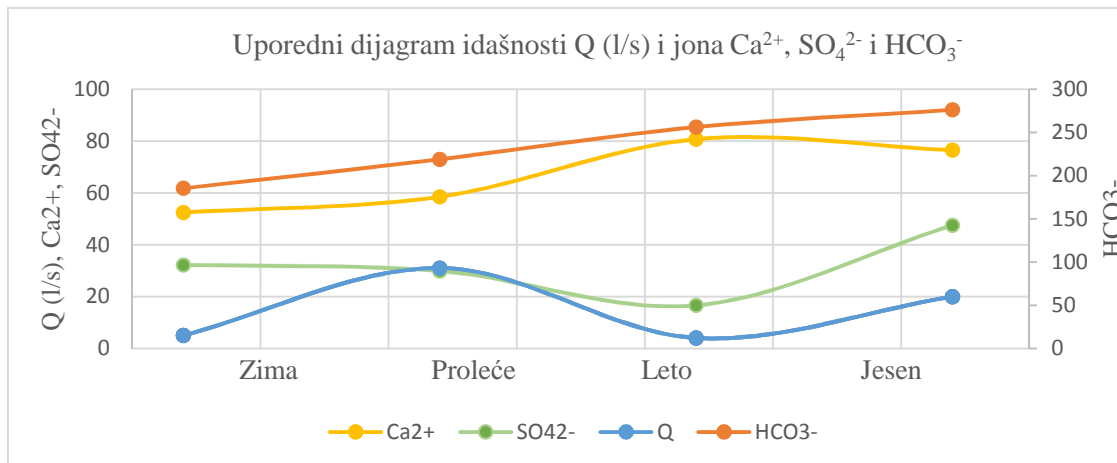
Tabela 32. Sadržaj radioaktivnih izotopa ^3H u vodi pećine Živkova reka

Sadržaj radioaktivnih izotopa	^3H (TU)	(+/-) 1 sigma
Živkova reka pećina	7.70	0.53

Na osnovu jonskog sastava zaključuje se da se radi o vodama $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ grupe, sa količinama Ca^{2+} koje imaju maksimalne vrednosti do čak 80.73 mg/l (tabela 33), odnosno u letnjem periodu, kada se voda usled dužeg boravka u pećini sa povišenim sadržajem CO_2 znatno obogaćuje sadržajem Ca^{2+} . Sa povećanjem proticaja u pećini smanjuje se sadržaj Ca^{2+} (slika 7.13.). Sadržaj HCO_3^- kreće se od 185.38 mg/l i raste konstantno tokom godine. Sulfati pokazuju direktnu vezu sa količinama voda koje ističu iz pećine, a najviše vrednosti su zabeležene u jesen, kada iznose 47.49 mg/l .

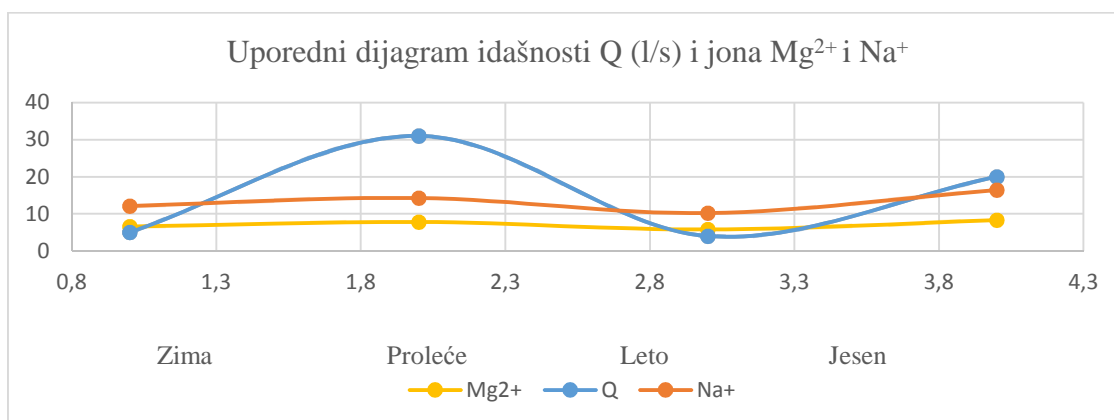
Tabela 33. Jonski sastav voda u pećini Živkova reka

Živkova reka pećina	mg/L								
	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Na^+	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Zima	52.49	2.049	6.554	12.12	0.0622	7.002	3.6456	32.2446	185.3892
Proleće	58.51	1.723	7.799	14.26	0.08	5.4281	0.1244	29.893	219.0408
Leto	80.73	1.251	5.769	10.21	0.085	2.7419	2.2303	16.6061	256.2
Jesen	76.52	1.571	8.282	16.41	0.1077	7.8863	8.4815	47.4999	276.2792



Slika 7.13. Uporedni dijagram izdašnosti Q (l/s) i jona Ca²⁺, SO₄²⁻ i HCO₃⁻ za Živkovu reku

Količine magnezijuma i natrijuma se, kao i sadržaji sulfata, povećavaju u periodu velikih voda (slika 7.14.), dok u manjim vodama njihove koncentracije opadaju, što jasno ukazuje da se radi o prihranjivanju voda koje delom cirkulišu kroz dolomitične krečnjake. Maksimalne vrednosti kalijuma iznose 2.049 mg/l, a takođe su primetne i određene količine nitrata (maksimalno 8.48 mg/l).



Slika 7.14. Uporedni dijagram izdašnosti Q (l/s) i jona Mg²⁺ i Na⁺ za Živkovu reku

Na kraju se može zaključiti da pećina Živkova reka ima veoma razvijenu mrežu karstnih kanala, od kojih neki imaju dvojaku funkciju u zavisnosti od hidroloških prilika. Dominantni pećinski kanal je sa tipičnom gravitacionom cirkulacijom, a voda koja se infiltrira u podzemlje ne potiče samo sa karstnih terena, već postoji i veliki uticaj voda koje su bile u kontaktu kao što je već navedeno i sa dolomitičnim krečnjacima titona, a moguće i sa dacitima koji nisu registrovani na površini terena.

Sistem Veliko i Malo vrelo

Sistem Velikog i Malog vrela se može posmatrati kao jedinstven sistem gravitacionih vrela, koji imaju različite koncentrične zone prihranjivanja (ponorske zone). Oba vrela ističu ispod odseka nastalog Resavskim rasedom, na južnom delu Beljanice. Kako je opitima obeležavanja potvrđena veza Malog vrela sa ponorom Rečke, i veza Velikog vrela sa ponorom Busovate i ponorom Rečke, ovde će se oni razmatrati kao jedan sistem.

Ponor Busovate i Veliko vrelo

Vode na Velikom vrelu imaju fizičko-hemijske parametre koji ne variraju mnogo sezonski i ne pokazuju jaku korelaciju sa proticajem na vrelu. Vrednost pH se na vrelu kreće od 7.6 – 8.2, gde je najviša vrednost uočena u periodu jeseni, što može ukazati na veći priliv voda sa ponora Busovate, kod koga je pH vrednost konstanto povišena i kreće se od 8.2 do 8.3. Zabeležene vrednosti pH ispod 8, a što je u zimskom, prolećnom i jesenjem periodu, ukazuju da se vode preovlađujuće prihranjuju difuziono, odnosno infiltracijom vode sa površine jurskih krečnjaka Beljaničke kape, o čemu svedoče i velike količine voda koje se dreniraju na izvoru (685 – 2276 l/s), u odnosu na vode koje poniru na ponoru Busovate (maksimalno 30 l/s). Fizičko-hemijske karakteristike voda prikazane u tabelama 34 i 35.

Elektroprovodljivost vode na ponoru Busovate kreće se od 61 – 88 $\mu\text{s}/\text{cm}$, dok se na vrelu uočavaju znatno veće vrednosti i do 413 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Temperature vode na ponoru variraju sezonski i zavise od klimatskih uslova u višim, planinskim predelima. Veliko vrelo se odlikuje hladnim vodama, čije se vrednosti kreću 8 – 10 °C, što ga čini jednim od najhladnijih vrela u okviru masiva. Sadržaj rastvorenog kiseonika u vodi Velikog vrela varira sezonski, što zavisi od količine vode koja ističe na vrelu, pa tako u prolećnom periodu, kada su velike vode, ova vrednost iznosi i do 10 mg/l. Mutnoća vode na ponoru Busovate je visoka, i u prolećnom periodu iznosi čak 20.4 NTU, dok je voda na Velikom vrelu znatno bistrija, a zamućenje je konstatovano samo u jesenjem periodu (2.34 NTU), što takođe ukazuje na intenzivno prihranjivanje po ogolićenoj površi beljaničke kape i

krečnjačkog odseka, gde se usled tankog, ili čak nedostatka, zemljišnog pokrivača u podzemlje ne unose velike količine suspendovanih čestica.

Tabela 34. Rezultati monitoringa podzemnih voda na ponoru Busovate

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost (μs/cm)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	10	4.8	8.3	71	3.4	7.8
Proleće	30	13.8	8.25	61	3.1	20.4
Leto	4	7.3	8.2	88	1.4	3.6
Jesen	8	5.2	8.3	63	6.38	17.29

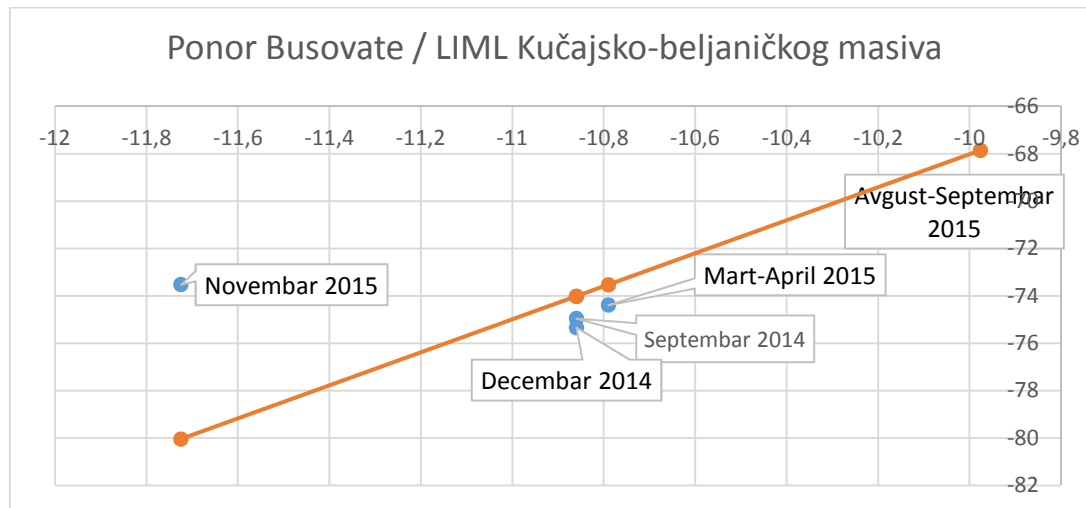
Tabela 35. Rezultati monitoringa podzemnih voda Velikog vrela

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost (μs/cm)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	1316	8	7.7	398	4.5	1.05
Proleće	2276	10	7.65	388	10	0.53
Leto	79	8.7	7.6	397	7.5	0.83
Jesen	685	8.2	8.2	413	6.2	2.34

Na osnovu sadržaja stabilnog ugljenika $\delta^{13}\text{C}$ u vodi ponora Busovate, uočava se relativno slabo izmenjeni sadržaj u odnosu na sadržaj izotopskog sastava u zemljišnom sloju na ponoru Busovate, koji bi na osnovu rastinja mogao pripadati mešovitoj grupi C3 – C4 (-12) – (-25) ‰ (vidi poglavlje 5.3). Vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ toka koji ponire u ponor Busovate se kreću od -14.13 do -15.41 ‰ (tabela 36). Vrednosti stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{D}$ ukazuju na njihov površinski karakter, kao i na prisustvo primarne frakcionacije u površinskom toku. Plotovanjem rezultata na dijagram, uočava se jaka veza se atmosferskim vodama (slika 7.15.), obzirom da gotovo rezultati svih uzoraka padaju uz lokalnu meteorsku liniju, uz izuzetak uzorka u novembru mesecu 2015. godine, koji ukazuje na sadržaj vode nastao od padavina koje su formirane od ponovno isparene vodene pare u letnjem periodu, odnosno od padavina koje su se izlučile, podlegle isparavanju i ponovno izlučile, pri čemu su značajno izmenile svoj izotopski sadržaj.

Tabela 36. Sadržaj stabilnih izotopa vode na ponoru Busovate

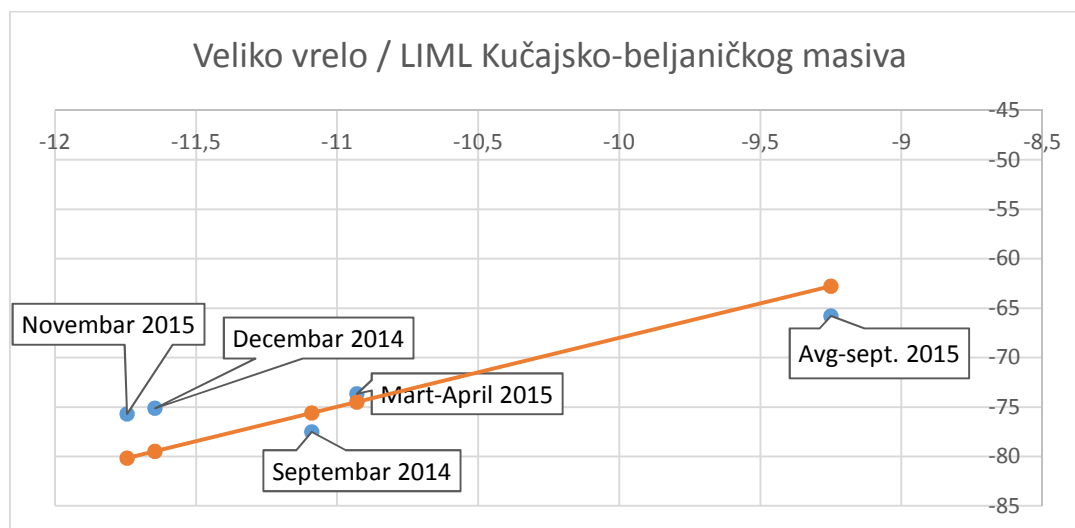
Ponor Busovate	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Septembar 2014	-	-74.95	-10.86
Zima	-14.13	-75.33	-10.86
Proleće	-15.54	-74.38	-10.79
Leto	-15.41	-69.21	-9.98
Jesen	-15.83	-73.52	-11.72

Slika 7.15. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi ponora Busovate

Sadržaj stabilnog ugljenika $\delta^{13}\text{C}$ u vodi Velikog vreła ukazuje na kontakt sa matičnom stenom, pa se vrednosti kreću od -9.68 do -11.86 ‰ (tabela 37). Na osnovu rezultata stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{D}$ i njihovog plotovanja na dijagram LIML Kučajsko-beljaničkog masiva, uočava se jaka veza sa vodama padavina, odnosno sve tačke padaju uz lokalnu liniju, što govori da se radi o tipičnoj karstnoj vodi sa brzom cirkulacijom, koja gotovo u potpunosti reflektuje sadržaj padavina. Time se može zaključiti da voda u sistemu provodi između nekoliko dana i moguće i nekoliko meseci. Izuzetak su vrednosti septembra 2014. i 2015. godine, koje padaju nešto ispod lokalne meteorske linije, te ukazuju na duži kontakt vode sa matičnom stenom (slika 7.16.).

Tabela 37. Sadržaj stabilnih izotopa u vodi Velikog vrela

Veliko vrelo	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Zima	-	-77.5	-11.09
Proleće	-11.86	-75.11	-11.65
Leto	-9.68	-73.65	-10.93
Jesen	-10.79	-65.78	-9.25
Zima	-10.98	-75.69	-11.75

Slika 7.16. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi izvora Veliko vrelo

Kako bi se utvrdila starost voda Velikog vrela i potvrdile pretpostavke da se radi o tipičnoj gravitacionoj cirkulaciji, izvršeno je uzorkovanje vode za analizu sadržaja radioaktivnih izotopa ^3H i $^3\text{H}/^3\text{He}$. Rezultati analize prikazani su u tabeli 38, ukazuju da u periodu recesije, kada na izvoru ističu vode koje se najduže zadržavaju u izdani, starost voda iznosi 0 godina, odnosno radi se o veoma mladoj vodi, koja je u podzemlju provela manje od 12 meseci. Na osnovu sadržaja tricijuma koji iznosi 6.56 TJ, što je navedeno u tabeli 16 poglavlja 5.3.1., pretpostavlja se da se radi o mladim vodama, starosti 5 do 10 godina. Proračunom starosti vode metodom $^3\text{H}/^3\text{He}$ i uvođenjem greške za proračun, dobija se neposredna starost vode, odnosno dobija se da starost vode sa Velikog vrela maksimalno može iznositi 16 meseci.

Tabela 38. Sadržaj radioaktivnih izotopa ^3H i $^3\text{H}/^3\text{He}$ u vodi Velikog vrela

Sadržaj radioaktivnih izotopa	^3H (TJ)	(+/-) 1 sigma	$^3\text{H}/^3\text{He}$ starost (godine)	Neposredna starost (godine)
Veliko vrelo	6.56	0.20	0.0	1.4

Uporedo sa analizom ^3H i $^3\text{H}/^3\text{He}$, rađena je analiza plemenitih gasova (tabela 39), na osnovu kojih je proračunata temperatura vode u zoni prihranjivanja i koja iznosi 10.69 °C. Kako je temperatura vode u zoni prihranjivanja u prolećnom periodu iznosila oko 13.8 °C, zimskom 4.8 i letnjem 7.3 °C, izvodi se zaključak da je voda temperature 10.69 °C infiltrirana ili u periodu između zime i proleća (februar-mart) ili u periodu između proleća i leta (maj-jun). Stoga, voda sa Velikog vrela koja je isticala početkom septembra 2015. godine bila je stara maksimalno 7 meseci, a minimalno 3 meseca.

Tabela 39. Sadržaj plemenitih gasova u vodi Velikog vrela

Plemeniti gasovi	He (ccSTP/g)	Ne (ccSTP/g)	Ar (ccSTP/g)	Kr (ccSTP/g)	Xe (ccSTP/g)	R/Ra	T (°C)	chi2-test
Veliko Vrelo	4.3618E-08	1.7572E-07	3.7787E-04	8.7538E-08	1.2737E-08	0.9852	10.69	0.21

Kako bi se odredile ulazne vrednosti izotopa ^3H i ^{14}C u sistem, odnosno početne, nulte vrednosti, a u svrhu utvrđivanja starosti voda na pojavama i objektima, izvršeno je uzorkovanje vode za utvrđivanje sadržaja ovih izotopa u vodama ponora Busovate. Na osnovu rezultata (tabele 40 i 41), dobijeno je da su ulazne vrednosti tricijuma za područje Beljanice 9.06 TJ, a za ^{14}C 101.43 pMC (*per modern carbon* – sadržaj modernog ugljenika). Proračunom starosti voda sa ponora Busovate, uvođenjem vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ u vodi u periodu uzorkovanja, kao i vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ za matičnu stenu, dobijen je rezultat da su vode na ponoru Busovate stare 87 godina, što, kada se uzme u obzir da se radi o izrazito površinskoj vodi, govori da se u površinski tok Busovate ulivaju vode veće starosti, a što se može pripisati pukotinskoj izdani formiranoj u okviru palezojskih škriljaca zastupljenih u istočnom delu uvale Busovate (sa većim brojem manjih izvora), kao i u najvišim delovima Kučajsko-beljaničkog masiva.

Tabela 40. Sadržaj tricijuma vode na ponoru Busovate

Radioaktivni izotopi	^3H (TJ)	(+/-) 1 sigma
Ponor Busovate	9.06	0.36

Tabela 41. Sadržaj ugljenika ^{14}C i procenjena starost voda na ponoru Busovate

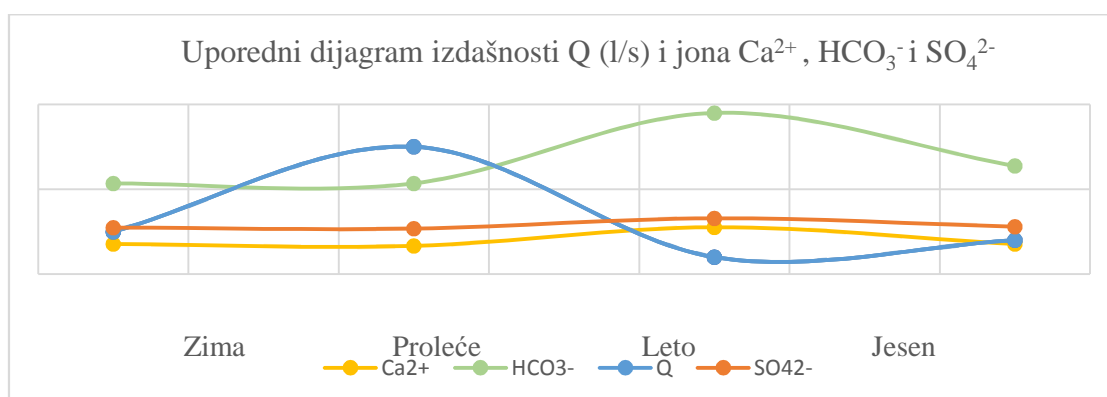
Radioaktivni izotopi	^{14}C (pMC)	(+/-) 1 sigma	$\delta^{13}\text{C}$ u vodi ponora Busovate ‰	$\delta^{13}\text{C}$ u matičnoj steni za ceo masiv ‰	^{14}C starost (godine) (^{14}C inac=100 pMC) ($\delta^{13}\text{C}$ vode i stene je uzet u obzir)
Ponor Busovate	101.43	0.42	-15.41	+1.37	87

U vodama ponora Busovate u najvećim koncentracijama se javljaju anjoni HCO_3^- (21.35 do 37.96 mg/l) i SO_4^{2-} (10.73 do 13.15 mg/l), i kationi Ca^{2+} sa koncentracijama koje se kreću od 6.695 do 11.05 mg/l (tabela 42). Pored ovih, u vodama se još javljaju i male količine jona Mg^{2+} i Na^+ (max 2.7 mg/l za Na^+ i 1.923 mg/l za Mg^{2+}). Generalno, ovakav jonski sastav ukazuje na površinske vode slabo obogaćene mineralnim materijama, zbog svoje brze cirkulacije, odnosno bez duže interakcije sa stenom.

Tabela 42. Jonski sastav voda na ponoru Busovate

Ponor Busovate	mg/L								
	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Na^+	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Zima	7.084	0.7585	1.46	2.528	0.0334	0.9586	2.2454	10.9699	21.35
Proleće	6.659	0.8507	1.395	2.492	0.03	1.0076	2.1951	10.7327	21.37542
Leto	11.05	1.232	1.923	2.728	0.0456	0.8278	1.2901	13.1517	37.96742
Jesen	7.081	1.392	1.425	2.217	0.0322	0.8495	0	11.1696	25.49292

Uporednim dijagramom jonskog sastava i proticaja uočava se da se sa povećanjem proticaja smanjuju vrednosti kalcijuma, hidrokarbonata i sulfata, dok se sa opadanjem količina voda koje utiču u ponor Busovate, ove vrednosti povećavaju (slika 7.17.), što upravo ide u prilog vremenu interakcije vode sa stenom.



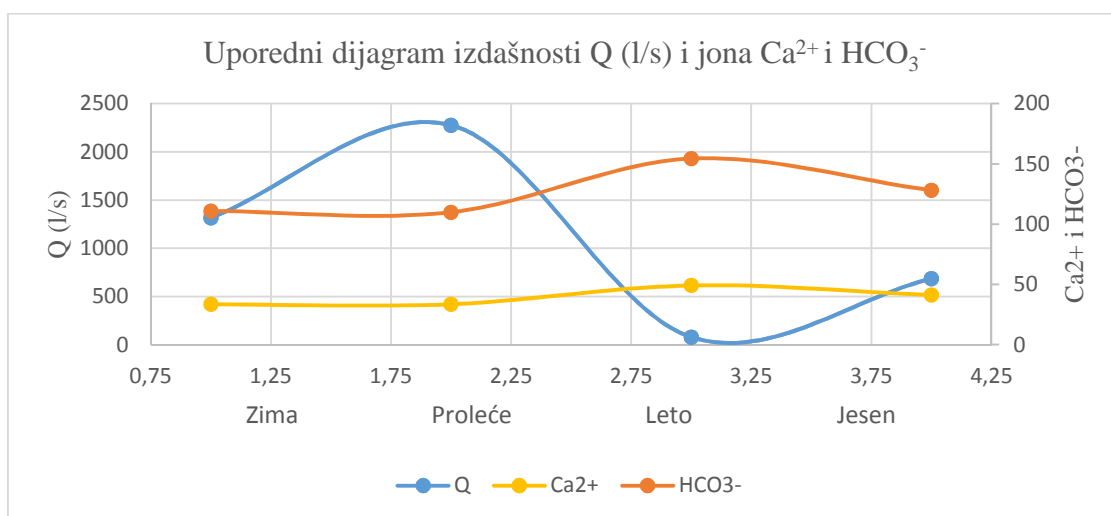
Slika 7.17. Uporedni dijagram izdašnosti Q (l/s) i jona Ca^{2+} , HCO_3^- i SO_4^{2-} za ponor Busovate

Jonski sastav voda Velikog vrela ukazuje da se radi o vodama $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ grupe, sa količinama Ca^{2+} koje imaju maksimalne vrednosti do 49.17 mg/l, odnosno nakon letnjeg perioda, kada se voda usled dužeg boravka u ovoj zoni obogaćuje sadržajem Ca^{2+} , i sadržajem HCO_3^- do 154.43 mg/l, takođe u letnjem periodu (tabela 43). Sadržaj ostalih jona je relativno nizak, te se samo javljaju koncentracije sulfata od maksimalno 8.87 mg/l, kao i nešto više koncentracije nitrata (maksimalno 6.062 mg/l).

Tabela 43. Jonski sastav vode Velikog vrela

Veliko vrelo	mg/L								
	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Na^+	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Zima	33.48	0.5654	2.113	0.7118	0.0074	0.7782	5.4083	8.3734	110.9692
Proleće	33.54	0.457	2.037	0.5952	0.0345	0.7095	2.1418	8.8756	109.9017
Leto	49.17	0.5787	2.393	0.8035	0.0211	0.7507	5.9845	7.9036	154.4317
Jesen	41.25	0.6143	1.959	1.072	0.0297	0.7681	6.062	6.6999	128.1

Uporedni dijagram proticaja i jona kalcijuma i hidrokarbonata, ukazuje na jaku vezu, u kojoj se sa povećanjem izdašnosti smanjuju vrednosti kalcijuma i hidrokarbonata, dok sa opadanjem (kao što je period recesije u letnjim mesecima), ove vrednosti rastu (slika 7.18.). Količine natrijuma koje poniru u sistem na vrelu Busovate, gotovo se u potpunosti apsorbuju u nekoj od geohemijskih reakcija (na Busovati je max 2.7 mg/l za Na^+ , dok je na Velikom vrelu max. 1.07 mg/l), dok se vrednost Mg^{2+} poveća sa maksimalnih 1.923 mg/l na 2.393 mg/l. Povećane koncentracije magnezijuma mogu biti posledica rastvaranja dolomitičnih krečnjaka, koji se nalaze u okviru stena jurske starosti.

Slika 7.18. Uporedni dijagram izdašnosti i jona Ca^{2+} i HCO_3^- za Veliko vrelo

Na kraju se može reći da se vode Velikog vrela samo malim delom prihranjuju vodama sa ponora Busovate, što za posledicu ima delimični uticaj ponorskih voda na vode Velikog vrela. Dominantno prihranjivanje je sa površi Beljaničke kape koje daje vodama ovog vrela preovlađujući CaCO_3 sadržaj, koji reflektuje brzu cirkulaciju kroz podzemne karstne provodnike.

Ponor Rečke i Malo vrelo

Ponor Rečke ima veće količine voda od ponora Busovate, kao i veće vrednosti elektroprovodljivosti vode. pH vrednost je kao i kod prethodne ponorske zone gotovo uvek preko 8, izuzev u letnjim mesecima kada iznosi 7.9 (tabela 44). Temperature vode odražavaju sezonski karakter, a mutnoća vode je relativno niska za površinski tok (maksimalno 7.5 NTU), koji cirkuliše preko deluvijalnog nanosa.

Tabela 44. Rezultati monitoringa podzemnih voda na ponoru Rečke

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	24	3.4	8.3	107	3.6	6.5
Proleće	38	7	8.29	87	4.5	7.5
Leto	5	8	7.9	132	6.67	4.2
Jesen	22	3.8	8.3	112	6.5	4.55

Analiza veze ovog ponora sa Malim vrelom pokazuje sličnosti samo u pogledu pH vrednosti, pa tako na Malom vrelu pH vrednost iznosi manje od 8 samo u letnjem periodu (7.3) (tabela 45). Temperatura vode na Malom vrelu je postojana, a srednja vrednost iznosi 9.38 °C. Elektroprovodljivost je takođe konstantna i kreće se od 440-451 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Kiseonik u vodi varira u skladu sa promenom proticaja, pa su najviše vrednosti od 12.64 mg/l zabeležene u prolećnim mesecima.

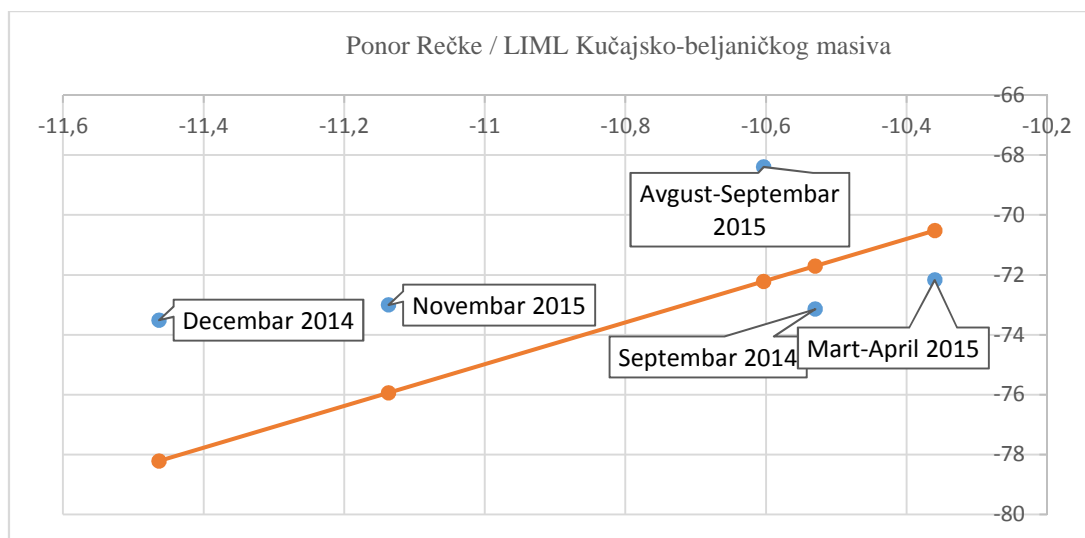
Tabela 45. Rezultati monitoringa podzemnih voda Malog vrela

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	222	9	8.3	440	2.1	1.6
Proleće	620	9.6	8.2	445	12.64	0.72
Leto	56	9.7	7.3	451	8.41	0.45
Jesen	120	9.2	8.39	436	6.35	2.75

Sadržaji stabilnih izotopa u vodi ponornice leže uz lokalnu meteorsku liniju (slika 7.19.), čime odražavaju izotopski sastav padavina, izuzev uzoraka decembra 2014. i novembra 2015. godine, koji, kao i u slučaju ponora Busovate, ukazuju na sastav voda formiran od padavina koje su podlegle reevaporaciji atmosferskog taloga u letnjim mesecima, na čiji bi delimični efekat mogle da ukažu i vode iz avgusta i septembra 2015. godine. Vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ se kreću od -12.37 do -14.78 ‰ (tabela 46), i odgovaraju sadržaju stabilnog ugljenika u gasu zemljišnog sloja tipa C4 (poglavlje 5.3).

Tabela 46. Sadržaj stabilnih izotopa vode na ponoru Rečke

Ivkov ponor	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Septembar 2014		-73.14	-10.53
Zima	-12.37	-73.51	-11.46
Proleće	-14.75	-72.17	-10.36
Leto	-12.84	-68.39	-10.60
Jesen	-13.31	-73.00	-11.14



Slika 7.19. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi ponora Rečke

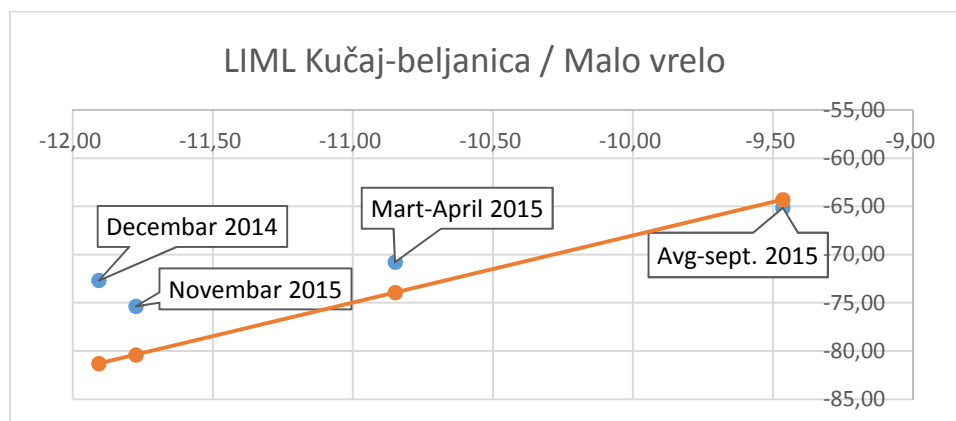
Sadržaj stabilnog ugljenika $\delta^{13}\text{C}$ kreće se u izvorskoj vodi od -7.77 do -9.94 ‰, što ukazuje na uticaj matične stene (krečnjaka) na izotopski sastav vode (tabela 47). Stabilni izotopi $\delta^{18}\text{O}$ i δD Malog vrela takođe ukazuju na jaku korelaciju sa vodama atmosferskog porekla, obzirom da vrednosti stabilnih izotopa vrela leže uz lokalnu meteorsku liniju, reflektujući brzu cirkulaciju podzemnih voda kroz karstni sistem (slika 7.20.). Vrednosti iz decembra 2014. i novembra 2015. godine imaju istu zavisnost kao i izotopi ponora

Rečke u ovom periodu, pa se može zaključiti da postoji jaka veza između ponora i izvora, kao i brza cirkulacija voda u ovom periodu.

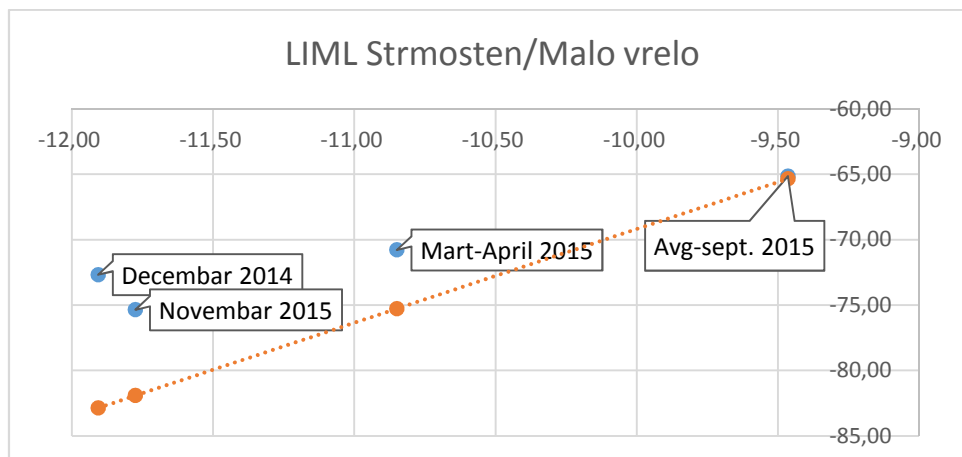
Karakteristično obeležje ima uzorak iz letnjeg perioda, koji pada ispod, ali prati LIML, čime potvrđuje da se u letnjem periodu voda nešto duže zadržava u podzemlju. Kada se vrednosti stabilnih izotopa Malog vrela plotuju na dijagram sa LIML Strmostena, dobija se poklapanje vrednosti sadržaja stabilnih izotopa Malog vrela iz letnjeg perioda sa tačkom padavina (slika 7.21.), što ukazuje na činjenicu da se u letnjem periodu prihranjivanje Malog vrela vrši na nižim nadmorskim visinama u okviru južnih padina Beljaničkog masiva.

Tabela 47. Sadržaj stabilnih izotopa u vodi Malog vrela

Malo vrelo	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Zima	-9.3	-72.67	-11.91
Proleće	-7.77	-70.78	-10.85
Leto	-9.94	-65.13	-9.47
Jesen	-8.50	-75.35	-11.78



Slika 7.20. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi izvora Malo vrelo (LIML KB)



Slika 7.21. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi izvora Malo vrelo (LIML Strmosten)

Kao i kod Velikog vrela, i na Malom vrelu je izvršeno uzorkovanje vode za određivanje sadržaja radioaktivnih izotopa ^3H i $^3\text{H}/^3\text{He}$, odnosno za definisanja vremena boravka vode u podzemlju u periodu recesije. Rezultati analize prikazani su u tabeli 48, i ukazuju da vrednosti tricijuma iznose 6.09 TJ. Ovo daljim proračunom sa helijumom daje starost voda manju od 1 godine, što ukazuje da se, kao i u slučaju Velikog vrela, radi o veoma mladoj vodi. Uvođenjem korektivnog faktora za proračun, dobija se da maksimalna starost vode može da iznosi 18 meseci.

Tabela 48. Sadržaj radioaktivnih izotopa ^3H i $^3\text{H}/^3\text{He}$ u vodi Malog vrela

Sadržaj radioaktivnih izotopa	^3H (TJ)	(+/-) 1 sigma	$^3\text{H}/^3\text{He}$ starost (godine)	Neposredna starost (godine)
Malo vrelo	6.09	0.18	0.0	1.5

Analizom plemenitih gasova u vodi (tabela 49), proračunata je temperatura vode u zoni prihranjivanja, koja iznosi 10.95 °C. Kako temperatura vode u zoni prihranjivanja maksimalno iznosi 8 °C i to u prolećnom periodu, za utvrđivanje vremena prihranjivanja uzeta je srednja temperatura vazduha koja je vladala za vreme prihranjivanja. Srednja temperatura vazduha za april mesec (KS Crni Vrh) iznosi 6.36 °C, a za maj mesec 12.67 °C, te se može zaključiti da se voda u podzemlje infiltrirala krajem aprila, odnosno početkom maja, te da starost vode, obzirom da je analizom ^3H i $^3\text{H}/^3\text{He}$ potvrđeno da je mlađa od 12 meseci, na Malom vrelu iznosi oko 4 meseca.

Tabela 49. Sadržaj plemenitih gasova u vodi Malog vrela

Plemeniti gasovi	He (ccSTP/g)	Ne (ccSTP/g)	Ar (ccSTP/g)	Kr (ccSTP/g)	Xe (ccSTP/g)	R/Ra	T (°C)	chi2-test
Malo Vrelo	4.4244E-08	2.0724E-07	3.7831E-04	8.7648E-08	1.2530E-08	1.0032	10.95	0.16

Kao i kod ponora Busovate, na ponoru Rečke se sa najvećim koncentracijama javljaju anjoni HCO_3^- (40.83 do 65.37 mg/l) i SO_4^{2-} (9.55 do 10.308 mg/l). Vrednosti hidrokarbonata znatno su veće na ponoru Rečke, dok su sulfati u nižim koncentracijama u odnosu na ponor Busovate. Ovo ukazuje da se Rečka većim delom formira na terenu izgrađenom od krečnjačkih stena. Vrednosti katjona Ca^{2+} kreću sa od 12.43 do 15.52 mg/l (tabela 50). Takođe, u vodama se javljaju i niske koncentracije jona Mg^{2+} i Na^+ (max 2.4 mg/l za Na^+ i 2.835 mg/l za Mg^{2+}).

Tabela 50. Jonski sastav voda na ponoru Rečke

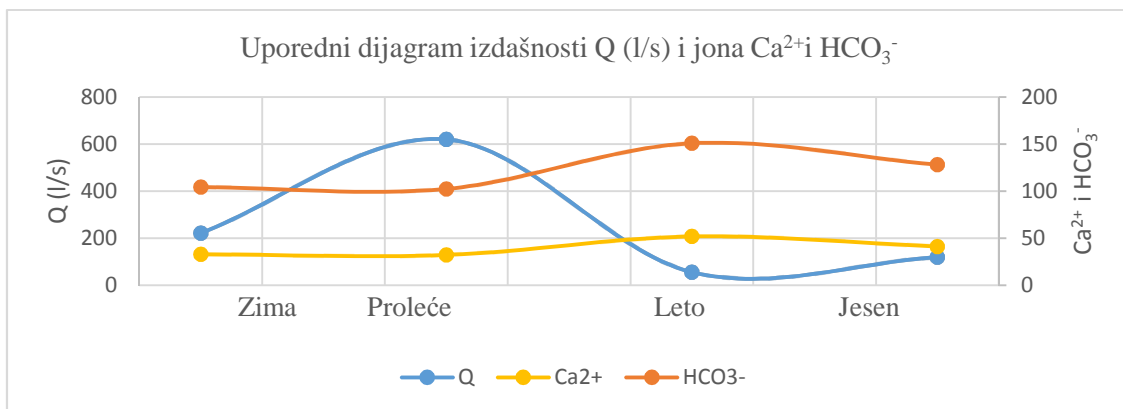
Ponor Rečke	mg/L								
	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Na^+	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Zima	14.02	0.7815	1.933	2.09	0.0332	0.8322	1.4551	9.6057	49.73533
Proleće	12.13	0.654	1.448	1.619	0.03	0.8605	2.3882	10.0472	40.83442
Leto	15.52	1.496	2.835	2.406	0.0535	0.65	0.3445	9.5595	65.37167
Jesen	12.43	1.925	2.111	2.113	0.0343	0.933	1.2279	10.308	42.7

Jonski sastav voda Malog vrela ukazuje da se radi o vodama $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ grupe, sa količinama Ca^{2+} koje imaju maksimalne vrednosti do 51.99 mg/l, odnosno nakon letnjeg perioda, kada se voda usled dužeg boravka u ovoj zoni obogaćuje sadržajem Ca^{2+} , kao i sadržajem HCO_3^- do 150.87 mg/l (tabela 51). Sadržaj ostalih jona je relativno nizak, te se samo javljaju koncentracije sulfata od maksimalno 8.11 mg/l, kao i nešto više koncentracije nitrata (maksimalno 6.13 mg/l). Kao i kod ponora Busovate, niže koncentracije nitrata se zapažaju kod ponora Rečke (maksimalno 1.45 mg/l), što takođe može da ukaže na moguće lokalno manje zagađenje vode neposredno u zoni isticanja.

Tabela 51. Jonski sastav vode Malog vrela

Malo vrelo	mg/L								
	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Zima	33.09	0.6091	1.417	0.6839	0.0082	0.775	4.7537	7.0699	104.4625
Proleće	32.24	0.5566	1.371	0.6776	0.02	0.6166	6.1345	8.1136	102.4292
Leto	51.99	0.6366	1.654	0.8345	0.0228	0.7641	6.1239	6.1916	150.8733
Jesen	41.25	0.6143	1.959	1.072	0.0297	0.7681	6.062	6.6999	128.1

Na osnovu uporednog dijagrama, uočava se identična zavisnost proticaja i sadržaja kalcijuma i hidrokarbonata, kao i kod ponora Rečke, odnosno da se sa povećanjem količina voda koje ponoru u ponor Rečke, smanjuju količine kalcijuma i hidrokarbonata, i obrnuto (slika 7.22.).

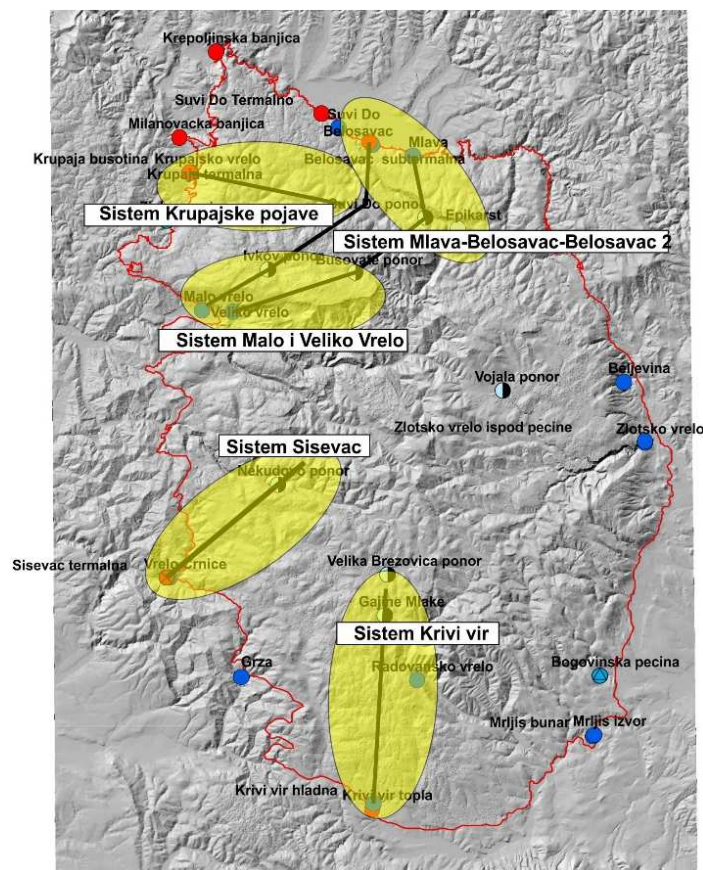
Slika 7.22. Uporedni dijagram izdašnosti i jona Ca²⁺ i HCO₃⁻ na Malom vrelu

Može se zaključiti da vode Velikog i Malog vrela imaju slične fizičko-hemijske i hidrohemijske karakteristike, uključujući i starost. Kako vrednost tricijuma na Velikom vrelu iznosi 6.56 TJ, a na Malom vrelu 6.09, zaključuje se da se vode Malog vrela neznatno duže zadržavaju u podzemlju, pa ako usvojimo da je vreme zadržavanja Malog vrela u podzemlju oko 4 meseca, onda se kod Velikog vrela raspon zadržavanja vode u podzemlju između 7 i 3 meseca sužava, i pretpostavlja se da je vreme zadržavanja voda Velikog vrela u podzemlju oko 3 meseca.

Na kraju se može izvesti zaključak da se u periodu srednjih i velikih voda, na osnovu prethodnih istraživanja navedenih u poglavlju 6, voda Malog vrela kroz podzemlje, od ulaza do izlaza iz sistema, kreće 4.5 dana (višlji kanali t₁), (dobijeno na osnovu prethodnih opita obeležavanja), dok u periodu recesije ovaj put voda pređe za 4 meseca, odnosno 122

dana. Veliko vrelo u periodu velikih voda, put od ulaza do izlaza iz sistema pređe za 5.5 dana (višlji kanali t_1), dok se u periodu recesije, kroz podzemlje kreće 92 dana (kanali t_2). Starosti od 4–5 dana za brzu cirkulaciju za oba vrela (kanali t_1), se svakako odnose na vode koje poniru direktno u ponorima i kreću se privilegovanim pravcima, odnosno kroz dominantne kanale prema karstnim vrelima (slika 7.23.). Sve ostale vode koje prihranjuju ovu izdan, a formiraju se na površinama sa znatno sporijim filtracionim sposobnostima (kanali t_2), čine one vode koje utiču na retardacione sposobnosti karstne izdani, i samim tim je i njihova starost, odnosno vreme potrebno da voda dođe do zone dreniranja znatno duža i iznosi više meseci.

Sistem Veliko i Malo vrelo svakako spada u grupu najznačajnijih sistema Kučajsko-beljaničkog masiva, sa tipičnom gravitacionom cirkulacijom. Iz tog razloga za ovaj sistem je, kao i za još četiri najkarakterističnija sistema celokupnog masiva, dat i shematski prikaz funkcionisanja u vertikalnom profilu. Pored sistema Malog i Velikog vrela, shematski su još prikazani i sistem Mlava-Belosavac-Belosavac 2, koji je prikazan zajedno sa ovde obrađivanim sistemom Malog i Velikog vrela, a u cilju jasnije prostorne vizuelizacije. Dalje su prikazani i sistemi Krupajskih pojava, sistem Sisevac i sistem Krivi Vir (slika 7.24.).



Slika 7.24. Položaj trase profila po kojima su shematski prikazane glavne hidrogeološke odlike pet karakterističnih sistema Kučajsko-beljaničkog masiva

7.2.2. Rezultati istraživanja na sistemima sa gravitacionom cirkulacijom na Kučaju

Sistem Istočni obod (Zlotska vrela i vrela Beljevine)

Zlotsko vrelo i Zlotsko vrelo ispod pećine

Istočni obod Kučajsko-beljaničkog masiva odlikuje se izvorima i vrelima sa gravitacionim tipom cirkulacije, bez postojanja voda subtermalnog ili termalnog karaktera. Zlotsko vrelo jedno je od osmatranih vrela na istočnoj strani. Kao što je navedeno u poglavlju 6.1., za potrebe disertacije nije osmatrano glavno Zlotsko vrelo, već vrelo kod starog motela. S obzirom da su na lokaciji Zlota osmatrane dve pojave (vrelo kod motela i manji izvor ispod pećine), od čega je vrelo kod motela veća pojava, za ovo vrelo korišćen je naziv „Zlotsko vrelo“.

Vode Zlotskog vrela imaju registrovane proticaje u vreme obilaska pojave od 122 – 220 l/s i pH vrednost od 7.2 – 7.9 (tabela 52). Sa povećanjem izdašnosti opada elektroprovodljivost, dok se sadržaj kiseonika povećava (slika 7.25.). To je posledica turbulentnog režima u periodu velikih voda. Mutnoća vode je uglavnom visoka i kreće se od minimalnih 4.1 do 6.39 NTU. Temperatura vode varira sezonski.

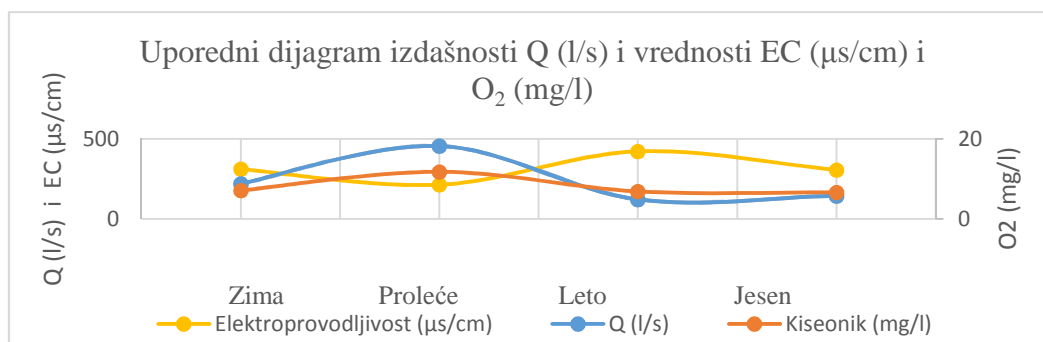
Zlotsko vrelo ispod pećine ima relativno slične fizičko-hemijske karakteristike kao i Zlotsko vrelo, s tim što po nekim svojim vrednostima može da ukaže na znatno bržu cirkulaciju kroz podzemlje, pa tako vrednost elektroprovodljivosti iznosi maksimalno 261 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (tabela 53), dok je maksimalna vrednost kod Zlotskog vrela 422 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Vrednost kiseonika je takođe niža u odnosu na Zlotsko vrelo.

Tabela 52. Rezultati monitoringa podzemnih voda Zlotskog vrela

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	220	8.2	7.2	312	7.1	4.1
Proleće	456	9.8	7.8	214	11.8	6.39
Leto	122	9.8	7.9	422	6.88	5.1
Jesen	145	7.7	7.8	307	6.63	5.14

Tabela 53. Rezultati monitoringa podzemnih voda Zlotskog vrela ispod pećine

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	9	6.1	8	261	6.9	3.4
Proleće	Izvor je presušio					
Leto	Izvor je presušio					
Jesen	10	7.5	7.8	250	6.53	4.93



Slika 7.25. Uporedni dijagram izdašnosti i vrednosti elektroprovodljivosti i kiseonika na Zlotskom vrelu

Sadržaj stabilnih izotopa leži vrlo blizu LIML (slika 7.26.), što govori, kao i kod većine gravitacionih vrela, o brzjoj cirkulaciji i reflektovanju sadržaja izotopa u padavinama na sadržaj izotopa u vodama na izvorima i vrelima. Vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ se kreću od -9.51 (prolećni mesec) do -10.47 ‰ u zimskom periodu. Prolećne vrednosti, obzirom da se radi o brzjoj cirkulaciji, ukazuju na padavine formirane od teških izotopa, dok je u drugom delu godine uočljiva slaba izotopska frakcionacija unutar karstnog sistema. Vrednosti δD se kreću od -67.03 do -69.34 ‰ (tabela 54). Zlotsko vrelo ispod pećine ima vrednosti stabilnih izotopa koje se malo razlikuju od vrednosti na Zlotskom vrelu, odnosno ima “lakše” vrednosti, što ukazuje na bržu cirkulaciju vode kroz podzemlje, pri čemu voda nije postigla da izmeni svoj izotopski sastav u kontaktu sa stenom (tabela 55).

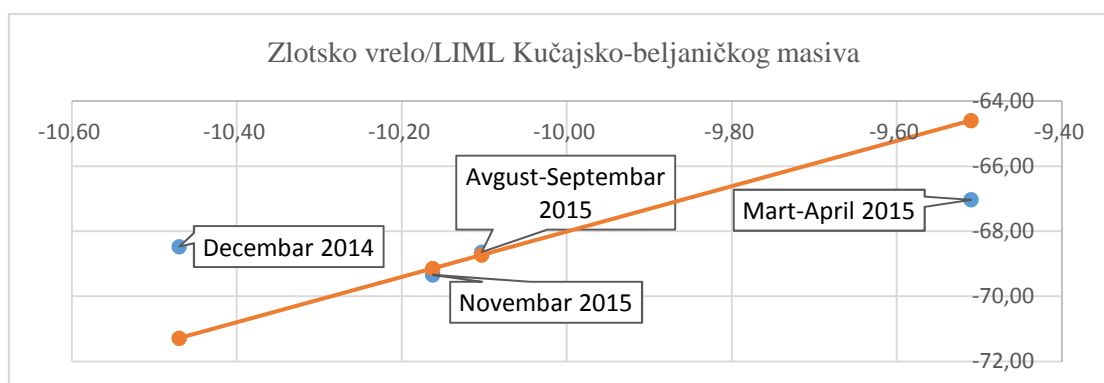
Vrednost $\delta^{13}\text{C}$ u prolećnom periodu (-12.18 ‰) ukazuje na sastav $\delta^{13}\text{C}$ u gasu zemljišnog sloja, dok u letnjem periodu vrednost od -10.12 ‰ govori o površinskoj interakciji vode sa stenom.

Tabela 54. Sadržaj stabilnih izotopa u vodi Zlotskog vrela

Zlotsko vrelo	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Zima	-11.01	-68.47	-10.47
Proleće	-12.18	-67.03	-9.51
Leto	-10.12	-68.64	-10.10
Jesen	-11.94	-69.34	-10.16

Tabela 55. Sadržaj stabilnih izotopa u vodi Zlotskog vrela ispod pećine

Zlotsko vrelo ispod pećine	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Zima	-11.98	-70.09	-10.84
Jesen	-12.15	-69.05	-10.15



Slika 7.26. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi Zlotskog vrela

Na osnovu jonskog sastava se izvodi zaključak da se radi o vodama $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ grupe, sa količinama Ca^{2+} koje imaju maksimalne vrednosti do 55.3 mg/l (tabela 56), koje su zabeležene, kao i kod ostalih vrela sa gravitacionom cirkulacijom, u letnjem periodu. Koncentracije jona Ca^{2+} na Zlotskom vrelu ispod pećine su niže, pa maksimalna vrednosti iznosi 41.87 mg/l (tabela 57).

Sadržaj HCO_3^- na Zlotskom vrelu kreće se od 146.04 mg/l do 170.8 mg/l, dok najveća koncentracija na izvoru kod pećine iznosi 134.2 mg/l. Sulfati pokazuju obrnutu proporcionalnost sa količinama voda koje ističu iz pećine, a najviše vrednosti su zabeležene u jesen, kada iznose 15.751 mg/l, odnosno 15.9 mg/l na Zlotskom vrelu kod pećine.

Tabela 56. Jonski sastav vode Zlotskog vrela

Zlotsko vrelo	mg/L								
	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Na^+	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Zima	44.45	0.7155	3.435	1.29	0.0508	0.9034	0.8481	13.8098	146.0442
Proleće	48.47	0.7678	4.117	1.231	0.05	0.7579	1.238	13.4876	150.1108
Leto	47.7	0.6681	3.687	0.969	0.0346	0.7207	3.3979	15.751	146.4
Jesen	55.3	0.8167	3.615	1.332	0.0303	0.9839	2.9284	15.5721	170.8

Tabela 57. Jonski sastav vode Zlotskog vrela ispod pećine

Zlotsko vrelo ispod pećine	mg/L								
	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Na^+	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Zima	38.42	0.7883	3.707	1.301	0.068	0.969	1.998	13.896	128.0492
Jesen	41.87	1.214	3.874	1.758	0.012	0.784	4.417	15.907	134.2

Fizičko-hemijski parametri, izotopski i jonski sastav podzemnih voda, ukazuju na razliku između Zlotskog vrela i Zlotskog vrela ispod pećine. Na osnovu izloženih podataka zaključujemo da se verovatno radi o istoj vodi koja prihranjuje sistem, ali da je različito vreme boravka u podzemlju. Pri tome, vrelo ispod pećine ima kraće zadržavanje infiltrirane vode.

Ponor Vojal i vrela Beljevine

Ponor Vojal i vrela Beljevine (Gaura Mika i Gaura Mare) su u dokazanoj hidrauličkoj vezi opitom trasiranja (Lazarević, 1976) i kao takvi, zajedno su analizirani u ovom

poglavljju. Zbog zahvatanja voda, odnosno postojanja kaptaže na vrelu Beljevine, nije bilo moguće meriti proticaj voda, pa se fizičko-hemijske karakteristike, jonski i izotopski sastav nisu poredili na osnovu količina voda koje ističu na vrelima, već je samo dat osvrt na karakteristike ovih voda, kao i na njihovu vezu sa ponorom Vojal.

Količine voda koje su zabeležene na ovom ponoru u vreme obilaska kretale su se od 32 do 372 l/s. Temperatura vode je niska, a u zimskom periodu, zbog snega i nadmorske visine, iznosila je svega 1.3 °C, dok je u prolećnom periodu rasla do 7.4 °C (tabela 58). Vrednost pH iznosila je preko 8, što je i logično, obzirom na prihranjivanje vode sa terena izgrađenog od kristalastih škriljaca. Koncentracija rastvorenog kiseonika varira u zavisnosti od količina voda koje poniru, dok elektroprovodljivost sa povećanjem kapaciteta opada, a maksimalne količine iznose 138 µs/cm. Mutnoća vode takođe zavisi od količina vode u potoku koja diže suspendovani nanos, pa tako u prolećnom periodu iznosi 12.05 NTU.

Tabela 58. Rezultati monitoringa voda ponora Vojal

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost (µs/cm)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	138	1.3	8.3	112	6.9	2.6
Proleće	372	7.4	8.18	95.1	11.93	12.05
Leto	32	6.3	7.9	138	7	3.2
Jesen	96	3.3	8.1	125	6.41	2.83

Vode na izvoru Beljevine imaju pH vrednost od 7.3 do 8 i elektroprovodljivost od 218 do maksimalnih 500 µs/cm (tabela 59), zabeleženih u letnjem periodu, što ukazuje na duži boravak vode i bogaćenje sa Ca²⁺ i HCO₃⁻ u sistemu. Količina rastvorenog kiseonika, kao i na ponoru, raste sa povećanjem količina voda, što je i zabeleženo u prolećnom periodu, a mutnoća vode iznosi od 1.8 do 5.54 NTU, što za vode za piće predstavlja povišenu vrednost.

Tabela 59. Rezultati monitoringa podzemnih voda Beljevine

Datum	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost (µs/cm)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	7	8	356	9.2	1.8
Proleće	9	7.7	361	10.5	5.54

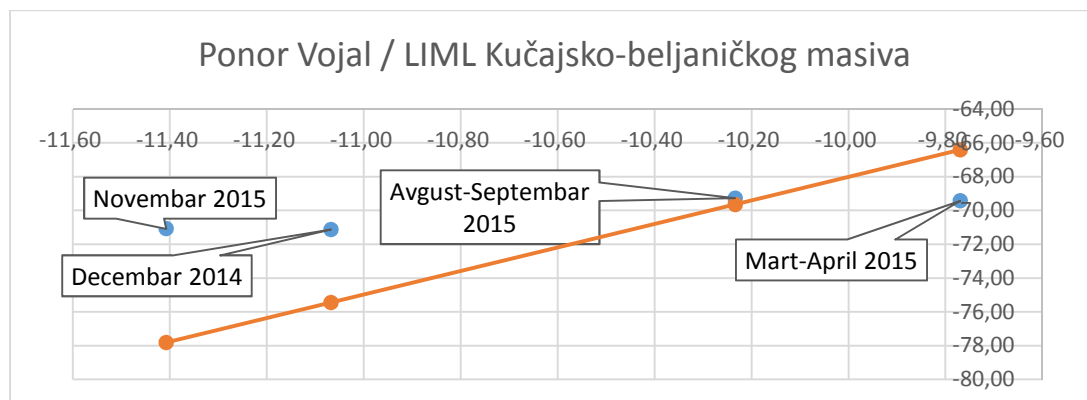
Leto	9.2	7.3	500	7.07	3.8
Jesen	8.8	7.65	218	6.44	2.24

Vrednosti stabilnog izotopa $\delta^{13}\text{C}$ na ponoru kreću se od -10.39 do -13.90 ‰ (tabela 60), reflektujući slabo frakcionisani sadržaj izotopa u gasu zemljišnog sloja, dok se na izvoru ove vrednosti kreću od -8.39 do -12.15 ‰ (tabela 61) ukazujući na doprinos izotopskog sastava matične stene, odnosno izražen kontakt voda-stena.

Tabela 60. Sadržaj stabilnih izotopa voda ponora Vojal

Ponor Vojala	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Zima	-11.61	-71.13	-11.07
Proleće	-13.90	-69.43	-9.77
Leto	-13.01	-69.27	-10.23
Jesen	-10.37	-71.08	-11.41

Vrednosti kiseonika i deuterijuma u odnosu na LIML na ponoru Vojal, pokazuju sličnost sa vrednostima stabilnih izotopa ostalih ponora (slika 7.27.). Vrednosti iz decembra 2014. i novembra 2015. godine pripadaju vodama koje su podlegle ponovnom isparavanju, dok vrednosti dobijene na uzorku iz marta 2015. godine pokazuju izotopski teži sastav vode, koja može biti posledica jakih pljuskova ili primarne frakcionacije u toku reke Vojal. Vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ se kreću od -9.77 do -11.41 ‰, dok se δD vrednosti kreću od -69.27 do -71.13 ‰ (tabela 60).



Slika 7.27. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi ponora Vojal

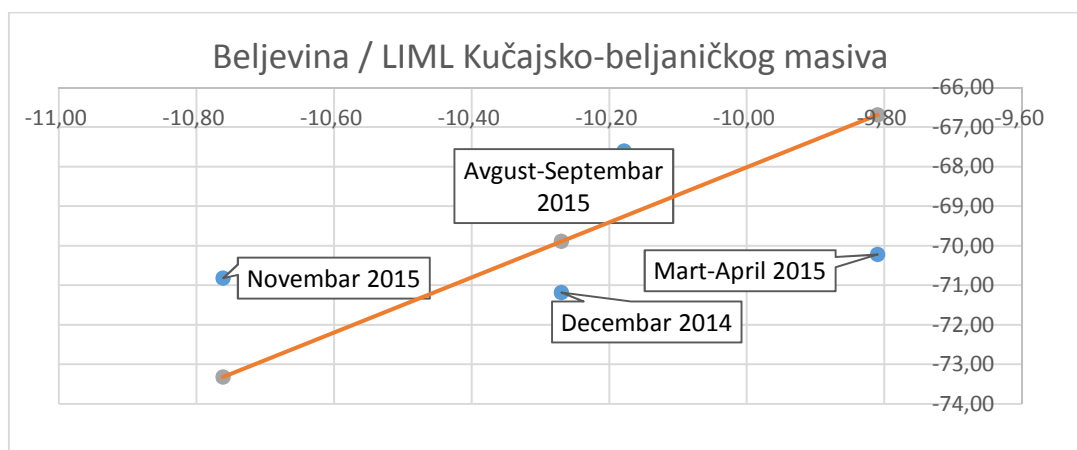
Vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ na izvoru Beljevine ukazuju na delimičnu izmenjenost sadržaja izotopa od ulaza do izlaza iz sistema, i kreću se od -9.81 do -10.76 ‰, dok se δD vrednosti kreću od -67.61 do -71.18 ‰ (tabela 61). Plotovanjem ovih vrednosti na dijagram LIML,

uočava se jaka veza sa vodama atmosferskog porekla, kao i sa vodama ponora Vojal (novembar 2015. i avgust-septembar 2015.). Podaci za decembar 2014., kao i mart i april 2015. padaju ispod LIML (slika 7.28.), što govori o intenzivnijem uticaju stenske mase na sadržaj stabilnih izotopa u vodi.

Generalno, obzirom da su u decembru mesecu niže količine voda koje se dreniraju iz podzemlja, položaj i vrednosti stabilnih izotopa bi mogli da ukažu na duži boravak u podzemlju, dok vrednosti iz prolećnog perioda reflektuju sadržaj izotopa u vodi ponora Vojal, kao i voda koje su izložene primarnoj frakcionaciji ili su formirane od jakih, intenzivnih prolećnih pljuskova. Sve ovo ukazuje na veoma brzu cirkulaciju vode, odnosno na brz odziv padavina na vrela Beljevine.

Tabela 61. Sadržaj stabilnih izotopa voda Beljevine

Beljevina	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Zima	-12.15	-71.18	-10.27
Proleće	-11.67	-70.22	-9.81
Leto	-8.39	-67.61	-10.18
Jesen	-10.12	-70.82	-10.76



Slika 7.28. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi vrela Beljevine

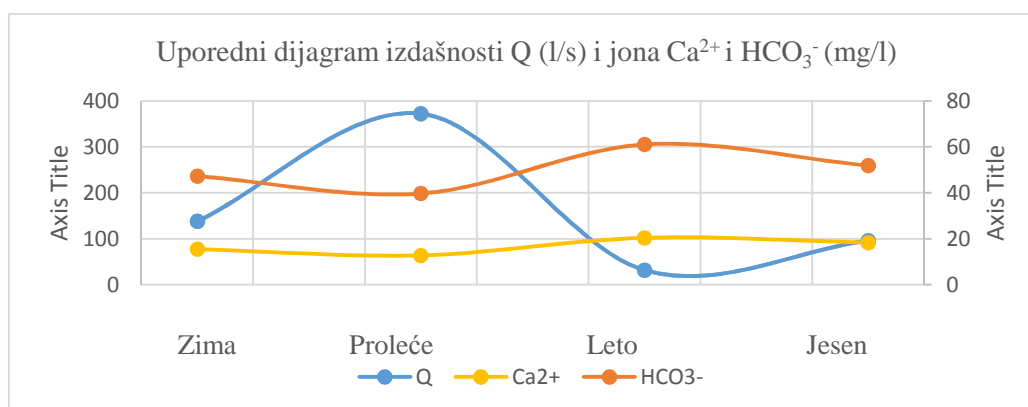
Jonski sastav voda ponora Beljevine ukazuje da se radi o vodama $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ grupe, sa količinama Ca^{2+} koje imaju maksimalne vrednosti do 20.46 mg/l i sadržajem HCO_3^- do 51.85 mg/l (tabela 62). Sadržaj sulfata je povišen i ima maksimalne koncentracije od 16.35 mg/l, a zapažaju se i niske koncentracije jona Mg^{2+} i Na^+ (max 2.185 mg/l za Na^+ i

2.514 mg/l za Mg^{2+}). Generalno, ovakav jonski sastav sličan je vodama koje poniru na ponorima Busovate i Rečke, što ukazuje da na karakteristike ovih voda veliki uticaj imaju kristalasti škriljici, stene preko kojih tokovi teku.

Sa povećanjem količina voda koje utiču u ponor Vojal, smanjuju se koncentracije jona Ca^{2+} i HCO_3^- . Najveće koncentracije ovih jona uočavaju se u letnjem, a najniže u prolećnom periodu (slika 7.29.).

Tabela 62. Jonski sastav voda ponora Vojal

Ponor Vojala	mg/L								
	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Na^+	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Zima	15.5	0.7997	2.076	1.604	0.0352	0.9013	2.9472	13.0853	47.23433
Proleće	12.8	0.7054	1.781	1.736	0.04	0.683	3.0245	12.2914	39.711
Leto	20.46	1.03	2.514	1.902	0.0363	0.9043	3.2387	16.3506	61
Jesen	18.36	0.9134	2.509	2.185	0.0402	0.8086	1.2843	13.1162	51.85



Slika 7.29. Uporedni dijagram izdašnosti Q (l/s) i jona Ca^{2+} i HCO_3^- (mg/l)

Izvorske vode takođe pripadaju $HCO_3^- - Ca^{2+}$ vodama, sa maksimalnim količinama Ca^{2+} do 48.56 mg/l i sadržajem HCO_3^- do 136.945 mg/l (tabela 63). Kako srednje vrednosti kalcijuma na ulazu u sistem iznose 16.78 mg/l, a na izlazu, odnosno vrelima 43.66 mg/l, može se zaključiti da se prolaskom kroz sistem voda u konkretnom slučaju obogati kalcijumom za 26.88 mg/l (38.43 %), dok se HCO_3^- poveća za 78.21 mg/l (38.97 %). Vrednosti sulfata su povišene i iznose 14.60 – 21.40 mg/l.

Tabela 63. Jonski sastav voda Beljevine

Beljevina	mg/L								
	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Zima	40.74	0.7481	2.35	1.529	0.0243	0.9516	2.7167	21.4085	119.4583
Proleće	41.17	0.6221	2.006	1.127	0.03	0.7625	3.2591	14.6012	125.1008
Leto	44.17	0.5936	1.869	0.7349	0.0232	0.6835	4.3923	16.6281	136.945
Jesen	48.56	0.6472	1.986	1.041	0.05	0.9018	4.5215	15.1744	131.15

Na kraju se može izvesti zaključak da vode sistema Istočnog oboda, čija je analiza obuhvatila vode ponorske zone ponora Vojal, Zlotska vrela (Zlotsko vrelo i Zlotsko vrelo ispod pećine), i vrela Beljevine (Gaura Mika i Gaura Mare), imaju slične fizičko-hemijske, izotopske i jonske karakteristike, koje ukazuju na brzu cirkulaciju, odnosno vodozameni.

Sistem Bogovinska pećina

Tok koji uobičajeno izbija iz pećine nakon otapanja snegova u slivu, je u prolećnom periodu 2015. godine bio potpuno suv, a voda se procedivala nizvodno od ulaza u pećinu, sa količinom od svega 0.2 l/s, što ukazuje na kasno topljenje snega, ili na slab odziv pećinskih kanala na sezonske uslove. Temperatura vode je gotovo ujednačena i tokom godine se kreće od 9.1 – 10 °C, kao i pH vrednost, koja blago varira od 7.5-7.7 (tabela 64). Najveća elektroprovodljivost je zabeležena upravo u prolećnom periodu, kada je bio najmanji proticaj, a vrednosti su se kretale od 333-515 µs/cm.

Tabela 64. Rezultati monitoringa podzemnih voda u Bogovinskoj pećini

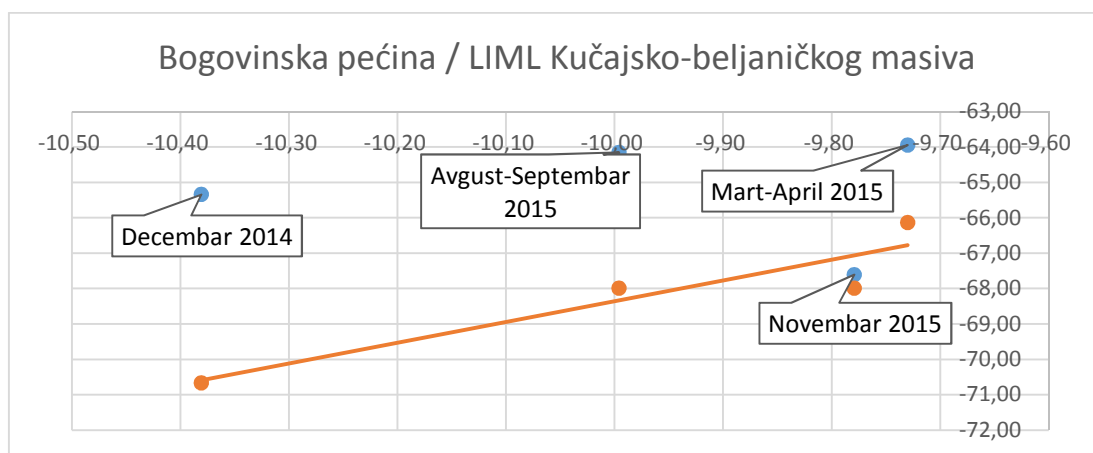
Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost (µs/cm)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	250	9.8	7.7	412	6.8	1.6
Proleće	0.2 izvor van pećine	9.4	7.5	515	7.5	8.47
Leto	320	10	7.59	425	6.86	4.1
Jesen	300	9.1	7.5	333	6.31	2.34

Vrednosti stabilnog izotopa $\delta^{18}\text{O}$ kreću se od -9.73 do -10.38 ‰, a za δD -63.94 do -67.61 ‰ (tabela 65), a upravo su najniže vrednosti, odnosno sadržaj najtežih izotopa,

zabeležene u minimumu, koji je bio u prolećnom periodu, što ukazuje na prihranjivanje vode od atmosferskih padavina jakog intenziteta, i na postepeno popunjavanje velikih karstnih kanala u Bogovinskoj pećini, iz kog razloga još uvek nije došlo do isticanja na ulazu u pećinu. Položaj uzorka iz decembra 2014. godine govori o izotopskoj razmeni sa CO₂ (vidi sliku 5.11, u poglavlju 5.3.1.), dok uzorak iz novembra 2015. godine ukazuje na nešto duži kontakt vode sa matičnom stenom (slika 7.30.).

Tabela 65. Sadržaj stabilnih izotopa voda u Bogovinskoj pećini

Bogovinska pećina	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Zima	-10.97	-65.34	-10.38
Proleće	-12.72	-63.94	-9.73
Leto	-10.73	-64.15	-10.00
Jesen	-12.61	-67.61	-9.78



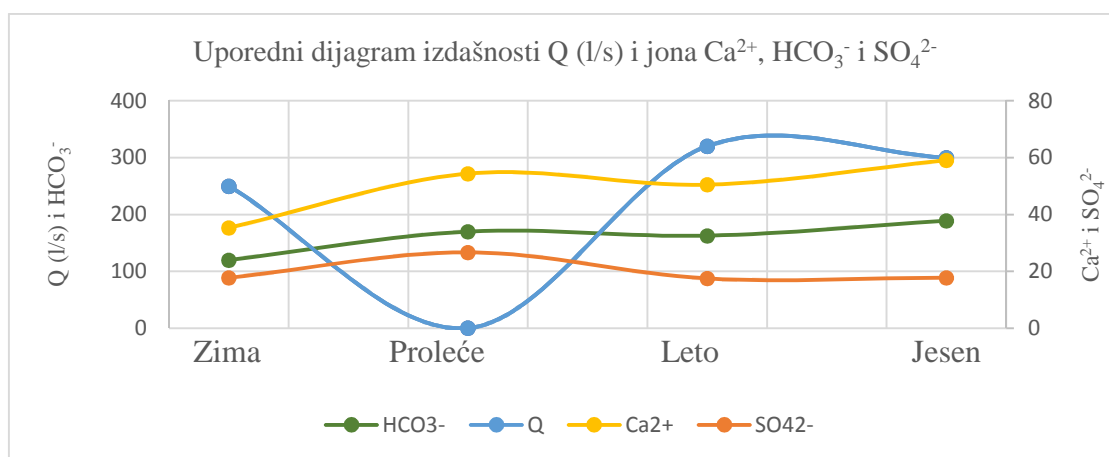
Slika 7.30. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi Bogovinske pećine

Jonski sastav voda Bogovinske pećine ukazuje na HCO₃⁻ – Ca²⁺ vode, sa količinama Ca²⁺ koje imaju maksimalne vrednosti do 59.12 mg/l, nakon letnjeg perioda, kada se voda usled dužeg boravka u ovoj zoni obogaćuje sadržajem Ca²⁺, i sadržajem HCO₃⁻ do 189.1 mg/l, takođe u letnjem periodu (tabela 66). Sadržaj ostalih jona je relativno nizak, izuzev koncentracija sulfata, koje imaju maksimalnu vrednost od 26.68 mg/l, kao i nešto povišene koncentracije magnezijuma (maksimalno 4.896 mg/l), što može da ukaže na prihranjivanje vode sa dolomitičnih krečnjaka jurske starosti. Dijagram zavisnosti

proticaja od sadržaja Ca^{2+} i HCO_3^- i SO_4^{2-} , pokazuje da se sa povećanjem izdašnosti smanjuju vrednosti ovih jona, i obrnuto (slika 7.31.).

Tabela 66. Jonski sastav voda u Bogovinskoj pećini

Bogovinska pećina	mg/L								
	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Na^+	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Zima	35.3	0.7769	4.896	1.69	0.0334	1.1773	1.9558	17.7018	119.7125
Proleće	54.38	1.449	3.854	2.94	0.05	2.1683	0	26.6826	169.9867
Leto	50.48	0.8628	4.516	2.165	0.0422	1.0874	2.0856	17.4853	162.6667
Jesen	59.12	0.8526	4.051	2.54	0.0616	1.1263	0.4739	17.8012	189.1



Slika 7.31. Uporedni dijagram izdašnosti Q (l/s) i jona Ca^{2+} i HCO_3^- i SO_4^{2-} (mg/l)

Sistem Bogovinske pećine predstavlja složen sistem karstnih kaverni i kanala, koji pokazuje svoje “baferske” osobine u prolećnom periodu, kada i usled jakih padavina dolazi do postepenog popunjavanja pećinskog sistema, pri čemu određene količine voda cirkulišu prema vrelu Fundonj sa jedne strane i vrelu Mrljiš sa druge strane. Vode Bogovinske pećine u pogledu fizičko-hemijskih i izotopskih svojstava vode, u potpunosti odražavaju karakteristike karstne izdani odnosno gravitacione cirkulacije podzemnih voda.

Sistem Radovansko vrelo

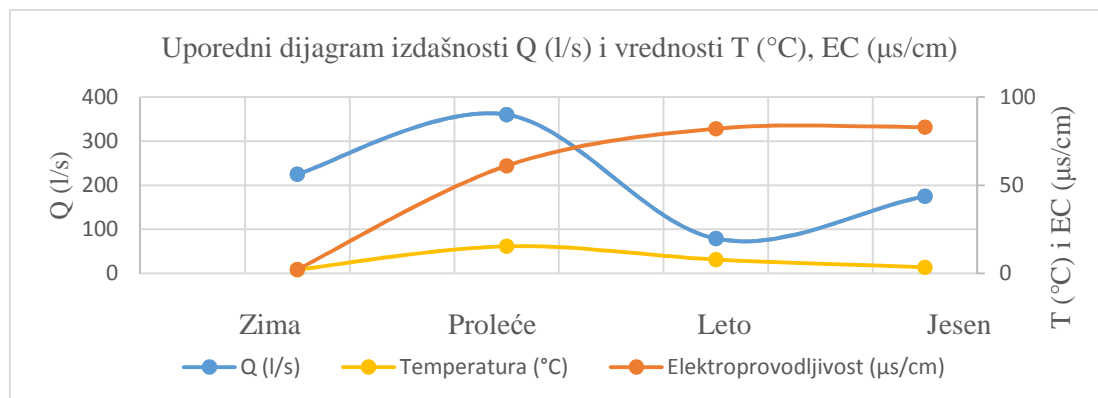
Ponor Velike Brezovice predstavlja prostran sliv i prima padavine koje se izluče u široj zoni uvale Velike Brezovice, kao i vode svih malih izvora koji dreniraju pukotinsku izdan formiranu u okviru stena devonske starosti.

U periodu osmatranja, u ponor je uticalo maksimalno 360 l/s, (u prolećnom periodu), odnosno kada su tok ponornice, pored voda prolećnih jakih padavina, činile i vode nastale topljenjem snega. Vode ponornice Velike Brezovice su generalno hladne (minimalno 2.2°C), izuzev prolećnog perioda, kada temperatura iznosi čak 15.4 °C (tabela 67). Vrednost pH ukazuje na vode formirane na terenima koji nisu izgrađeni od karbonatnih tvorevina, a kreću se od 8 do 8.83 u letnjem periodu.

Tabela 67. Rezultati monitoringa voda ponora Velika Brezovica

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost (µs/cm)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	225	2.2	8	2.25	3.1	5.2
Proleće	360	15.4	8.3	61	2.75	21.4
Leto	79	7.9	8.83	82	8.06	8.3
Jesen	175	3.5	8.04	83	6.9	6.06

Dijagram zavisnosti proticaja i vrednosti temperature i elektroprovodljivosti (slika 7.32.) ukazuje da temperatura vode raste i opada zajedno sa proticajem, dok elektroprovodljivost raste postepeno tokom cele godine, bez obzira na količine voda, a najniža vrednost, od svega 2.25 µs/cm, beleži se u zimskom periodu, kao posledica snežnih padavina. Vrednosti kiseonika su relativno niske (3.1-8.06 mg/l), dok mutnoća vode u maksimumu, kao posledica brze cirkulacije i dizanja suspendovanog materijala deluvijalno-proluvijalnih naslaga, iznosi čak 21.4 NTU.



Slika 7.32. Uporedni dijagram izdašnosti Q (l/s) i vrednosti temperature i elektroprovodljivosti za ponor Velike Brezovice

Radovansko vrelo spada u grupu jačih karstnih vrela, čije količine variraju od minimalnih 98 l/s, u letnjem, do 1675 l/s u prolećnom periodu. Temperatura vode ima sezonski, ali svakako i planinski karakter, obzirom da je u letnjem periodu zabeležena max temperatura od svega 9 °C. Elektroprovodljivost se kreće od 382 do 576 µs/cm (tabela 68), a najviše temperature su zabeležene u prolećnom i letnjem periodu, kada preovlađuje prihranjivanje voda sa karstne površi Brezovice. Sadržaj rastvorenog kiseonika u vodi raste sa povećanjem količina voda koje ističu na vrelo, dok se pH vrednost kreće od 7.2 (tipične karstne vode, prihranjivanje sa karstne površi) do 7.9, što je u zimskom periodu, kada veći udeo u prihranjivanju preuzimaju vode Velike Brezovice. Mutnoća vode je relativno niska, izuzev u jesenjem periodu, kada iznosi čak 17.55 NTU, a što može biti posledica jakih jesenjih padavina i spiranja površinskog zemljišnog taloga.

Tabela 68. Rezultati monitoringa podzemnih voda Radovanskog vrela

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost (µs/cm)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	523	6	7.9	481	7.2	1.6
Proleće	1675	8.8	7.2	576	11.38	0.42
Leto	98	9	7.29	577	6.82	2.8
Jesen	378	7.6	7.46	382	6.09	17.55

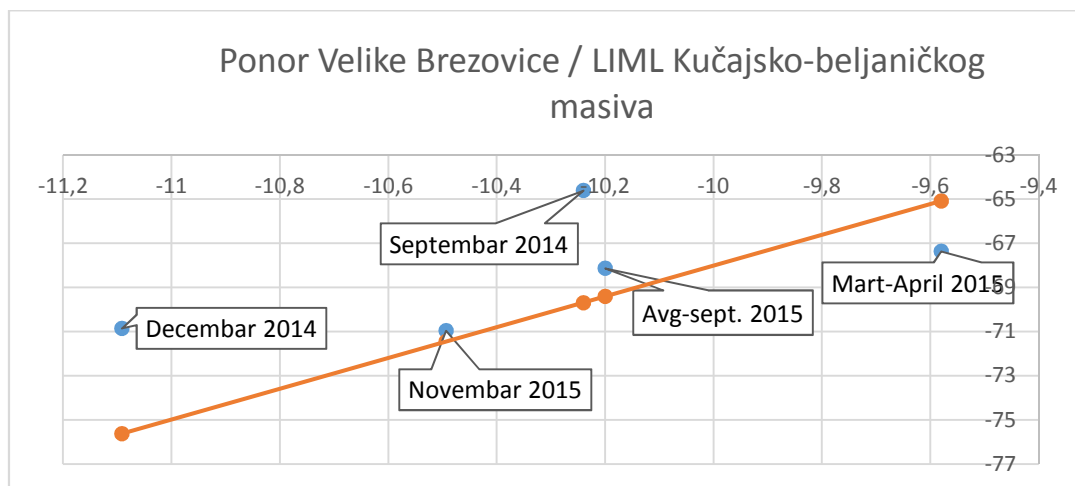
Izotopski sadržaj ugljenika $\delta^{13}\text{C}$ u vodi na ponoru Velike Brezovice ima vrednost od -11.15 do -16.44 ‰ (tabela 69), što ukazuje na izotopski sastav iz gasa zemljišnog sloja tipa C3. Vrednosti kiseonika $\delta^{18}\text{O}$ u prolećnom periodu, kada su zastupljene velike kiše, iznose -9.58‰, što govori da se u padavinama odvijao količinski efekat (vidi poglavlje

5.3.1.). Najniže vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ zabeležene su u zimskom periodu, što može biti posledica uticaja sadržaja stabilnih izotopa iz snega. Isto se odnosi i na sadržaj vodonika δD , čije se vrednosti kreću od -64.61 do -70.96 ‰ (tabela 69).

Na dijagramu sadržaja stabilnih izotopa u odnosu na LIML (slika 7.33.), uočava se jaka veza voda površinskog toka sa padavinama. Izuzetak su uzorci iz septembra 2014, čiji sastav pokazuje da su vode nastale izlučivanjem reisparenih padavina, kao i uzorci iz prolećnog perioda, koji odražavaju količinski efekat.

Tabela 69. Sadržaj stabilnih izotopa voda ponora Velika Brezovica

Ponor Velike Brezovice	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Septembar 2014	-	-64.61	-10.24
Zima	-13.17	-70.85	-11.09
Proleće	-16.44	-67.36	-9.58
Leto	-15.14	-68.13	-10.20
Jesen	-11.15	-70.96	-10.49



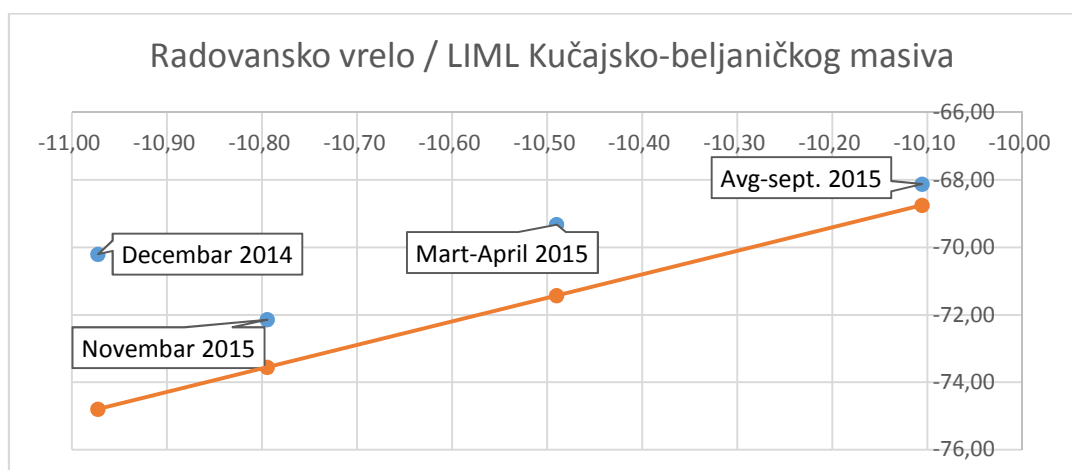
Slika 7.33. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi ponora Velike Brezovice

Sadržaj stabilnog izotopa $\delta^{13}\text{C}$ u vodi Radovanskog vrela, kreće se od svega -6.74 do -12.66 (tabela 70) ‰. Nizak sadržaj ugljenika ukazuje na prihranjivanje vode koja je u podzemlju provela znatno duži period, ili je bila izložena nekoj od jačih geohemijskih reakcija. Ovakve vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ susreću se u vodama koje su duže vremena provele u

interakciji sa matičnom stenom, naročito u karstu, kao i kod voda koje predstavljaju mešavinu starijih i mlađih voda. Međutim, izotopski sastav $\delta^{18}\text{O}$ i δD ‰, pokazuje da se radi o veoma mladim vodama. Rezultati sadržaja izotopa u svim uzorcima se nalaze iznad i blizu lokalne meteorske linije (slika 7.34.), izuzev decembra 2014. godine, za koji se sada već jasno uočava veza sa prihranjivanjem u letnjem periodu na osnovu reisparenih padavina.

Tabela 70. Sadržaj stabilnih izotopa u vodi Radovanskog vrela

Radovansko vrelo	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Zima	-12.66	-70.20	-10.97
Proleće	-6.95	-69.32	-10.49
Leto	-6.74	-68.12	-10.11
Jesen	-12.17	-72.14	-10.79



Slika 7.34. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi Radovanskog vrela

Kao i kod ponora Busovate, i na ponoru Velike Brezovice je vršeno uzorkovanje vode, kako bi se odredile ulazne vrednosti ^3H i ^{14}C u sistem, odnosno nulte vrednosti, u cilju lakšeg i preciznijeg utvrđivanja starosti voda na pojavama i objektima. Rezultati su (tabele 71 i 72) pokazali da ulazne vrednosti tricijuma za područje Kučaja iznose 8.41 TJ, što je za 0.65 TJ niže nego na ponoru Busovate, a vrednost ^{14}C iznosi 94.52 pMC, odnosno za 6.91 pMC je niža u odnosu na vode sa Busovate. Proračunom starosti voda sa ponora Velike Brezovice, dokazano je da se radi o vodama starosti od čak 536 godina, što kao i kod ponora Busovate, ukazuje na priliv voda veće starosti, koje se u tok Velike Brezovice

ulivaju isticanjem iz manjih izvora pukotinske izdani formirane u okviru stena devonske starosti.

Tabela 71. Sadržaj radioaktivnog izotopa ^3H u vodi ponora Velika Brezovica

Sadržaj radioaktivnih izotopa	^3H (TU)	(+/-) 1 sigma
Ponor Velika Brezovica	8.41	0.26

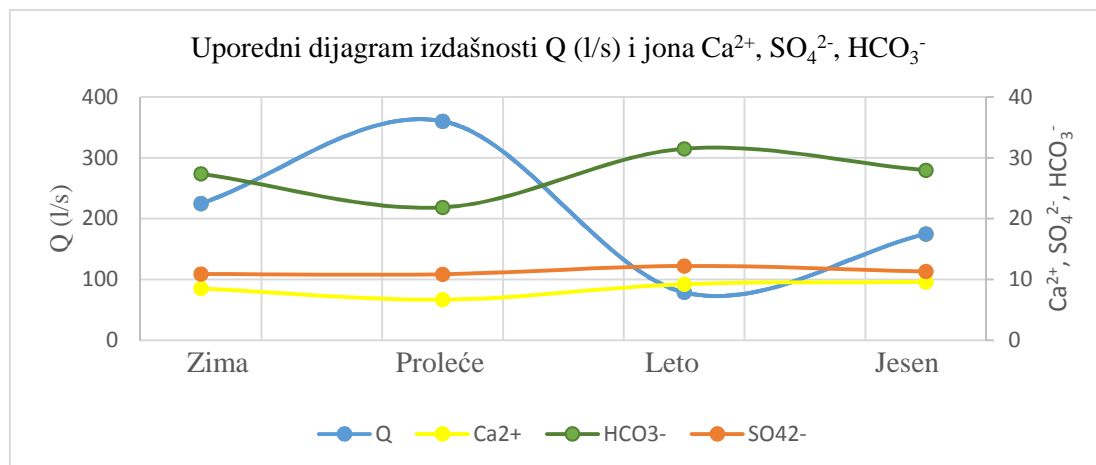
Tabela 72. Sadržaj ugljenika ^{14}C i procenjena starost voda ponora Velika Brezovica

Radioaktivni izotopi	^{14}C (pMC)	(+/-) 1 sigma	Mlada komponenta	$\delta^{13}\text{C}$ u matičnoj steni za ceo masiv ‰	^{14}C starost (godine) (^{14}C inic=100 pMC) ($\delta^{13}\text{C}$ u vodi i matičnoj steni je uzet u obzir)
Velika Brezovica	94.52	0.24	93.404	+1.37	536

Jonski sastav voda ponora Velike Brezovice ukazuje da se radi o $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ vodama, sa količinama Ca^{2+} koje imaju maksimalne vrednosti od svega 9.601 mg/l i sadržajem HCO_3^- do 31.49 mg/l (tabela 73). Sadržaj sulfata je, takođe, nešto povišen u odnosu na prosečni u karstnim terenima i pojavama na Kučaju sa maksimalnih 12.23 mg/l, a zapažaju se niske koncentracije jona Mg^{2+} i Na^+ (max 1.764 mg/l za Na^+ i 2.31 mg/l za Mg^{2+}). Generalno, sadržaj jona u vodi ponora Velike Brezovice je jako nizak i primarno ukazuje na jonski sastav padavina. Na osnovu dijagrama odnosa proticaja i određenih jonskih parametara, uočava se da se vrednosti Ca^{2+} , HCO_3^- i SO_4^{2-} smanjuju sa povećanjem proticaja, kao i da se vrednosti povećavaju smanjenjem količina voda koje poniru u ponor Velike Brezovice (slika 7.35.).

Tabela 73. Jonski sastav voda ponora Velika Brezovica

Ponor Velike Brezovice	mg/L								
	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Na^+	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Zima	8.561	0.911	2.168	1.764	0.0388	0.9321	2.5534	10.8951	27.3585
Proleće	6.695	1.279	1.976	1.531	0.04	1.2131	2.9846	10.8842	21.8685
Leto	9.252	1.089	2.284	1.791	0.0409	0.9483	2.2853	12.2312	31.49125
Jesen	9.601	1.035	2.31	1.574	0.0506	0.9731	5.7129	11.3296	27.95833



Slika 7.35. Uporedni dijagram izdašnosti Q (l/s) i jona Ca²⁺ i HCO₃⁻ i SO₄²⁻ (mg/l) na ponoru Velike Brezovice

Nasuprot sadržaju pojedinih jona u vodama na ponoru Velike Brezovice sa kojom su povezane, vode Radovanskog vrela imaju tipičan CaCO₃ karakter, sa koncentracijama Ca²⁺ od 34.28 mg/l u prolećnom periodu, kada vode brzo procirkulišu kroz podzemlje, do maksimalnih 72.45 mg/l, koje se javljaju u jesenjem periodu (nakon dužeg boravka u podzemlju). Sadržaj HCO₃⁻ ima vrednosti od 113.56 do 225.29 mg/l, a minimalne i maksimalne vrednosti se poklapaju sa minimalnim i maksimalnim vrednostima Ca²⁺. Sadržaj sulfata je neznatno promenjen u odnosu na vrednosti na ponoru, dok su koncentracije magnezijuma nešto više, pa se kreću do 3.21 mg/l, što može biti posledica kretanja kroz dolomitične krečnjake jurske starosti (tabela 74).

Tabela 74. Jonski sastav voda Radovanskog vrela

Radovansko vrelo	mg/L								
	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Zima	44.72	0.7855	3.21	1.786	0.0303	1.029	3.2033	11.5074	150.7717
Proleće	34.28	0.5856	2.734	0.5638	0.02	0.6672	7.0762	9.3533	113.5617
Leto	40.81	0.6222	2.801	0.6916	0.0143	0.6982	8.7324	9.2496	135.9792
Jesen	72.45	0.8315	2.758	1.712	0.0413	0.8535	6.9772	11.1277	225.2933

Na kraju se može izvesti zaključak da se sistem Radovanskog vrela karakteriše brza, gravitaciona cirkulacija, kao i da se vode cirkulacijom kroz podzemlje bogate sadržajem Ca²⁺, Mg²⁺ (u minimalnoj meri) i HCO₃⁻. Takođe, u periodu proleća i leta u karstnim vodama uočava se dominantni uticaj voda iz druge izdani (stena devonske starosti -

peščari, peskoviti glinci, konglomerati), na šta ukazuju značajno snižene vrednosti sadržaja izotopa $\delta^{13}\text{C}$ u vodi.

Sistem Vrelo Grze

Vrelo Grze spada u gravitaciona vrela, sa velikim količinama voda, naročito u prolećnom periodu (više m^3/s). Opirom bojenja potvrđena je veza sa ponorom Velike Brezovice, sa kojim je i Radovansko vrelo u vezi, ali zbog svojih različitih fizičko-hemijskih i izotopskih karakteristika voda, utvrđeno je da ova dva vrela funkcionalno pripadaju različitim sistemima.

U pogledu osnovnih fizičko-hemijskih parametara, uočavaju se veoma ujednačene vrednosti, pa tako sa promenama količina voda koje ističu na vrelu, temperatura, pH vrednost, elektroprovodljivost, kiseonik i mutnoća veoma malo variraju. Kapacitet vrela u vreme obilaska pojava kretao se od 223 l/s, u letnjem periodu, pa do 3302 l/s za vreme velikih voda. Temperatura vode je bila konstantno oko 9 °C, s tim da najveća vrednost u letnjem periodu iznosi 9.5 °C. Vrednost pH se kretala od 7.4-7.81, a vrednost elektroprovodljivosti od 554-568 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (tabela 75), odnosno svega 14 $\mu\text{s}/\text{cm}$ razlike između najviših jesenjih i najnižih prolećnih vrednosti. Vrednost rastvorenog kiseonika je nešto niža u jesenjem periodu i iznosi 6.32 mg/l, dok se u ostalim mesecima kreće između 10-11 mg/l. U pogledu mutnoće, vode Grze su veoma bistre, a neznatno zamućenje (za vode u karstu) od 1.5 i 2.66 NTU se javlja u zimskim i jesenjim mesecima, što može biti posledica aktiviranja kanala zapunjavanih u ranijim fazama suspendovanim nanosom. Ovako postojan režim fizičko-hemijskih karakteristika voda može da ukaže na postojanje dubljih ili dužih kanala u zaleđu vrela, u okviru kojih voda cirkuliše i provodi određeni vremenski period, pre isticanja na površinu terena.

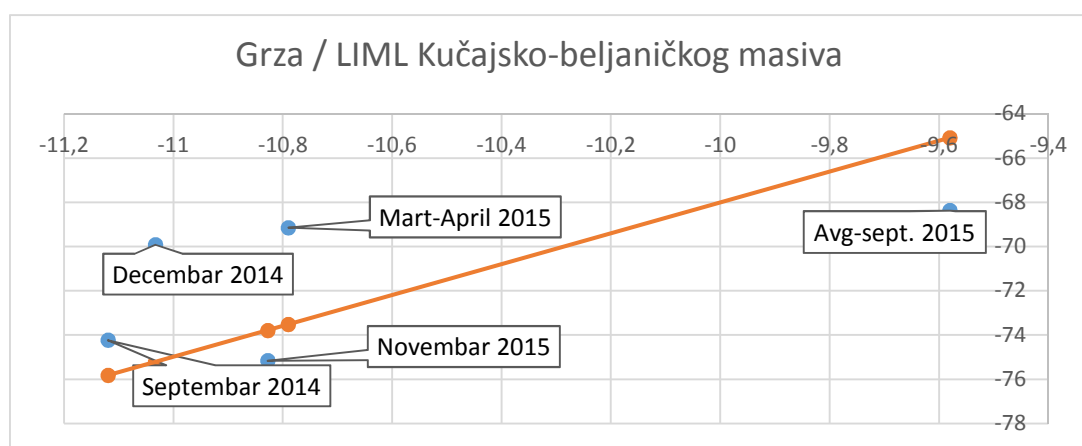
Tabela 75. Rezultati monitoringa podzemnih voda vrela Grze

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	1774	9.1	7.6	562	10.1	1.5
Proleće	3302	9.2	7.5	554	11.5	0.34
Leto	223	9.5	7.4	564	11.1	0.41
Jesen	1115	9.4	7.81	568	6.32	2.66

Sadržaj stabilnog izotopa ugljenika $\delta^{13}\text{C}$ kreće se od -7.28 do -9.18‰ (tabela 76), što ukazuje na razliku između voda Radovanskog vrela i vrela Grze. Niže vrednosti izotopa ugljenika ukazuju na prolongirani kontakt vode i stene. Sadržaj stabilnih izotopa kiseonika i deuterijuma, i njihov položaj u odnosu na LIML (slika 7.36.), pokazuje da se vrednosti rezultata iz avgust-septembra i novembra 2015. godine nalaze ispod LIML, što može da ukaže na dreniranje vode veće starosti, odnosno koja duži vremenski period provodi u interakciji sa stenom. Ostale vrednosti padaju iznad i blizu lokalne meteorske linije, pa ukazuju na bržu cirkulaciju i vezu podzemnih voda sa padavinama.

Tabela 76. Sadržaj stabilnih izotopa u vodi vrela Grze

Grza	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Sept. 2014	-	-74.23	-11.12
Zima	-9.18	-69.91	-11.03
Proleće	-7.28	-69.14	-10.79
Leto	-7.69	-68.37	-9.58
Jesen	-7.54	-75.16	-10.83

Slika 7.36. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi vrela Grze

Obzirom na specifične i postojeane fizičko-hemijske parametre vode, na vrelu Grze su sprovedena i ispitivanja sadržaja radioaktivnih izotopa. Tom prilikom izrađene su analize tricijuma ^3H i $^3\text{H}/^3\text{He}$, kao i analiza sadržaja ugljenika ^{14}C . Vrednost tricijuma na vrelu Grze iznosi 6.12 TU, što svrstava vode sa Grze u “moderne vode“, starosti između 5-10 godina. Daljim istraživanjima i izradom analize $^3\text{H}/^3\text{He}$, dobijena je starost vode na vrelu

Grze od 4.7 godina (tabela 77). Uzorak vode za utvrđivanje starosti uzet je u septembru mesecu, odnosno u periodu minimuma, kada se smatralo da na vrelu ističu vode koje su najduže vremena provele u podzemlju.

Tabela 77. Sadržaj radioaktivnih izotopa ^3H i $^3\text{H}/^3\text{He}$ u vodi vrela Grze

Sadržaj radioaktivnih izotopa	^3H (TU)	(+/-) 1 sigma	$^3\text{H}/^3\text{He}$ starost (godine)	Neposredna starost (godine)
Grza	6.12	0.18	4.7	1.2

Ovaj podatak govori o postojanju i razviću više nivoa karstnih kanala, od kojih najvećim kanalima voda brzo cirkuliše prema izvorišnoj zoni, a što je opitima obeležavanja i potvrđeno (voda se od ponora Velike Brezovice do vrela Grze pri opitu kretala brzinom od 0.045 m/s). Međutim, utvrđivanjem sadržaja najveće starosti najmlađe komponentne $^3\text{H}/^3\text{He}$ u vodi, dobijena je starost od 4.7 godina, pa se izvodi zaključak da na vrelu Grze postoji i sistem dubljih ili lateralnih pukotina i kanala, kroz koji se voda znatno sporije kreće i koji verovatno zaleže ispod kote primarnog isticanja, odnosno kote glavnih kanala ovog karstnog sistema. Upravo postojanje ovakve cirkulacije može da opravda ujednačene fizičko-hemijske karakteristike podzemnih voda, uz objašnjenje da se dreniranje vode iz dubljih kanala vrši konstantno, ali da je u periodu velikih voda dominantna brza cirkulacija, dok u minimumu preovlađuje isticanje voda koje se sistemom sitnijih pukotina i kanala kreću kroz podzemlje.

Vrednost sadržaja radioaktivnog izotopa ^{14}C u vodi iznosi 80.07 pMC (tabela 78), što je niže u odnosu na vrednosti na ponoru Velike Brezovice, ali proračunom starosti preko formule objašnjene u poglavlju 5.3.1. i uvrštavanjem realnih vrednosti stabilnog izotopa $\delta^{13}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}$ u vodi Grze u periodu uzorkovanja vode za analizu ^{14}C i srednjeg sadržaja $\delta^{13}\text{C}$ u steni za ceo masiv), zaključuje se da su vode vrela Grze mlade, odnosno da nemaju starost koja se može detektovati analizom ^{14}C .

Tabela 78. Sadržaj ugljenika ^{14}C i procenjena starost voda vrela Grze

Radioaktivni izotopi	^{14}C (pMC)	(+/-) 1 sigma	Mlada komponenta	$\delta^{13}\text{C}$ u vodi kada je uzet uzorak ‰	$\delta^{13}\text{C}$ u matičnoj steni za ceo masiv ‰	^{14}C starost (godine) ($^{14}\text{C}_{\text{inic}}=100$ pMC) ($\delta^{13}\text{C}$ u vodi i matičnoj steni je uzet u obzir)
Ponor Velika Brezovica	80.07	0.21	80.00	7.69	+1.37	Moderne

Pored ovih, na vrelu Grze je sprovedeno i ispitivanje sadržaja plemenitih gasova u vodi, sa ciljem da se utvrdi temperatura voda u trenutku infiltracije u sistem, odnosno temperaturnog režima koji je vladao u trenutku infiltracije. Analizom je dobijeno da temperatura prihranjivanja iznosi 11.19 °C (tabela 79), što bi na osnovu rezultata srednjih temperatura vazduha na KS Crni Vrh za period 1997-2012. i 2014-2015. (tabele 2, 3 i 4), odgovaralo periodu april-maj.

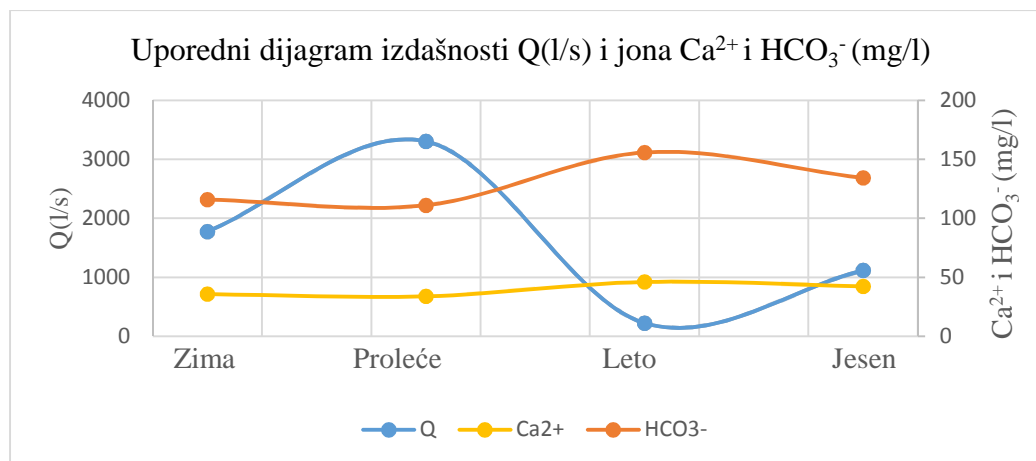
Tabela 79. Sadržaj plemenitih gasova u vodi vrela Grze

Naziv lokacije	He (ccSTP/g)	Ne (ccSTP/g)	Ar (ccSTP/g)	Kr (ccSTP/g)	Xe (ccSTP/g)	R/Ra	Noble gas recharge temperature (°C)	chi2-test
Grza	4.5324E-08	1.9474E-07	3.6992E-04	8.6329E-08	1.2412E-08	1.0740	11.19	0.16

Jonski sastav voda vrela Grze, ukazuje na vode $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ klase, sa količinama Ca^{2+} koje imaju maksimalne vrednosti do 6 mg/l, u letnjem periodu i sadržajem HCO_3^- do 155.75 mg/l, takođe u letnjem periodu (tabela 80). Sadržaj ostalih jona je relativno nizak, izuzev koncentracija sulfata koje imaju maksimalnu vrednost od 11.71 mg/l, kao i povišene koncentracije magnezijuma (maksimalno 4.66 mg/l), što može da ukaže na prihranjivanje vode sa dolomitičnih krečnjaka jurske starosti. Dijagram zavisnosti proticaja od sadržaja Ca^{2+} i HCO_3^- pokazuje da se sa povećanjem izdašnosti smanjuju vrednosti ovih jona, i obrnuto (slika 7.37.) što i jeste karakteristika većina vrela sa gravitacionim tipom cirkulacije.

Tabela 80. Jonski sastav voda vrela Grze

Grza	mg/L								
	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Zima	35.65	0.6805	3.093	1.146	0.0252	0.8943	4.8465	11.7168	115.9
Proleće	33.85	0.6408	3.166	1.046	0.03	0.7907	4.9988	11.4532	111.02
Leto	46	0.6447	4.665	1.226	0.0346	0.8473	6.2391	9.6368	155.7533
Jesen	42.27	0.6616	3.658	0.9655	0.0325	0.8481	6.8913	10.472	134.2

Slika 7.37. Uporedni dijagram izdašnosti Q (l/s) i jona Ca²⁺ i HCO₃⁻ (mg/l)

Na kraju se može zaključiti da vrelo Grze predstavlja vrelo sa preovlađujućim razvićem karstnih kanala, kojima se voda gravitaciono u periodu velikih i srednjih voda rapidno kreće kroz podzemlje, uz izraženo razviće pukotina i kanala manjih dimenzija koji zaležu dublje ispod glavnih karstnih kanala u karstni sistem, kojim vode zantno sporije cirkulišu dok ponovno ne izađu na površinu terena nakon **4.7 godina**. Ovakvi rezultati nam jasno ukazuju na postojanje značajnih rezervi podzemnih voda ispod primarnih zona isticanja i kod karstnih vrela koji su preovlađujuće gravitacionog tipa isticanja.

7.2.3. Rezultati istraživanja na sistemima sa ascendentnim tipom cirkulacijom na Beljanici

Sitem S1: Mlava – Belosavac – Belosavac 2

Sistem S1 Mlava – Belosavac – Belosavac 2, predstavlja sistem koji ima duboku sifonalnu cirkulaciju, a koji se jednim delom prihranjuje preko ponorske zone reke Suvi Do, za koji je opitom bojenja potvrđena veza sa vrelom Mlave.

Vode koje poniru kroz ponorsku zonu Suvog Dola imaju pH vrednost iznad 8, što ukazuje na vode koje potiču sa površi izgrađene delom od kristalastih škriljaca. Maksimalni zabeleženi proticaj u prolećnom periodu iznosio je 522 l/s, dok je minimalni proticaj zabeležen u jesen 2015. godine, kada je količina vode u rečnom toku iznosila 264 l/s. Obzirom da se radi o površinskom toku, vrednosti kiseonika su niže (max. 5.47 mg/l), dok je mutnoća povišena usled brze površinske cirkulacije uslovljene nagibom terena. Elektroprovodljivost je nešto viša u odnosu na ostale ponornice (272-305 $\mu\text{s/cm}$), što je posledica priliva vode vrela Buk. Rezultati fizičko-hemijskih karakteristika prikazani su u tabeli 81.

Tabela 81. Rezultati monitoringa voda na ponoru Suvog Dola

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost ($\mu\text{s/cm}$)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	358	6.2	8.3	297	3.56	4.1
Proleće	522	9.9	8.2	272	3.2	12
Jesen	264	7.3	8.25	305	5.47	3.79

Količine voda na vrelu Mlave izmerene u periodima uzorkovanja se kreću od minimalnih 362 l/s u letnjem periodu do 3997 l/s u proleće. Krećući se zapadno prema izvorišnoj zoni Belosavca i Belosavca 2, vrednosti izdašnosti opadaju, pa se tako količine koje su isticale na vrelu Belosavac kreću od 86-410 l/s, dok su na Belosavcu 2 bile konstantno male vrednosti od 8-10 l/s. Ove količine voda koje se smanjuju od pojave do pojave, mogu da ukažu na zonalnost u karstifikaciji masiva po severnom obodu, odnosno na različite dubine zaleganja karstnih kanala. O tome svedoči i temperaturni režim ovih voda, kao i ostale fizičko-hemijske karakteristike, prikazane u tabelama 82, 83 i 84.

Naime, temperatura vode najviše oscilira i pokazuje sezonski, i efekat uticaja površinskih voda na vrelu Mlave. Najniže temperature zabeležene su u zimskom periodu (8.2 °C), dok su najviše u letnjem periodu (10.5 °C), što je u korelaciji i sa vodama ponora Suvi Do. Temperatura vode na vrelu Belosavac je dosta ujednačena, bez većih oscilacija i kreće se od 9.5 do 10.5 °C, čime se potvrđuje duži boravak u podzemlju, dok Belosavac 2 ima posebni temperaturni režim sa povišenim temperaturama subtermalnog karaktera od 13.8 °C u prolećnom periodu, do maksimalno izmerenih 16 °C u letnjem periodu. Minimalne temperature prolećnog perioda ukazuju na priliv mladih voda, odnosno voda koje se najverovatnije mešaju na manjim dubinama ili u pripovršinskoj zoni sa vodom iz kanala dublje sifonalne cirkulacije, što je u potpunosti isključeno u periodu minimuma, kada je na izvoru isticala samo subtermalna voda.

Vrednost pH kod svih pojava kreće se od minimalnih 7.4 do 7.84. Najviša vrednost zabeležena je u zimskom periodu na vrelu Mlave, dok je u istom periodu na Belosavcu zabeležena vrednost od 7.72, što ukazuje da je voda duže boravila u karstnoj sredini sa sniženom pH vrednosti.

Vrednosti elektroprovodljivosti takođe rastu sa vremenom boravka vode u podzemlju, pa tako na vrelu Mlave najviše osciliraju i kreću se od 383-412 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Najviša vrednost zabeležena je u letnjem periodu, odnosno u periodu najdužeg boravka u podzemlju. Vrednosti na Belosavcu i Belosavcu 2 su dosta ujednačene i kreću se od 459-476 $\mu\text{s}/\text{cm}$, izuzev prolećne vrednosti zabeležene na Belosavcu 2 od 518 $\mu\text{s}/\text{cm}$, koja ukazuje na jako mešanje ovih voda sa pripovršinskim vodama.

Kiseonik u vodi varira sezonski, pa su najviše vrednosti zabeležene u prolećnom periodu, a najniže u zimskom. Mutnoća vode je najniža na vrelu Belosavac i uglavnom je ispod 1 NTU, izuzev u letnjem periodu, kada je zabeležena vrednost od 1.1 NTU, dok se na Mlavi kreće od 2.2 do 3.7 NTU. Vode Belosavca 2 su bistre, izuzev prolećnog perioda, kada je mutnoća vode iznosila čak 10.56 NTU, a što ide u prilog saznanju o mešanju voda u ovom periodu, obzirom da vode ovakve mutnoće ukazuju na spiranje površinskog pedološkog sloja.

Tabela 82. Rezultati monitoringa podzemnih voda vrela Mlave

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost (µs/cm)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	1738	8.2	7.84	385	3.24	2.8
Proleće	3997	9.4	7.48	394	11.63	2.3
Leto	362	11.1	7.4	412	8.8	2.2
Jesen	1295	9	7.6	383	5.74	3.7

Tabela 83. Rezultati monitoringa podzemnih voda vrela Belosavac

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost (µs/cm)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	124	9.5	7.72	468	3.2	0.69
Proleće	410	9.5	7.4	476	11.3	0.55
Leto	86	10.5	7.36	475	9.79	1.1
Jesen	98	10	7.4	459	5.55	0.84

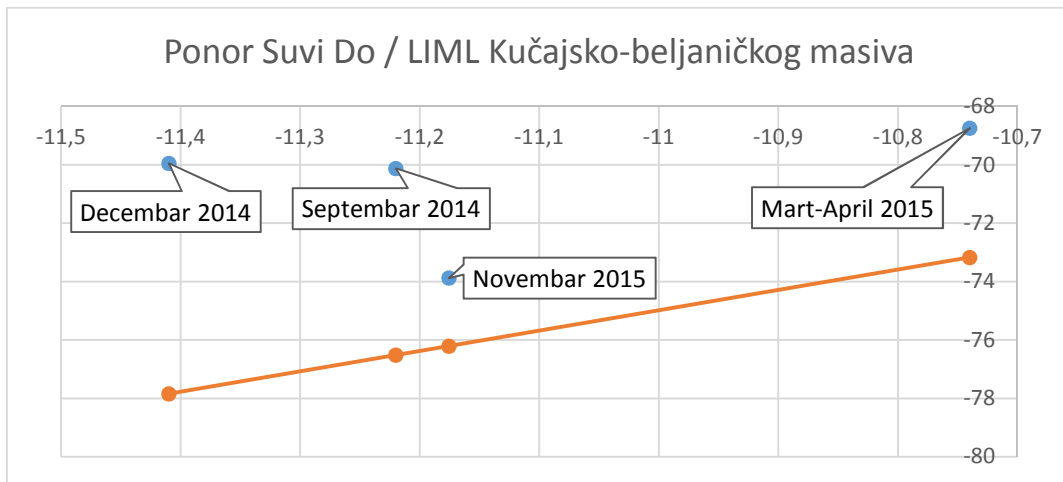
Tabela 84. Rezultati monitoringa podzemnih voda vrela Belosavac 2

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost (µs/cm)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	9	14.5	7.5	470	2.7	1.2
Proleće	10	13.8	7.5	518	7	10.56
Leto	8	16	7.41	468	7.7	1.15
Jesen	9	15.5	7.4	465	4.46	0.63

Na osnovu sadržaja stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi ponornice Suvi Do, potvrđena je odlika površinske cirkulacije, odnosno vrednosti ukazuju da su vode formirane od padavina koje su bile izložene različitim sezonskim efektima. Vrednosti se kreću od -10.74 do -11.41 ‰ za $\delta^{18}\text{O}$, dok se za sadržaj vodonika δD vrednosti kreću od -68.78 do -73.88 ‰ (tabela 85). Najniže vrednosti su zabeležene u prolećnom periodu i koncentrisano su raspoređene u krajnjem levom uglu dijagrama, što ukazuje na turbulentnu i brzu cirkulaciju površinske vode koja uslovljava evaporaciju lakših izotopa, zbog čega postala voda u toku ima izotopski teži sastav u odnosu na padavine (slika 7.38.). Sadržaj $\delta^{13}\text{C}$ kreće se od -12.09 do 13.13 ‰, reflektujući izmenjeni, frakcionisani sadržaj $\delta^{13}\text{C}$ iz gasa zemljišnog sloja (tabela 85).

Tabela 85. Sadržaj stabilnih izotopa u vodi ponora Suvi Do

Ponor Suvi Do	$\delta^{13}\text{CDIC}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Septembar 2014	-	-70.12	-11.22
Zima	-12.09	-69.95	-11.41
Proleće	-13.13	-68.74	-10.74
Jesen	-12.99	-73.88	-11.18

Slika 7.38. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi ponora Suvi Do

Tačke izotopskog sastava $\delta^{18}\text{O}$ i δD vrela Mlave, Belosavac i Belosavac 2 pokazuju pripadnost istom karstnom sistemu, što se vidi iz slika 7.39., 7.40. i 7.41., na kojima se uočava “padanje” tačaka svih pojava na isto mesto na dijagramu. Vrednosti ovih uzoraka padaju relativno blizu lokalne meteorske linije, što ukazuje na njihovu vezu sa padavinama, ali u određenim periodima verovatno dolazi do procesa sekundarne frakcionacije, što se zaključuje na osnovu tačaka koje leže ispod lokalne meteorske linije (posebno uzorci iz decembra 2014. i avgust-septembra 2015).

Zaključuje se da su vode bile u prolongiranom kontaktu sa stenom, odnosno da se radi o sifonalnoj cirkulaciji i vodama koje sporije cirkulišu kroz podzemlje, budući da su uzorci uzeti na kraju recesivnih perioda. Vode koje se dreniraju u periodu malovođa (usporena cirkulacija), kreću se dubljim kanalima usled manjeg hidrostatičkog pritiska u zaleđu.

Izuzetak je vezan za uzorke iz aprila 2015. godine. Tačke iz ovog perioda takođe se nalaze ispod lokalne meteorske linije, ali u ovom slučaju ne odražavaju sekundarnu frakcionaciju, već su nastale topljenjem snega, čiji je izotopski sastav lakši, što se odrazilo i na izotopski sastav izvorskih voda.

Obzirom da se izotopski sastav voda na vrelima ne poklapa sa izotopskim sastavom vode na ponoru u aprilu mesecu, može se zaključiti da su vode koje su na izvorima isticale u aprilu infiltrirane u podzemlje pre početka aprila, kada je završeno topljenje snežnog pokrivača (vidi tabelu 13, poglavlje 4.2). To može da ukaže da su vode infiltrirane u podzemlje u periodu od kraja januara do marta, što znači da je vreme cirkulacije voda kroz podzemlje oko 1-2 meseca u periodu srednjih voda.

Vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ i δD na vrelu Mlave se kreću od -10.06 do -11.44 ‰ za $\delta^{18}\text{O}$ i -69.39 do -73.05 ‰ za δD (tabela 86), na vrelu Belosavac -9.72 do -11.50 ‰ za $\delta^{18}\text{O}$, a za δD -70.47 do -72.91 ‰ (tabela 87), dok na vrelu Belosavac 2 vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ iznose -10.01 do -11.23 ‰, a vrednosti vodonika δD se kreću od -71.03 do -73.88 ‰ (tabela 88).

Vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ su najviše na vrelu Mlave i kreću se od -11.05 do -12.43 ‰, odražavajući bržu cirkulaciju, odnosno kraći boravak vode u podzemlju u odnosu na vrela Belosavac. Sadržaj stabilnog izotopa ugljenika u vodi vrela Belosavac iznosi -9.39 do -10.03‰, čime ukazuje da je voda bila u dužem kontaktu sa stenom, dok na Belosavcu 2 se kreće od -9.06 do -10.17 ‰, gde najniže koncentracije ukazuju da je provela u podzemlju više vremena od voda vrela Belosavac.

Tabela 86. Sadržaj stabilnih izotopa u vodi vrela Mlave

Mlava	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Septembar 2014	-	-70.02	-11.05
Zima	-12.15	-71.31	-10.06
Proleće	-11.05	-73.05	-10.34
Leto	-11.91	-69.39	-10.06
Jesen	-12.43	-72.96	-11.44

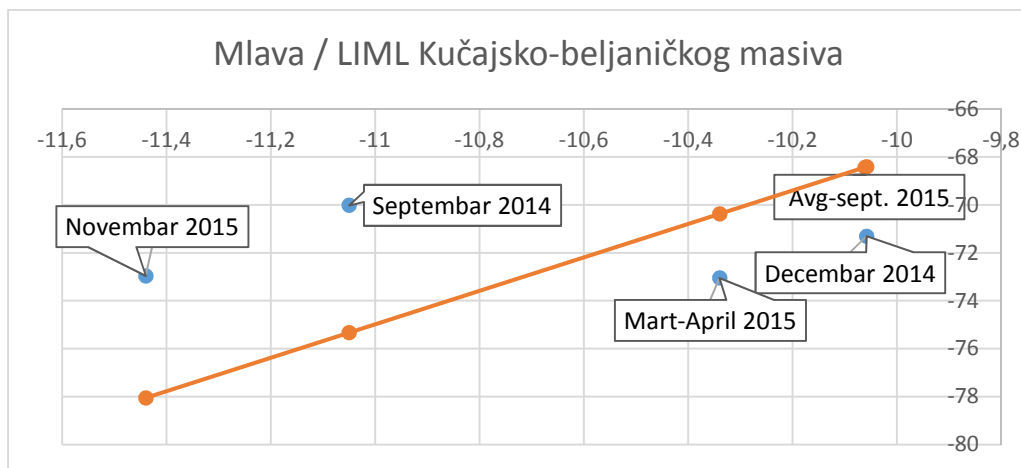
Slika 7.39. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi vrela Mlave

Tabela 87. Sadržaj stabilnih izotopa u vodi vrela Belosavac

Belosavac	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Septembar 2014	-	-71.66	-10.83
Zima	-10.03	-71.82	-10.22
Proleće	-9.39	-71.18	-10.07
Leto	-9.45	-70.47	-9.72
Jesen	-9.75	-72.91	-11.50

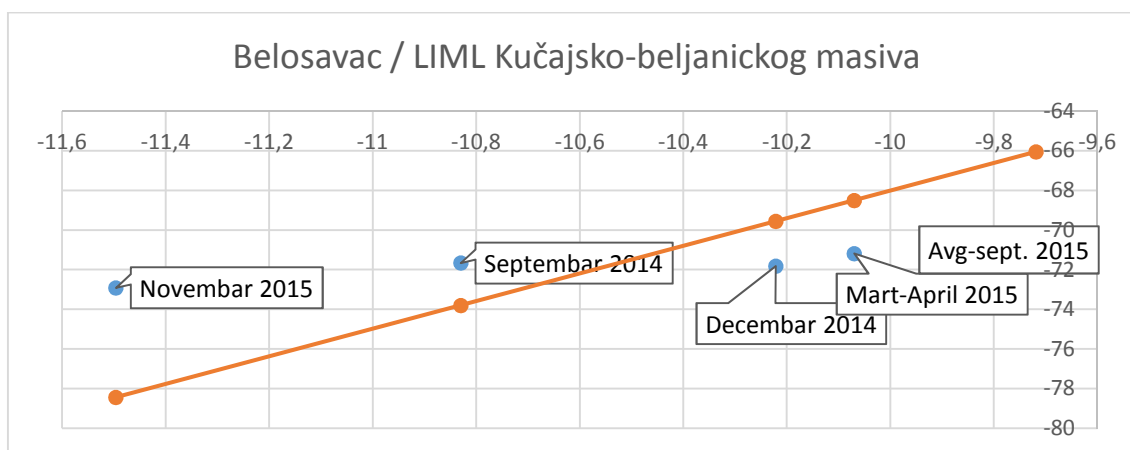
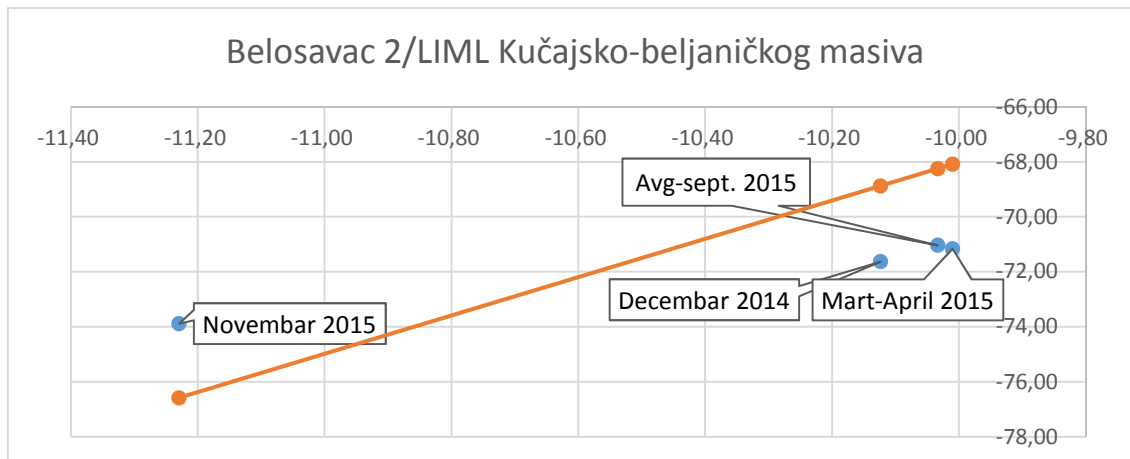
Slika 7.40. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi vrela Belosavac

Tabela 88. Sadržaj stabilnih izotopa u vodi vrela Belosavac 2

Belosavac 2	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Zima	-10.17	-71.63	-10.12
Proleće	-9.20	-71.16	-10.01
Leto	-9.19	-71.03	-10.03
Jesen	-9.06	-73.88	-11.23



Slika 7.41. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi vrela Belosavac 2

Kako bi se utvrdila starost voda u sistemu S1, i ocenile pretpostavke da se radi o vodama koje dubokim karstnim kanalima cirkulišu kroz podzemlje, izvršeno je uzorkovanje vode za analizu sadržaja radioaktivnih izotopa ^3H i $^3\text{H}/^3\text{He}$ na sve tri pojave u sistemu S1. Rezultati analiza prikazani su u tabelama 89, 90 i 91, a ukazuju da u periodu recesije, kada na izvoru ističu vode koje se najduže zadržavaju u izdani, starost voda iznosi 6 godina za vrelo Mlave, za vrelo Belosavac 12.5 godina i za vrelo Belosavac 2 26.6 godina. Na osnovu ovih rezultata izvodi se zaključak da se radi o “polumladim vodama”, odnosno vodama koje se kreću sekundarnim kanalima koji znatno dublje zaležu u podzemlje. Time se potvrđuje i svrstavanje ovih pojava u sistem sa ascendentnim kretanjem podzemnih voda.

Sadržaj tricijuma u vodi postepeno opada, odražavajući veću starost, pa tako na vrelu Mlave iznosi 6.25 TJ, na Belosavcu 6.14 TJ, dok na Belosavcu 2 sadržaj tricijuma iznosi 5.6 TJ (tabele 89, 90 i 91). Uvođenjem korektivnog faktora sračunata je neposredna starost vode, koja za Mlavu iznosi +/- 1.2 godine, za Belosavac +/- 0.9 i za Belosavac 2 +/- 0.7 godina. Što znači da Mlava drenirana u septembru 2015. godine može imati minimalnu starost od 4.8 godina do maksimalno 7.2, Belosavac minimalno 11.6 do maksimalno 13.4 godine, a Belosavac 2 minimalno 25.9 do maksimalno 27.3 godine.

Tabela 89. Sadržaj radioaktivnih izotopa ^3H i $^3\text{H}/^3\text{He}$ u vodi vrela Mlave

Sadržaj radioaktivnih izotopa	^3H (TU)	(+/-) 1 sigma	$^3\text{H}/^3\text{He}$ starost (godine)	Neposredna starost (godine)
Mlava	6.28	0.18	6.0	1.2

Tabela 90. Sadržaj radioaktivnih izotopa ^3H i $^3\text{H}/^3\text{He}$ u vodi vrela Belosavac

Sadržaj radioaktivnih izotopa	^3H (TU)	(+/-) 1 sigma	$^3\text{H}/^3\text{He}$ starost (godine)	Neposredna starost (godine)
Belosavac-1	6.14	0.19	12.5	0.9

Tabela 91. Sadržaj radioaktivnih izotopa u vodi vrela Belosavac 2

Sadržaj radioaktivnih izotopa	^3H (TU)	(+/-) 1 sigma	$^3\text{H}/^3\text{He}$ starost (godine)	Neposredna starost (godine)
Belosavac-2	5.60	0.18	26.6	0.7

Uporedo sa analizama radioaktivnih izotopa ^3H i $^3\text{H}/^3\text{He}$, rađena je analiza plemenitih gasova (tabele 92, 93 i 94), na osnovu kojih je proračunata temperatura u vode u zoni prihranjivanja. Temperatura prihranjivanja za vodu vrela Mlave iznosi 11.29 °C, za Belosavac 11.78 °C, dok za Belosavac 2 temperatura prihranjivanja vode iznosi 10.79 °C. Na osnovu relativno sličnih temperaturnih uslova koji su vladali u periodu prihranjivanja voda, može se zaključiti da su vode infiltrirane u podzemlje u prolećnom periodu, najverovatnije kao posledica velikih količina voda i procurivanja i perkolacije u dublje karstne kanale, usled povećanih pritisaka u plićim kanalima, zbog velikih količina voda u sistemu.

Tabela 92. Sadržaj plemenitih gasova u vodi vrela Mlave

Plemeniti gasovi	He (ccSTP/g)	Ne (ccSTP/g)	Ar (ccSTP/g)	Kr (ccSTP/g)	Xe (ccSTP/g)	R/Ra	T (°C)	chi2-test
Mlava	6.2584E-08	2.1257E-07	3.7391E-04	8.4903E-08	1.2596E-08	0.8282	11.29	1.76

Tabela 93. Sadržaj plemenitih gasova u vodi vrela Belosavac

Plemeniti gasovi	He (ccSTP/g)	Ne (ccSTP/g)	Ar (ccSTP/g)	Kr (ccSTP/g)	Xe (ccSTP/g)	R/Ra	T (°C)	chi2-test
Belosavac-1	7.7317E-08	2.0145E-07	3.6459E-04	8.4054E-08	1.2272E-08	0.7228	11.78	0.51

Tabela 94. Sadržaj plemenitih gasova u vodi vrela Belosavac 2

Plemeniti gasovi	He (ccSTP/g)	Ne (ccSTP/g)	Ar (ccSTP/g)	Kr (ccSTP/g)	Xe (ccSTP/g)	R/Ra	T(°C)	chi2-test
Belosavac-2	9.5238E-08	1.8406E-07	3.7096E-04	8.6632E-08	1.2859E-08	0.8382	10.79	1.46

U pogledu jonskog sastava voda sistema S1 (uključujući i vode ponorske zone Suvi Do), u svim vodama dominiraju joni HCO_3^- i Ca^{2+} . Iako se radi o ponorskoj vodi, sadržaj Ca^{2+} u vodi je visok i konstantan sa vrednošću od 53.02 do 56.88 mg/l, kao i sadržaj HCO_3^- , koji se kreće od 161.65 do 164.44 mg/l, a što ukazuje na priliv vode sa karstnog vrela Buk u tok Suvog Dola. Pored ovih, javljaju se još povišene vrednosti suflata koje se kreću od 14.04 do 18.75 mg/l. Sadržaj ostalih jona je nizak, a javljaju se minimalno povišene vrednosti Mg^{2+} i Na^+ (najviše 2.516 mg/l). U tabeli 95 prikazan je sadržaj jona u vodi ponora Suvog Dola.

Tabela 95. Jonski sastav vode ponora Suvi Do

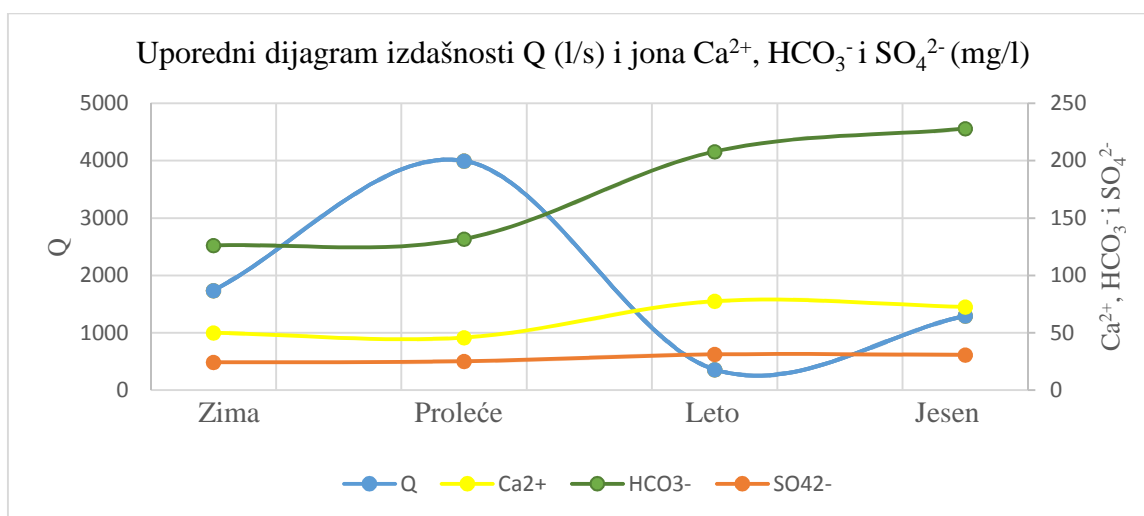
Ponor Suvi Do	mg/L								
	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Na^+	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Zima	53.32	0.9516	1.945	2.09	0.0503	1.1536	2.8911	14.8119	164.4458
Proleće	53.02	0.824	1.649	1.762	0.0397	0.8324	2.4853	14.0433	163.9883
Jesen	56.88	1.288	2.516	2.39	0.0431	1.1188	4.0376	18.7512	161.65

Vrednosti Ca^{2+} i HCO_3^- su najviše na vrelu Mlave i kreću se od 50-77.59 mg/l za Ca^{2+} , dok se za HCO_3^- kreću od 126.7-227.88 mg/l (tabela 96). Ovako povišene vrednosti posledica su već visokih ulaznih vrednosti Ca^{2+} i HCO_3^- u sistem. Pored ovih, na Mlavi su povišene i vrednosti SO_4^{2-} , čije maksimalne vrednosti iznose 30.77 mg/l. Sadržaj Mg^{2+} i Na^+ je viši nego na ponoru Suvog Dola i iznosi maksimalno 3.3 mg/l za Mg^{2+} , dok za Na^+ iznosi 4.06 mg/l. Dijagram zavisnosti proticaja od sadržaja Ca^{2+} i HCO_3^- i SO_4^{2-} (slika

7.42.), pokazuje da sadržaj jona u vodi sa povećanjem izdašnosti na izvoru opada, dok sa opadanjem kapaciteta raste, a što je posledica dužeg boravka u podzemlju.

Tabela 96. Jonski sastav voda vrela Mlave

Mlava	mg/L								
	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Zima	50	0.6924	0.1171	0.2997	0.0246	1.2135	3.3286	24.2965	126.27
Proleće	45.87	0.8849	2.29	2.534	0.04	1.2482	3.4549	25.2404	131.8108
Leto	77.59	1.295	3.302	4.069	0.0482	1.7081	2.8858	31.23	207.9592
Jesen	72.62	1.203	3.016	3.478	0.0421	1.7071	2.4235	30.7744	227.8858



Slika 7.42. Uporedni dijagram izdašnosti Q (l/s) i jona Ca²⁺ i HCO₃⁻ i SO₄²⁻(mg/l) na vrelu Mlave

Vrednosti jona na pojavama Belosavca i Belosavca 2 su niže u odnosu na vrelo Mlave, pa se tako vrednosti Ca²⁺ kreću od 39.7-52.34 mg/l za Belosavac, a 41.07-54.46 mg/l za Belosavac 2, dok se vrednosti HCO₃⁻ kreću od 107.15-152.65 mg/l za Belosavac, a 122-156.05 mg/l za Belosavac 2 (tabele 97 i 98). Sadržaji su takođe niži u odnosu na Mlavu, pa tako maksimalna vrednost na Belosavcu iznosi 15.81 mg/l, odnosno 17.11mg/l na Belosavcu 2.

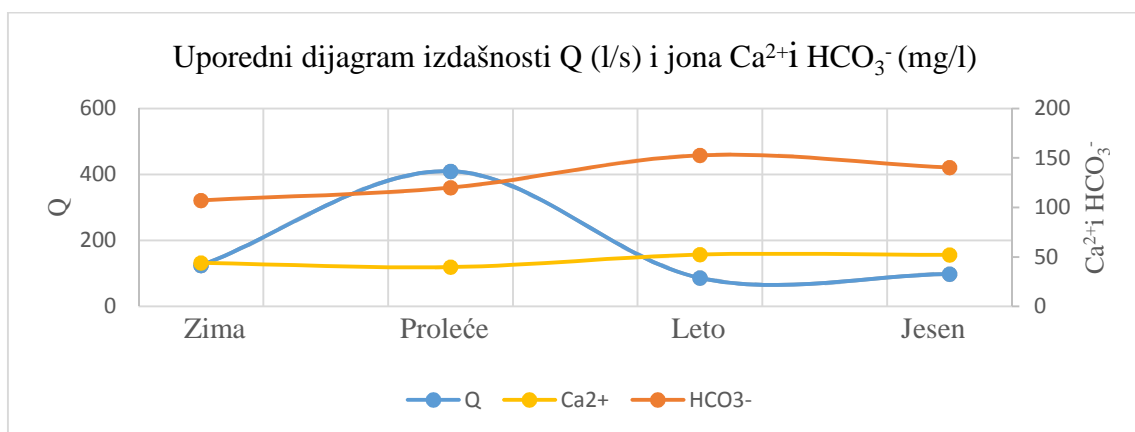
Tabela 97. Sadržaj jona u vodi vrela Belosavac

Belosavac	mg/L								
	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Zima	44.01	0.8592	1.907	2.316	0.0251	0.9671	4.6807	15.7631	107.1567
Proleće	39.7	0.7435	1.376	1.163	0.03	0.9478	3.896	15.8148	120.1192

Leto	52.34	0.783	1.889	1.837	0.0383	1.0655	5.1157	14.4665	152.6525
Jesen	52.17	0.8918	1.809	1.733	0.0194	1.1022	5.2571	15.2005	140.3

Opadanje vrednosti sadržaja jona uočava se sa povećanjem starosti vode, odnosno sa povećanjem dužine boravka vode u izdani. Ovo može biti posledica drugačijih geohemijskih uslova koji vladaju na većim dubinama, izazvanih kontaktom sa drugim tipom stene.

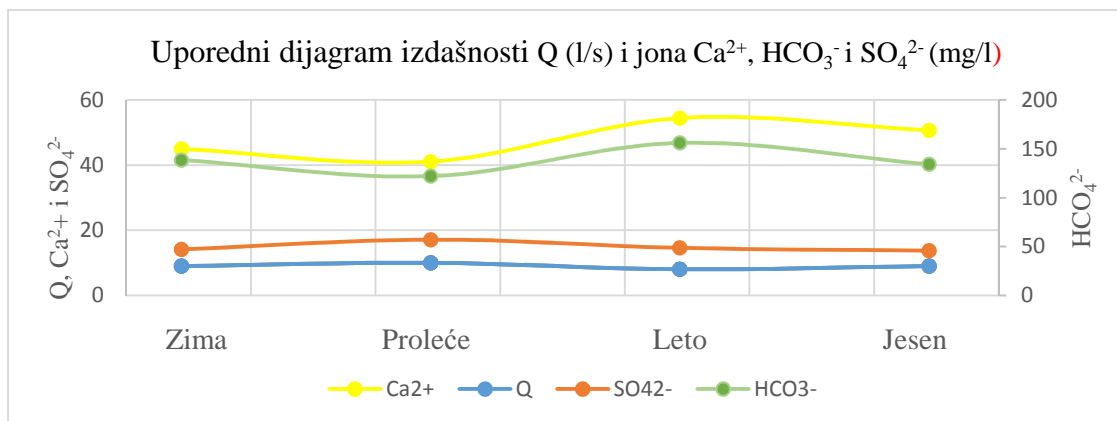
Poređenjem proticaja sa jonima Ca^{2+} i HCO_3^- i SO_4^{2-} na Belosavcu i Belosavcu 2, uočava se drugačija zavisnost, odnosno sa povećanjem proticaja, povećava se i sadržaj SO_4^{2-} , dok sadržaj Ca^{2+} i HCO_3^- opada, i obrnuto (slike 7.43. i 7.44.). Porast sadržaja sulfata, a manjih koncentracija kalcijuma i hidrokarbonata sa povećanjem izdašnosti.



Slika 7.43. Uporedni dijagram izdašnosti Q (l/s) i jona Ca^{2+} i HCO_3^- (mg/l) na vrelu Belsavac

Tabela 98. Jonski sastav u vodi vrela Belosavac 2

Belosavac 2	mg/L								
	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Zima	45.02	0.8125	1.84	1.849	0.0289	1.2271	4.8776	14.1141	138.5208
Proleće	41.07	0.7343	1.572	1.389	0.04	1.1262	3.2189	17.1194	122
Leto	54.46	0.8772	1.994	2.098	0.018	1.4608	5.4175	14.5799	156.0583
Jesen	50.74	0.8749	1.825	1.772	0.039	1.176	5.7325	13.7128	134.2



Slika 7.44. Uporedni dijagram izdašnosti Q (l/s) i jona Ca²⁺, HCO₃⁻ i SO₄²⁻ (mg/l) na vrelu Belosavac 2

Na kraju se može izvesti zaključak da vode sistema S1 (Mlava, Belosavac i Belosavac 2), imaju razvijene sisteme kanala u vertikalnom profilu, sa dubokom sifonalnom cirkulacijom. Mlava koja se nalazi najistočnije ima starost vode od 6 godina, dok vode na pojavama izvorišne zone Belosavac, imaju veće starosti (12.5 i 26.6 godina), što ukazuje na različito zaleganje kanala u dubinu stenske mase. Najveća dobijena starost voda vrela Mlave se odnosi na kanale kategorije (kanali t₂), odnosno na znatno manje kanale i pukotine, kojima se odvija usporene cirkulacija u okviru celokupnog sistema. Kao što se može videti i sa slike 7.23., za glavne kanale (kanali t₁) je vezana brza cirkulacija i propagacija talasa nakon padavina i topljenja snegova, čije dominantno prihranjivanje u recesionom periodu kasnije preuzimaju kanali t₂. Analizom starosti voda vrela Mlave se pretpostavlja da ispod glavnih kanala leži čitav niz znatno manjih provodnika, koji upravo odražavaju gore prikazanu usporenu cirkulaciju (slika 7.23.).

Za razliku od vrela Mlave, vrela Belosavac i Belosavac 2 imaju znatno usporeniju cirkulaciju, koja svedoči o značajnom dubljem razviću karstifikacije. Na slici 7.23. je shematski prikazano razviće kanala kroz 3 kategorije t₁, t₂ i t₃, koji najbolje oslikavaju sve podatke koji su dobijeni gore prikazanim istraživanjima. Iako različite starosti, fizičko-hemijske i izotopske karakteristike podzemnih voda ukazuju da se verovatno radi o vodama formiranim u okviru istog sistema, odnosno da pored lokacijske pripadnosti, ovaj sistem ima i zajedničke vode, koje provode različito vreme u podzemlju, odražavajući drugačije hidrogeohemijske uslove. Pored razvića kanala sa dubokom cirkulacijom, u okviru ovog sistema razvijeni su i kanali koji pliće zaležu i spajaju se sa

kanalima duboke cirkulacije, a koji konstantno sprovode u sistem mladu vodu. Ovaj “miks” je posebno izražen u vodama vrela Mlave i Belosavca 2 (slika 7.23.).

Sistem S2: Termalni izvor u Suvom Dolu i Krepoljinska banjica

Pojave sistema S2 se takođe nalaze na severnom obodu Beljanice i predstavljaju vode duboke cirkulacije sa subtermalnim karakterom.

Količine voda koje su isticale u periodu istraživanja veće su na subtermalnom izvoru u Suvom Dolu i kreću se od 12 do 22 l/s, dok na Krepoljinskoj banjici iz razbijene izvorišne zone ističe konstantno 7.2 l/s. Kako količine voda koje ističu ne variraju značajnije, vrednosti fizičko-hemijskih parametara vode nisu analizirane posebno u zavisnosti od izdašnosti izvora.

Temperatura vode Krepoljinske banjice je 16 °C i malo varira, dok temperatura subtermalnog izvora u Suvom Dolu iznosi 19.7-20 °C, čineći vode ovog izvora najtoplijim od svih na severnom obodu masiva. Vrednosti pH su veoma slične na oba izvora i kreću se od 7.16 do 7.44, kao i vrednosti elektroprovodljivosti koje se kreću od 516 – 569 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Obzirom da se radi o vodama duboke cirkulacije, vrednosti kiseonika su očekivano niže, pa se na subtermalnom izvoru u Suvom Dolu kreću od 1.7 do 5.3 mg/l, dok su u vodi Krepoljinske banjice vrednosti rastvorenog kiseonika nešto veće i kreću se od 3.3 do 6.4 mg/l. Najveće vrednosti su na oba izvora uočene u prolećnom periodu, reflektujući priliv mlađe vode, odnosno mešanje podzemnih voda. Da se radi o dubokoj cirkulaciji svedoči i podatak o mutnoći vode, radi se o vodama izrazito bistrim, koje su u podzemlju podlegle autopurifikacionim svojstvima sredine. Ovo je naročito slučaj subtermalne vode u Suvom Dolu, čija vrednost konstantno iznosi 0.2 NTU. I vode Krepoljinske banjice su bistre, sa vrednostima ispod 1 NTU, izuzev prolećnog perioda kada je zabeležena mutnoća od 1.2 NTU, ukazujući na povećan priliv pripovršinskih voda.

Vrednosti proticaja i fizičko-hemijskih karakteristika voda subtermalnog izvora u Suvom Dolu i Krepoljinske banjice su prikazane u tabelama 99 i 100.

Tabela 99. Rezultati monitoringa podzemnih voda subtermalnog izvora u Suvom Dolu

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost (µs/cm)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	18	19.7	7.44	554	1.7	0.2
Proleće	22	20	7.2	569	5.3	0.18
Leto	12	19.8	7.17	548	2.35	0.2
Jesen	15	19.7	7.2	548	2.12	0.22

Tabela 100. Rezultati monitoringa podzemnih voda Krepoljinske banjice

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost (µs/cm)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	7.2	16.7	7.3	538	4.1	0.8
Proleće	7.2	16.9	7.16	516	6.4	1.2
Leto	7.2	16.8	7.2	547	6.1	0.67
Jesen	7.2	16.5	7	544	3.3	0.95

Kako bi se utvrdila starost voda, odnosno definisalo vreme koje voda provede od ulaza do izlaza iz sistema, izvršeno je uzorkovanje vode za utvrđivanje sadržaja radioaktivnih izotopa vodonika i ugljenika ^3H i ^{14}C , na osnovu kojih su proračunate starosti voda. Vrednost tricijuma ^3H u vodi subtermalnog izvora Suvog Dola iznosi 1.63 TJ (tabela 101), dok u vodi Krepoljinske banjice iznosi 2.77 TJ (tabela 102). Radi se verovatno o mešavini submodernih (polu starih) voda sa skorije infiltriranom vodom u podzemlje. Vrednost tricijuma je niža na subtermalnog izvora u Suvom Dolu, reflektujući da su i mlađe vode, odnosno skorije infiltrirane vode u podzemlje Suvog Dola, starije od skorije infiltriranih voda Krepoljinske banjice.

Tabela 101. Sadržaj tricijuma subtermalnog izvora u Suvom Dolu

Radioaktivni izotopi	^3H (TU)	(+/-) 1 sigma
Termalni izvor u Suvom Dolu	1.63	0.05

Tabela 102. Sadržaj tricijuma Krepoljinske banjice

Radioaktivni izotopi	^3H (TU)	(+/-) 1 sigma
Krepoljinska banjica	2.77	0.13

Sadržaj ugljenika ^{14}C u vodi subtermalnog izvora u Suvom Dolu iznosi 23.65 pMC (tabela 103), dok u vodi Krepoljinske banjice iznosi 35.61 (tabela 104). Uvrštavanjem vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ u vodi i $\delta^{13}\text{C}$ u matičnoj steni za Kučajsko-beljanički masiv, dobija se da starost vode subtermalnog izvora u Suvom Dolu iznosi 5 979 godina, dok starost vode Krepoljinske banjice iznosi 2 171 godina. Ovako velika starost vode potvrđuje dugačak boravak vode u podzemlju i duboko zaleganje karstnih kanala (sistem sa dubokom ascendentnom cirkulacijom). Obzirom da je u ovako staroj vodi detektovan sadržaj tricijuma, izvodi se zaključak o postojanju zonalnosti u vertikalnom profilu i mešanju voda starih nekoliko hiljada godina sa vodama starim nekoliko desetina godina.

Tabela 103. Sadržaj ugljenika ^{14}C i procenjena starost voda subtermalnog izvora u Suvom Dolu

Radioaktivni izotopi	^{14}C (pMC)	(+/-) 1 sigma	Sadržaj $\delta^{13}\text{C}$ u vodi u periodu uzorkovanja ‰	^{14}C starost (godine) ($^{14}\text{C}_{\text{inic}}=100$ pMC) ($\delta^{13}\text{C}$ u vodi i steni je uzet u obzir)
Termalni izvor u Suvom Dolu	23.65	0.12	-6.61	5 979

Tabela 104. Sadržaj ugljenika ^{14}C i procenjena starost voda Krepoljinske banjice

Radioaktivni izotopi	^{14}C (pMC)	(+/-) 1 sigma	Sadržaj $\delta^{13}\text{C}$ u vodi u periodu uzorkovanja ‰	^{14}C starost (godine) ($^{14}\text{C}_{\text{inic}}=100$ pMC) ($\delta^{13}\text{C}$ u vodi i steni je uzet u obzir)
Krepoljinska banjica	35.61	0.14	-6.21	2 171

Vrednost sadržaja stabilnog ugljenika $\delta^{13}\text{C}$ je dosta nizak, što potvrđuje starost i prolongirani kontakt vode i matične stene. Kod subtermalnog vrela u Suvom Dolu vrednost $\delta^{13}\text{C}$ se kreće od -6.61 do -7.86 ‰, dok se kod Krepoljinske banjice ova vrednost kreće od -5.91 do -6.87 ‰ (tabele 105 i 106). Zbog veće starosti vode na subtermalnog izvora u Suvom Dolu trebalo bi da su, usled dužeg boravka vode u podzemlju, vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ niže u odnosu na vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ Krepoljinske banjice. Međutim, utvrđivanjem sadržaja $\delta^{13}\text{C}$ u matičnoj steni na lokacijama, utvrđeno je da sadržaj $\delta^{13}\text{C}$ u steni kod subtermalnog izvora u Suvom Dolu viši u odnosu na sadržaj u steni kod Krepoljinske banjice (2.29 ‰, dok je u steni kod Krepoljinske banjice 1.75 ‰).

Upravo ovaj podatak opravdava veće vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ u vodi subtermalnog izvora u Suvom Dolu.

Vrednosti stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD su niže u vodama subtermalnog izvora u Suvom Dolu i kreću se za $\delta^{18}\text{O}$ od -9.35 do -10.52 ‰ i od -61.1 do -70.57 ‰ za δD (tabela 105), dok se u vodama Krepoljinske banjice kreću od -9.73 do -10.58 ‰ za $\delta^{18}\text{O}$ i od -63.97 do -72.26 ‰ za δD (tabela 106). Razlike ukazuju na veće starosti voda, a na osnovu dijagrama zavisnosti vrednosti stabilnih izotopa za ove dve pojave i LIML, uočava se veza ova dva sistema, odnosno voda formiranih u okviru ova dva sistema (slika 7.45.).

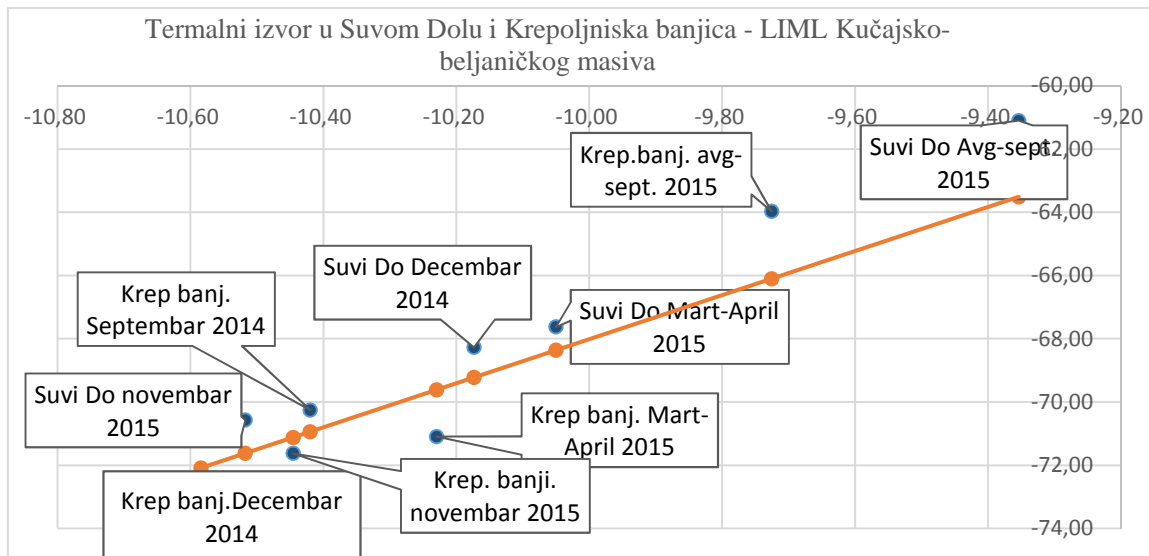
Tabela 105. Sadržaj stabilnih izotopa u vodi subtermalnog izvora u Suvom Dolu

Ribare	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Zima	-7.86	-68.27	-10.17
Proleće	-7.09	-67.62	-10.05
Leto	-6.61	-61.10	-9.35
Jesen	-7.95	-70.57	-10.52

Tabela 106. Sadržaj stabilnih izotopa u vodi Krepoljinske banjice

Krepoljinska banjica	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Septembar 2014	-	-70.25	-10.42
Zima	-6.87	-72.26	-10.58
Proleće	-5.91	-71.09	-10.23
Leto	-6.21	-63.97	-9.73
Jesen	-6.10	-71.62	-10.45

Subtermalni izvori Krepoljinska banjica i izvor u Suvom Dolu imaju vrednosti stabilnih izotopa koncentrisanih u levom delu lokalne meteorske linije, što ukazuje da su vode stare, ali da ima i priliva svežih atmosferskih voda. Vrednosti oba vrela iz septembra 2015. godine padaju desno iznad linije i nalaze se na nešto većoj udaljenosti, što može da ukaže da su ove vode bile u interakciji sa H_2S ili u kontaktu sa silikatima (vidi sliku 5.11.). Obzirom da se radi o minimumu i da su za ovaj period utvrđene starosti voda ovih izvora, izvodi se zaključak da je u periodu minimuma, kakav je bio u septembru 2015. godine, isključen uticaj mlađih voda, odnosno da su na izvorima isticale vode iz zone veoma duboke cirkulacije.



Slika 7.45. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u subtermalnom izvoru u Suvom Dolu i Krepoljinskoj banjici

U pogledu jonskog sastava voda sistema S2, u vodama dominiraju joni HCO_3^- i Ca^{2+} , a takođe se javljaju i povišene vrednosti SO_4^{2-} , Cl^- , Mg^{2+} i Na^+ , a u Krepoljinskoj banjici i K^+ .

Sadržaj Ca^{2+} u vodi subtermalnog izvora u Suvom Dolu se kreće od 32.45 do 50.42 mg/l, a sadržaj HCO_3^- od 128.15 do 204.14 mg/l (tabela 107). U Krepoljinskoj banjici se vrednosti Ca^{2+} u vodi kreću od 27.25 do 43.64 mg/l, dok se vrednosti HCO_3^- kreću od 120.47 do 163.78 mg/l (tabela 108), što je niže u odnosu na izvor u Suvom Dolu. Vrednosti Mg^{2+} i Na^+ su povišene, pa se u vodi Suvog Dola kreću od 7.6 - 7.48 mg/l za Mg^{2+} i 4.65 - 5.5 mg/l za Na^+ , dok se u vodi Krepoljinske banjice kreću od 5.44 - 5.9 mg/l za Mg^{2+} i 5.08 - 5.56 mg/l za Na^+ .

Pored Mg^{2+} i Na^+ , u Krepoljinskoj banjici se javlja i nešto povišena vrednost kalijuma (do 1.13 mg/l), a što ukazuje na različite tipove stena kroz koje cirkulišu vode subtermalnog izvora u Suvom Dolu i Krepoljinske banjice, kao i na drugačije hidrogeohemijske uslove koji vladaju u podzemlju.

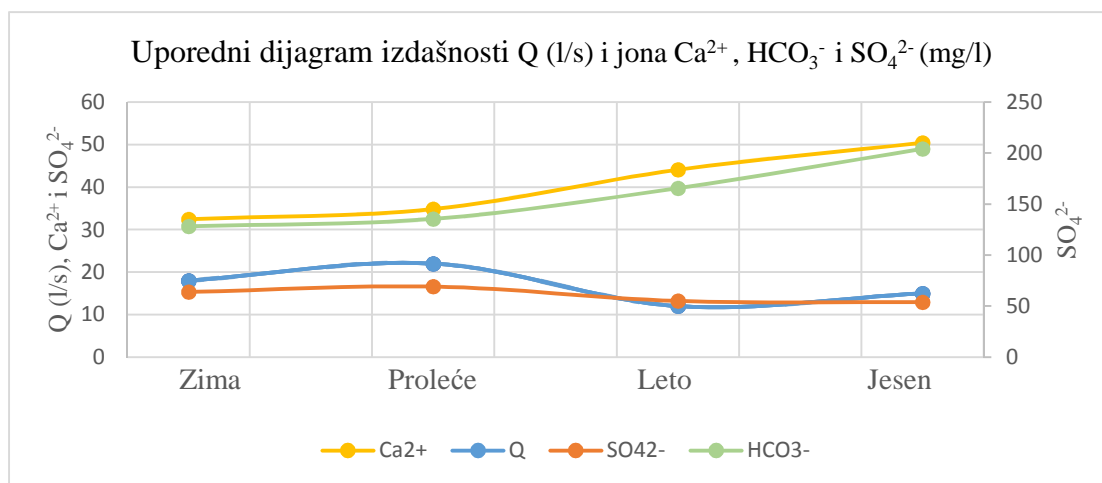
Tabela 107. Jonski sastav voda termalnog izvora u Suvom Dolu

Ribare	mg/L								
	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Zima	32.45	0.6747	6.604	4.652	0.0687	2.6125	3.4759	15.3058	128.1508
Proleće	34.83	0.6973	6.604	4.872	0.07	2.7753	5.0308	16.5925	135.4708
Leto	44.08	0.8173	7.321	5.502	0.0908	2.965	4.799	13.2039	165.6658
Jesen	50.42	0.8547	7.488	5.233	0.0818	3.0936	4.3285	12.9123	204.1467

Tabela 108. Jonski sastav voda Krepoljinske banjice

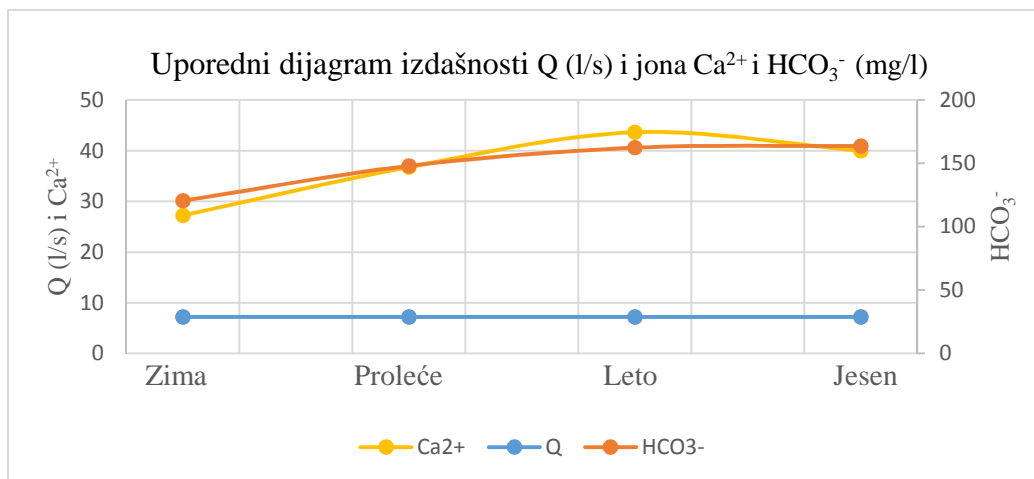
Krepoljinska banjica	mg/L								
	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Zima	27.25	1.03	5.574	5.417	0.0576	2.0256	5.1741	8.0642	120.475
Proleće	36.77	1.13	5.9	5.459	0.0556	2.2573	5.7185	8.3171	148.0267
Leto	43.64	1.11	5.791	5.562	0.0644	2.036	4.8482	8.2661	162.3617
Jesen	40.01	1.029	5.448	5.088	0.0622	2.0549	5.31	9.3344	163.785

Uporedni dijagram izdašnosti i sadržaja pojedinih jona, pokazuje da se sa povećanjem kapaciteta na subtermalnom izvoru u Suvom Dolu smanjuju vrednosti Ca²⁺, HCO₃⁻ i SO₄²⁻, dok sa smanjenjem proticaja ove vrednosti rastu (slika 7.46.).



Slika 7.46. Uporedni dijagram izdašnosti i jona Ca²⁺, HCO₃⁻ i SO₄²⁻ (mg/l) na subtermalnom vrelu u Suvom Dolu

Uporedni dijagram za Krepoljinsku banjicu pokazuje rast Ca²⁺ i HCO₃⁻ vrednosti sezonski, pa se tako maksimalne koncentracije javljaju u letnjem periodu (slika 7.47.), kada preovlađuje isticanje starih voda. Sadržaj sulfata u vodi Krepoljinske banjice je prilično ujednačen, a vrednosti su znatno niže u odnosu na vode u Suvom Dolu.



Slika 7.47. Uporedni dijagram izdašnosti i jona Ca²⁺ i HCO₃⁻ (mg/l) na Krepoljinskoj banjici

Sistem S2 odlikuje se vodama veoma velike starosti, sa fizičko-hemijskim i izotopskim karakteristikama koje ukazuju da se radi o istim vodama, odnosno vodama formiranim u okviru istog sistema, gde pored lokacijske pripadnosti, sistem ima i zajedničke vode, koje provode različito vreme u podzemlju, odražavajući kontakte sa različitim tipovima stena, uzrokujući drugačije hidrogeohemijske uslove i jonski sastav. Mešanje starih voda sa mlađim vodama uočljivo je kod Krepoljinske banjice, dok kod subtermalnog izvora u Suvom Dolu mešanje nema izraženi karakter.

Iako vode od istočne prema zapadnoj strani oboda Beljanice imaju sve veću starost, za očekivanje je bilo da vode Krepoljinske banjice imaju i najveće starosti. Međutim, kako je rezultatima dobijena najveća starost vode na subtermalnog izvora u Suvom Dolu, kao i da jonski sastav voda ukazuje na kontakte sa stenama različitih tipova, postavlja se pitanje položaja paleozojskog jezgra u dubljim slojevima i mogućnosti njegovog položaja kao barijere kretanju voda subtermalnog izvora prema vodama Krepoljinske banjice.

U zoni Suvog Dola i u zoni Krepoljina, stvoreni su uslovi za formiranje dubljih karstnih kanala i duži boravak vode u podzemlju, ali je postojanje dvostruke barijere, odnosno barijere na severu predstavljene neogenim žagubičkim basenom i prema zapadu beljaničkim jezgrom paleozojskih škriljaca, uslovilo da vode u Suvom dolu zaležu znatno dublje u podzemlje i imaju veću starost.

Sistem Milanovačka banjica

Vode Milanovačke banjice imaju vrlo specifične fizičko-hemijske, izotopske i jonske karakteristike, iz kog razloga su svrstane u poseban sistem. Količine voda koje se dreniraju na ovom izvoru su veoma male i iznose od 3.72 do 5.2 l/s. Temperatura vode je konstantna i kreće se od 22.1 – 22.5 °C, najniže vrednosti zabeležene su u prolećnom periodu, najverovatnije usled priliva mlađih voda. Niža pH vrednost od 7.1 i jako visoka elektroprovodljivost ukazuju na vode koje verovatno nisu uopšte formirane u okviru karstne izdani. Elektroprovodljivost voda se kreće od 714 (takođe u periodu velikih voda), do čak 802 $\mu\text{s/cm}$, zabeleženih u jesenjem periodu. Kiseonik je nizak i kreće se od 2.03 do 6.2 mg/l, što ukazuje na duži boravak vode u podzemlju. Mutnoća vode je konstantno povišena (3.68 – 6.10 NTU), što može da bude posledica spoljnih uticaja u zabarenoj zoni isticanja. Rezultati proticaja i fizičko-hemijskih karakteristika voda prikazani su u tabeli 109.

Tabela 109. Rezultati monitoringa podzemnih voda Milanovačke banjice

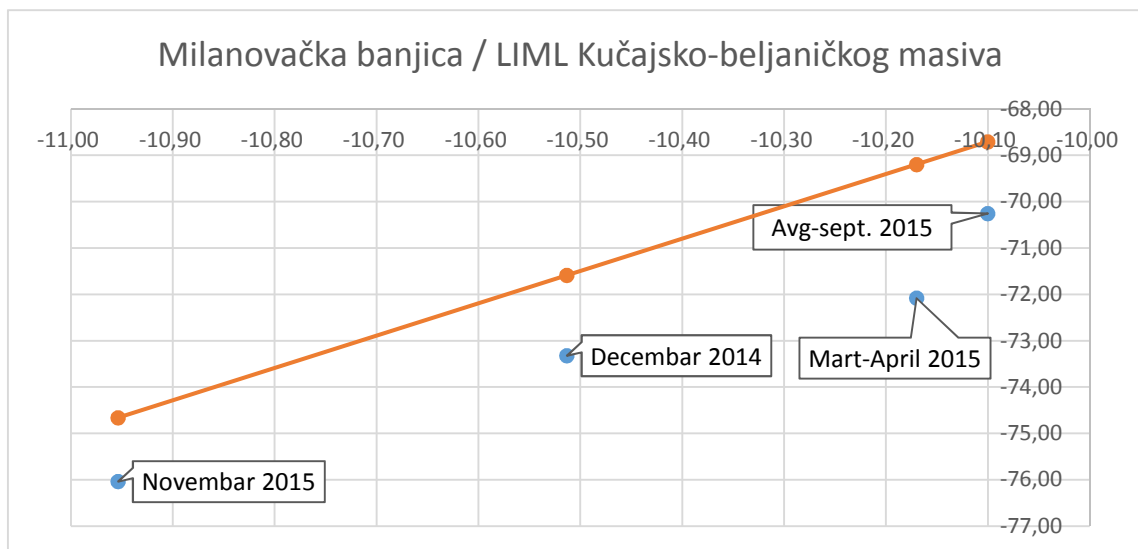
Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost ($\mu\text{s/cm}$)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	3.85	22.3	7.18	789	3.9	4.8
Proleće	5.2	22.1	7.18	714	6.2	5.17
Leto	3.72	22.5	7.1	770	3.25	6.10
Jesen	3.88	22.3	7.1	802	2.03	3.68

Sadržaj stabilnog ugljenika $\delta^{13}\text{C}$ kreće se od -4.72 ‰ (letnji period) do 6.19 ‰ (tabela 110), ukazujući na prolongirani kontakt vode sa stenom. Najniža vrednost je zabeležena u letnjem periodu, te se izvodi zaključak da je upravo tada na izvoru isticala voda najveće starosti. Sadržaj $\delta^{18}\text{O}$ je vrlo ujednačen i varira između -10.10 i -10.95 ‰, dok sadržaj δD varira i kreće se od -70.25 do 76.04 ‰ (tabela 110).

Tabela 110. Sadržaj stabilnih izotopa u vodi Milanovačke banjice

Milanovačka banjica	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Zima	-6.19	-73.32	-10.51
Proleće	-5.90	-72.08	-10.17
Leto	-4.72	-70.25	-10.10
Jesen	-4.93	-76.04	-10.95

Plotovanjem rezultata na dijagram sa lokalnom meteorskom linijom, uočava se da sve vrednosti padaju ispod lokalne meteorske linije (slika 7.48.), a što na osnovu slike 5.11., ukazuje da je na izotopski sastav vode uticaj imala temperaturna izmena sa stenom, kao i da je voda bila u prolongiranom kontaktu sa stenskom masom.



Slika 7.48. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u Milanovačkoj banjici

U cilju utvrđivanja starosti voda Milanovačke banjice, u vodi je ispitan sadržaj tricijuma i ugljenika ^{14}C . Na osnovu tricijuma koji iznosi 1.95 TJ (tabela 111) se izvodi zaključak da se radi o vodama koje predstavljaju mešavinu submodernih (polu starih) voda, sa skorije infiltriranom vodom u podzemlje.

Tabela 111. Sadržaj tricijuma u vodi Milanovačke banjice

Radioaktivni izotopi	^3H (TJ)	(+/-) 1 sigma
Milanovačka banjica	1.95	0.12

Sadržaj ugljenika ^{14}C u vodi Milanovačke banjice iznosi 49.92 pMC (tabela 112). Uvrštavanjem vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ u vodi i $\delta^{13}\text{C}$ u matičnoj steni za Kučajsko-beljanički masiv, dobija se negativna vrednost starosti podzemnih voda. Naime, sistem Milanovačke banjice predstavlja jedinstven sistem, za koji korekcionni modeli korišćeni za proračun starosti voda Kučajsko-beljaničkog masiva nisu primenjivi. Generalno, obzirom da se

radi o veoma specifičnom hidrogeohemijskom sastavu, kao i izotopskim karakteristikama voda, pretpostavlja se da se radi o znatno većoj starosti, od one koja se može detektovati metodom ^{14}C .

Tabela 112. Sadržaj ugljenika ^{14}C i procenjena starost voda Milanovačke banjice

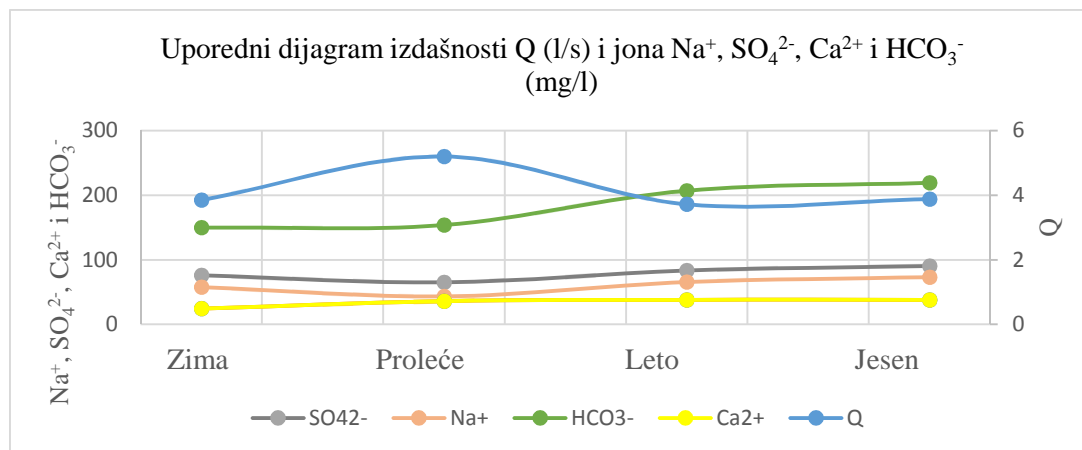
Radioaktivni izotopi	^{14}C (pMC)	(+/-) 1 sigma	^{14}C starost (godine) ($^{14}\text{C}_{\text{inic}}=100$ pMC)	^{14}C starost (godine) ($^{14}\text{C}_{\text{inic}}=100$ pMC) ($\delta^{13}\text{C}$ u vodi i steni je uzet u obzir)
Milanovačka banjica	49.92	0.13	5 743	Moderne vode

Jonski sastav voda Milanovačke banjice je veoma specifičan (tabela 113), obzirom da dominira sadržaj Na^+ i SO_4^{2-} , a zatim Ca^{2+} i HCO_3^- . Sadržaj SO_4^{2-} kreće se od 65.115 do 90.581 mg/l, dok se sadržaj Na^+ kreće od 43.45 do 73.28 mg/l. Sadržaj Ca^{2+} je nešto niži i iznosi 24.29 do 38.14 mg/l, dok je sadržaj HCO_3^- takođe visok i kreće se od 149.90 do 219.142 mg/l. Pored ovih veoma povišenih koncentracija jona, u vodi Milanovačke banjice se javljaju i hloridi sa vrednošću od 13.054 do 22.995 mg/l, kao i vrednosti Mg^{2+} (najviša vrednost 5.905 mg/l), K^+ (4.449 mg/l) i nešto malo povišene koncentracije F^- (1.63 mg/l).

Tabela 113. Jonski sastav voda Milanovačke banjice

Milanovačka banjica	mg/L								
	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Na^+	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Zima	24.29	3.673	4.905	57.81	1.211	17.725	3.752	75.935	149.907
Proleće	36.16	3.039	4.455	43.45	0.75	13.054	5.018	65.115	153.872
Leto	38.09	4.265	5.494	65.48	1.452	20.369	2.832	83.389	207.095
Jesen	38.14	4.449	5.905	73.28	1.6393	22.995	2.4015	90.581	219.142

Na osnovu dijagrama zavisnosti uočava se da sve vrednosti Na^+ , SO_4^{2-} , Ca^{2+} i HCO_3^- rastu sa opadanjem izdašnosti izvora, izuzev vrednosti Ca^{2+} u prolećnom periodu, kada usled većeg priliva mladih voda u sistem dolazi do blagog rasta sadržaja Ca^{2+} (slika 7.49).



Slika 7.49. Uporedni dijagram izdašnosti Q (l/s) i jona Na⁺, SO₄²⁻, Ca²⁺ i HCO₃⁻ (mg/l)
Milanovačke banjice

Sistem Milanovačke banjice predstavlja jedinstven sistem sa genezom podzemnih voda koja se razlikuje od svih drugih pojava, obzirom da se samo na ovoj lokaciji javljaju sulfatno-natrijumske vode. S obzirom na proboje dacita u ovoj zoni, pretpostavlja da se da su ove stene imale dominantan uticaj na ovakav hemijski sastav voda.

7.2.4. Rezultati istraživanja sistema sa ascendentno-gravitacionim tipom cirkulacije

Sistem Krupajske pojave

Sistem Krupajske pojave predstavlja jedan od najsloženijih karstnih sistema razvijenih u okviru Kučajsko-beljaničkog masiva, i kao takav je od velikog značaja za proučavanje geneze karstnih voda i dubine zaleganja karstnih kanala sa hladnom, subtermalnom i termalnom vodom.

Najveće količine voda konstantno ističu na Krupajskom vrelu (u periodima uzorkovanja izmerene su izdašnosti od 410 do 2111 l/s). Svrstano je u grupu gravitaciono – ascendentnih sistema. Iz bušotine sa samoizlivom ističe subtermalna voda, čiji proticaj ne varira i iznosi 5 l/s, kao i termalni izvor koji ističe na površinu dosta ujednačenim režimom od 2 – 2.5 l/s.

Temperature vode su ujednačene i rastu sa dubinom, pa se tako na Krupajskom vrelu temperatura vode kreće od 10 do 11.4 °C, izražavajući sezonski karakter. Najviša temperatura vode od 11.4 °C je zabeležena u letnjem periodu, što može biti posledica

zagrevanja ujezerene vode usled minimuma i visokih spoljašnjih temperatura vazduha. Temperatura vode iz bušotine konstantno iznosi oko 18 °C (18.4 – 18.7 °C), i predstavlja mešavinu hladnih voda i termalnih voda, čija se temperatura sa dubinom povećava i do 25 °C na dnu bušotine (vidi poglavlje 7.5). Temperatura vode na termalnom izvoru kreće se od 25.9 do 26.6 °C, pri čemu je niža temperatura konstatovana u prolećnom periodu, indikovajući određeni prodor hladne i mlade vode u zoni dreniranja termalne vode.

Vrednosti pH se takođe menjaju u manjoj meri sa dubinom, pokazujući karakter opadanja. Najviše vrednosti zabeležene na Krupajskom vrelu iznose 7.44, na bušotini 7.3, dok na termalnom izvoru najviša zabeležena pH vrednost iznosi 7.16. Elektroprovodljivost suprotno pH vrednosti raste sa dubinom, ukazujući na bogaćenje mineralnim materijama sa porastom dubine i temperature, pa se na Krupajskom vrelu kreće od 505 do 526 $\mu\text{s/cm}$, na bušotini od 523 do 543, dok se na termalnom izvoru kreću od 543 do 560 $\mu\text{s/cm}$.

Rastvoreni kiseonik najviši je u Krupajskom vrelu u prolećnom periodu, gde iznosi 10.26 mg/l, što je posledica turbulentnog režima i doticanja sveže infiltriranih voda u sistem. Kiseonik sa dubinom opada, pa u bušotini vrednosti variraju od 4.3 do 7.45 mg/l, dok su vrednosti u termalnom izvoru, usled dugog boravka u podzemlju, konstantno niske i kreću se od 1.13 do 2.61 mg/l. Nešto povišena mutnoća vode od maksimalnih 1.74 NTU zabeležena je na Krupajskom vrelu u jesenjem periodu, a ovako povišena vrednost, najverovatnije usled jakih jesenjih kiša i spiranja površinskih slojeva, odrazila se i na vode sa većih dubina, pa tako u vodi bušotine iznosi 1.59 NTU, dok na termalnom izvoru iznosi 1.6 NTU. Obzirom na istu količinu suspendovanih čestica u vodi na bušotini i termalnom izvoru, može se zaključiti da se u zoni do 400 metara, koliko je duboka bušotina, mešaju vode, odnosno prodiru u izlazni kanal duboke termalne vode. Generalno, na osnovu rezultata voda sistema Krupajskih pojava se uviđa da su sve vrednosti uglavnom ustaljene, izuzev izdašnosti Krupajskog vrela, koja varira sezonski. Fizičko-hemijske karakteristike podzemnih voda Krupajskih pojava prikazane su u tabelama 114, 115, 116.

Tabela 114. Rezultati monitoringa podzemnih voda Krupajskog vrela

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost (µs/cm)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	1712	10	7.4	512	9.9	1.02
Proleće	2111	10.2	7.44	526	10.26	0.72
Leto	410	11.4	7.3	516	9.3	1.23
Jesen	485	10.8	7.4	505	5.8	1.74

Tabela 115. Rezultati monitoringa podzemnih voda bušotine na Krupaji

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost (µs/cm)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	5	18.4	7.2	542	6.4	1.01
Proleće	5	18.7	7.3	543	7.45	0.61
Leto	5	18.4	7.24	531	6.39	0.61
Jesen	5	18.6	7.24	523	4.3	1.59

Tabela 116. Rezultati monitoringa podzemnih voda termalnog izvora na Krupaji

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost (µs/cm)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	2	26.2	7.16	551	1.7	0.8
Proleće	2	25.9	7.2	560	2.61	0.38
Leto	2	26.6	7.15	544	1.54	0.29
Jesen	2	26.6	7.14	543	1.13	1.60

Vrednosti stabilnog izotopa $\delta^{13}\text{C}$ opadaju sa dubinom, cirkulacije, ukazujući na starost vode i duži kontakt sa matičnom stenom. Sadržaj ugljenika se na Krupajskom vrelu kreće od -8.20 do -10.31 ‰ (tabela 117), takođe ukazujući na duži boravak vode u podzemlju, dok se u vodi bušotine sadržaj izotopa ugljenika kreće od -5.91 do -6.81‰ (tabela 118), a na termalnom izvoru svega -2.69 do -5.32 ‰ (tabela 119). Veće vrednosti u termalnom izvoru zabeležene su u prolećnom periodu, što ukazuje na priliv i mešanje sa mlađom vodom, ali ne sveže površinskom, već vodom koja je takođe u podzemlju provela duži vremenski period i sadržaj stabilnog izotopa ugljenika u interakciji sa stenom spustila na -5.32 ‰.

Sadržaj stabilnih izotopa kiseonika i deuterijuma, takođe opada sa vremenom boravka vode u podzemlju, što je posledica izotopske frakcionacije, koja se odvija u

prolongiranom kontaktu sa stenom. Najviše vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ na Krupajskom vrelu iznose -11.04 ‰, na bušotini -10.88 ‰, a na termalnom izvoru -10.28 ‰, što ukazuje na postepeno opadanje sadržaja stabilnog izotopa kiseonika sa dubinom cirkulacije. Takođe i vrednost δD opada sa dubinom, pa maksimalni sadržaj ovog izotopa na Krupajskom vrelu iznosi -76.43 ‰, u vodi bušotine -74.33 ‰, dok na termalnom izvoru maksimalni sadržaj ugljenika iznosi -73.01‰ (tabele 117, 118 i 119).

Tabela 117. Sadržaj stabilnih izotopa u vodi Krupajskog vrela

Krupajsko vrelo	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Septembar 2014	-	-72.17	-11.04
Zima	-10.31	-72.27	-10.44
Proleće	-8.20	-71.94	-10.21
Leto	-8.71	-72.79	-10.37
Jesen	-8.48	-76.43	-10.64

Tabela 118. Sadržaj stabilnih izotopa voda bušotine na Krupaji

Krupaja bušotina	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Septembar 2014	-	-71.97	-10.88
Zima	-6.81	-69.47	-10.75
Proleće	-6.45	-69.01	-10.62
Leto	-5.91	-68.42	-9.96
Jesen	-6.24	-74.33	-10.14

Tabela 119. Sadržaj stabilnih izotopa termalnog izvora na Krupaji

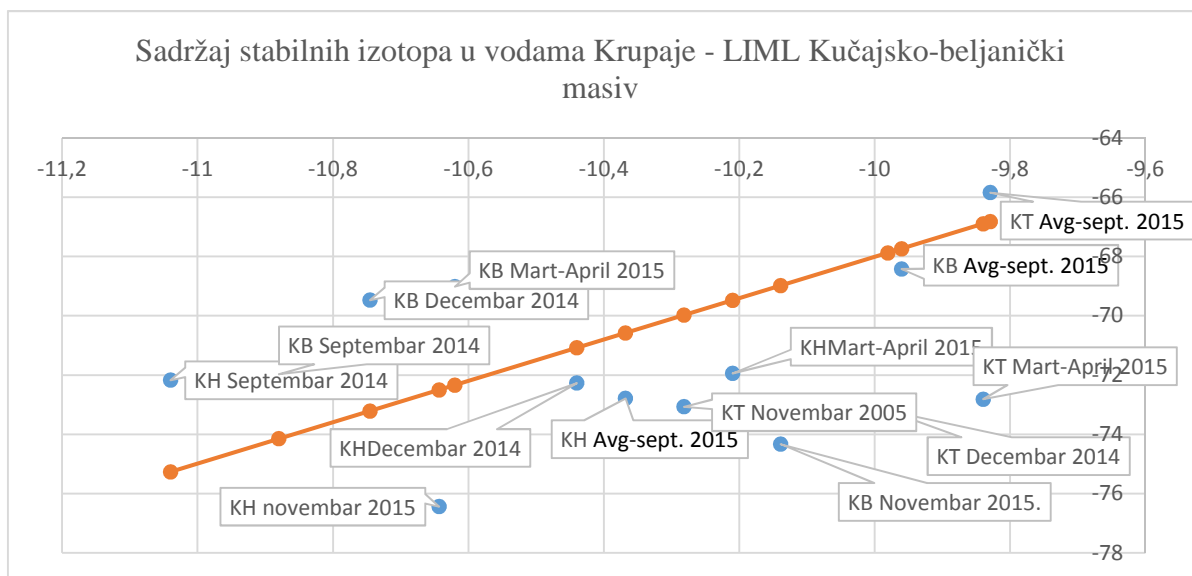
Term. izvor Krupaja	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Zima	-3.81	-73.20	-9.98
Proleće	-5.32	-72.81	-9.84
Leto	-3.11	-65.84	-9.83
Jesen	-2.69	-73.07	-10.28

Sadržaj stabilnih izotopa u $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodama Krupajskih pojava ukazuje na uticaj padavina i veze površinskih i podzemnih voda (slika 7.50.), izuzev uzoraka termalnih

voda koje padaju ispod LIML, ukazujući na dug boravak vode u podzemlju i slabu vezu sa atmosferskim padavinama.

Takođe, i najveći deo rezultata Krupajskog vrela pada ispod LIML, izuzev uzorka u septembru mesecu 2014., koji pada iznad lokalne meteorske linije, ukazujući na odloženi uticaj jakih padavina iz prolećnog perioda, a što predstavlja dugo pražnjenje sistema nakon najvećeg maksimuma zabeleženog na Kučajsko-beljaničkom masivu u maju 2014. godine. Ostali uzorci padaju blizu lokalne meteorske linije, ukazujući na vezu sa atmosferskom vodom, ali takođe se nalaze ispod LIML, što znači da je voda ipak provela više vremena u podzemlju, reflektujući sekundarnu frakcionaciju.

Bušotina na Krupajskom vrelu reflektuje sadržaj atmosferskih padavina, pa tako vrednosti iz septembra i decembra 2014. godine, padaju iznad LIML, što može da ukaže na odloženi uticaj velikih voda iz 2014. godine na vode koje zaležu dublje u podzemlje, ali može i da ukaže na jak prodor svežih atmosferskih voda u bušotinu, iz kanala koji generalno nisu u hidrauličkoj vezi sa Krupajskim vrelom, što je i slučaj sa uzorkom iz aprila 2015. godine. Uzorak iz bušotine iz letnjeg i jesenjeg perioda 2015. godine, pokazuje veliku starost, odnosno isključuje priliv svežih voda, a što može biti posledica manjih količina voda infiltriranih u podzemlje u prolećnom periodu 2015. godine (razlika u maksimumima 2014. i 2015. godine), ili zbog značajne prethodne zasićenosti sistema (iz 2014. godine).



Slika 7.50. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodama Krupajskih pojava

Za potrebe utvrđivanja starosti podzemnih voda sistema Krupajskih pojava, izvršeno je uzorkovanje vode za izradu analiza ^3H , $^3\text{H}/^3\text{He}$ i ^{14}C . Rezultati sadržaja tricijuma prikazani su u tabelama 120, 121 i 122. Vrednosti tricijuma opadaju sa dubinom i najveće su na Krupajskom vrelu, gde se kreću od 5.64 do 5.7 TJ (tabela 16), što govori da se radi o vodama starim između 5 i 10 godina. Kako bi se utvrdila tačna starost vode na Krupajskom vrelu, sprovedena je preciznija analiza, odnosno izračunata je starost vode izotopskom metodom $^3\text{H}/^3\text{He}$ (tabela 120), na osnovu čijeg rezultata se dobio podatak da starost vode Krupajskog vrela iznosi 26.1 godinu (+/- 0.7 godina). Metodom $^3\text{H}/^3\text{He}$ utvrđena je najveća starost mlade komponente u uzorku vode, koji je isticao u septembru mesecu, što ukazuje da na Krupajskom vrelu u periodu minimuma, odnosno u periodu recesije, glavnim kanalom koji je istražen do dubine od 133 metara, a koji verovatno zaleže i znatno dublje u podzemlje, cirkulišu vode maksimalne starosti od 26.1 godine.

Tabela 120. Sadržaj radioaktivnih izotopa ^3H i $^3\text{H}/^3\text{He}$ u vodi Krupajskog vrela

Sadržaj radioaktivnih izotopa	^3H (TJ)	(+/-) 1 sigma	$^3\text{H}/^3\text{He}$ starost (godine)	Neposredna starost (godine)
Krupajsko vrelo	5.64	0.17	26.1	0.7
	5.7	0.3		

U periodu velikih voda, ovim kanalom primarno ističu mlade, sveže infiltrirane vode, koje usled velikih hidrostatičkih pritisaka, potiskuju stariju vodu, ali tada ističu i određene količine starih voda, što se vidi i na osnovu dosta ujednačenih temperatura voda i ostalih fizičko-hemijskih parametara.

Sadržaj plemenitih gasova u vodi Krupajskog vrela, dao je kao rezultat temperaturne uslove koji su vladali u periodu prihranjivanja podzemnih voda, odnosno temperaturu vazduha od 10.30 °C (tabela 123), što takođe ukazuje da su vode koje su se drenirale u periodu recesije, prihranjene u prolećnom periodu, kada se usled velikih količina voda i pritisaka u sistemu, veliki deo voda infiltrira u dublje kanale, odakle polako cirkuliše prema površini terena.

Tabela 123. Sadržaj plemenitih gasova u vodi Krupajskog vrelo

Plemeniti gasovi	He (ccSTP/g)	Ne (ccSTP/g)	Ar (ccSTP/g)	Kr (ccSTP/g)	Xe (ccSTP/g)	R/Ra	T (°C)	chi2-test
Krupajsko vrelo	1.2738E-07	2.1177E-07	3.8358E-04	8.6267E-08	1.2916E-08	0.650	10.30	0.03

Sadržaj tricijuma u vodi bušotine, kao i u vodi termalnog izvora su znatno niže i iznose 3.9 TJ i samo 1.7 TJ. Ovi sadržaji, na osnovu tabele 16, ukazuju da se radi o mešavini submodernih (polu starih) voda sa skorije infiltriranom vodom u podzemlje.

Tabela 121. Sadržaj tricijuma voda bušotine na Krupaji

Radioaktivni izotopi	³ H (TJ)	(+/-) 1 sigma
Bušotina B-1 na Krupaji	3.9	0.3

Tabela 122. Sadržaj tricijuma termalnog izvora na Krupaji

Radioaktivni izotopi	³ H (TJ)	(+/-) 1 sigma
termalni izvor na Krupaji	1.7	0.2

Sadržaj ugljenika ¹⁴C u vodi Krupajskog vrelo iznosi 74.95 pMC (tabela 123), gde se daljim proračunom, zajedno sa vrednostima $\delta^{13}\text{C}$ u vodi i $\delta^{13}\text{C}$ u matičnoj steni za Kučajsko-beljanički masiv, dobija podatak da se radi o mladim, odnosno modernim vodama.

Tabela 123. Sadržaj ugljenika ¹⁴C i procenjena starost voda Krupajskog vrelo

	¹⁴ C (pMC)	(+/-) 1 sigma		$\delta^{13}\text{C}$ u vodi Krupajskog vrelo ‰	¹⁴ C starost (godine) (¹⁴ C _{inac} =100 pMC) ($\delta^{13}\text{C}$ u vodi i $\delta^{13}\text{C}$ u matičnoj steni je uzet u obzir)
Krupajsko vrelo	74.95	0.21		-8.71	moderne

Sadržaj ^{14}C u vodi bušotine B-1 iznosi 52.05 pMC (tabela 124) i dosta je niža u odnosu na Krupajsko vrelo, ali daljim proračunom, zajedno sa vrednostima $\delta^{13}\text{C}$ u vodi bušotine u periodu uzorkovanja i $\delta^{13}\text{C}$ u matičnoj steni za Kučajsko-beljanički masiv, dobija se zaključak da se radi o mladim, modernim vodama, čija starost ne može da se utvrdi analizom ugljenika, obzirom da ova metoda služi za detekciju veoma starih voda, već je potrebno primeniti neki od drugih izotopskih metoda utvrđivanja starosti, a koji nisu mogli biti sprovedeni u okviru istraživanja za potrebe izrade disertacije.

Tabela 124. Sadržaj ugljenika ^{14}C i procenjena starost voda bušotine na Krupaji

Radioaktivni izotopi	^{14}C (pMC)	(+/-) 1 sigma	$\delta^{13}\text{C}$ u vodi bušotine B-1 ‰	^{14}C starost (godine) ($^{14}\text{C}_{\text{inic}}=100$ pMC) ($\delta^{13}\text{C}$ u vodi i $\delta^{13}\text{C}$ u matičnoj steni je uzet u obzir)
bušotina na Krupaji	52.05	0.18	-5.91 ‰	moderne

Sadržaj ^{14}C u termalnog izvora na Krupaji iznosi 16.89 pMC (tabela 125), što predstavlja najniže zabeleženu vrednost radioaktivnog izotopa ugljenika u okviru Kučajsko-beljaničkog masiva. Međutim, uvrštavanjem vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ u vodi termalnog izvora u periodu uzorkovanja i $\delta^{13}\text{C}$ u matičnoj steni za Kučajsko-beljanički masiv, dobija se starost vode od 3 390 godina, a što ne čini ove vode najstarijim u sistemu, bez obzira što predstavlja prirodni izliv vode sa najvišom temperaturom u okviru masiva. Ipak, ovakva starost voda je veoma visoka, i ukazuje na veoma duboku ascendentnu cirkulaciju podzemnih voda.

Tabela 125. Sadržaj ugljenika ^{14}C i procenjena starost voda termalnog izvora na Krupaji

Radioaktivni izotopi	^{14}C (pMC)	(+/-) 1 sigma	$\delta^{13}\text{C}$ u vodi termalnog izvora na Krupaji ‰	^{14}C starost (godine) ($^{14}\text{C}_{\text{inic}}=100$ pMC) ($\delta^{13}\text{C}$ je uzet u obzir)
termalni izvor na Krupaji	16.89	0.09	-3.11	3 990

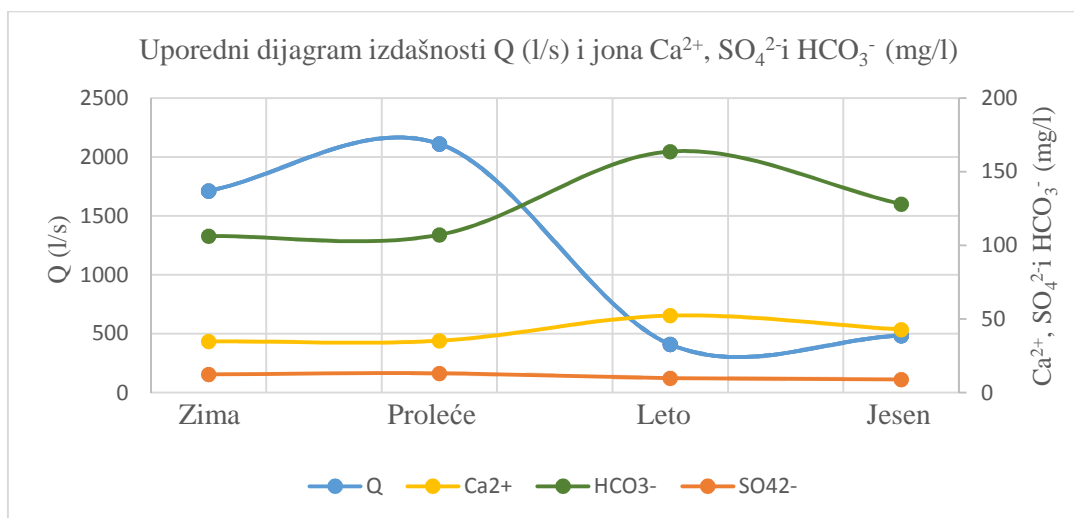
U pogledu jonskog sastava, kod voda Krupajskih pojava dominira sadržaj Ca^{2+} i HCO_3^- . Sadržaj Ca^{2+} sa dubinom opada, pa se najviše vrednosti beleže na Krupajskom vrelu i kreću se od 3.92 do 52.39 mg/l. Nešto niže vrednosti se beleže na bušotini (27.85 do 39.81

mg/l), dok se najniže vrednosti uočavaju na termalnom izvoru (22.69 do 37.23 mg/l). Niže vrednosti kalcijuma u subtermalnim i termalnim vodama, objašnjavaju se drugačijim hidrogeohemijskim uslovima koji vladaju na većim dubinama, o čemu svedoče i drugi joni sadržani u vodama Krupajskog vrela. Sadržaj HCO_3^- sa dubinom raste, maksimalne vrednosti na Krupajskom vrelu su 163.78 mg/l, maksimalne na bušotini B-1 170.29 mg/l, a maksimalno zabeležene 211.57 mg/l su na termalnom vrelu (tabele 126, 127 i 128).

Tabela 126. Sadržaj jona i plemenitih gasova u vodi Krupajskog vrela

Krupajsko vrelo	mg/L								
	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Na^+	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Zima	34.92	1.15	1.553	1.899	0.018	2.2289	5.2377	12.5445	106.3433
Proleće	35.29	0.7495	1.673	1.126	0.02	0.9255	3.2868	13.158	107.2075
Leto	52.39	0.7108	2.516	2.202	0.0385	1.0516	4.2984	9.9528	163.785
Jesen	42.83	0.7186	2.875	2.046	0.0256	0.8558	5.3858	9.0202	128.1

Dijagram zavisnosti proticaja i sadržaja Ca^{2+} , SO_4^{2-} i HCO_3^- u vodi Krupajskog vrela, pokazuje da sa povećanjem kapaciteta minimalno raste sadržaj sulfata, dok opadaju vrednosti kalcijuma i hidrokarbonata i obrnuto. Sa povećanjem izdašnosti, voda kraće vremena provodi u podzemlju i ne stiže da se u većoj meri obogati sadržajem kalcijuma i hidrokarbonata (slika 7.51.).



Slika 7.51. Uporedni dijagram izdašnosti Q (l/s) i jona Ca^{2+} , SO_4^{2-} i HCO_3^- (mg/l) na Krupajskom vrelu

Sadržaj Mg^{2+} i Na^+ u vodi raste sa dubinom. Maksimalni sadržaj Mg^{2+} na Krupajskom vrelu iznosi 2.875 mg/l, na bušotini 7.205 mg/l, a na termalnom izvoru 13.96 m/l, dok je maksimalni sadržaj Na^+ Krupajskog vrela 2.202 mg/l, 8.986 mg/l je na bušotini B-1, a čak 19.07 mg/l na termalnom izvoru Krupaje. Pored Mg^{2+} i Na^+ i sadržaji sulfata rastu od 13.158 mg/l na Krupajskom vrelu do maksimalnih 24.797 mg/l na termalnom izvoru. Ovakav jonski sastav, koji se menja sa dubinom, verovatno ukazuje na kontakt vode sa drugom stenskom masom osim karbonata. Po svom jonskom sastavu, vode subtermalnog i termalnog karaktera ukazuju na sličan, (ali sa znatno manjim koncentracijama jona), sastav sa vodama Milanovačke banjice, pa se može zaključiti da vode Krupajskih vrela sa dubinom stupaju u kontakt sa dacitima i ili crvenim permskim peščarom, koji znatno menja hidrohemijske karakteristike voda i daje im termalni, ali i drugačiji mineralni karakter.

Tabela 127. Jonski sastav vode u bušotini na Krupaji

Krupajsko vrelo bušotina	mg/L								
	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Zima	27.85	1.14	6.668	8.71	0.1145	1.7566	2.3713	18.606	124.6942
Proleće	31.6	1.276	6.81	8.325	0.11	1.8919	2.939	19.1682	132.9292
Leto	39.81	1.115	7.205	8.986	0.1278	1.8199	3.254	16.4871	168.4108
Jesen	39.43	1.116	6.947	8.615	0.1324	1.6925	3.3782	15.2613	170.2917

Tabela 128. Jonski sastav vode termalnog izvora na Krupaji

Krupajsko vrelo termalna	mg/L								
	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Zima	22.69	1.57	12.8	17.79	0.269	2.906	1.605	23.768	158.6
Proleće	27.77	1.98	12.59	16.8	0.22	4.059	2.566	24.797	164.1917
Leto	37.23	1.62	13.85	18.74	0.297	2.855	0.948	23.558	211.5175
Jesen	32.83	1.72	13.96	19.07	0.301	2.875	1.239	23.554	208.6708

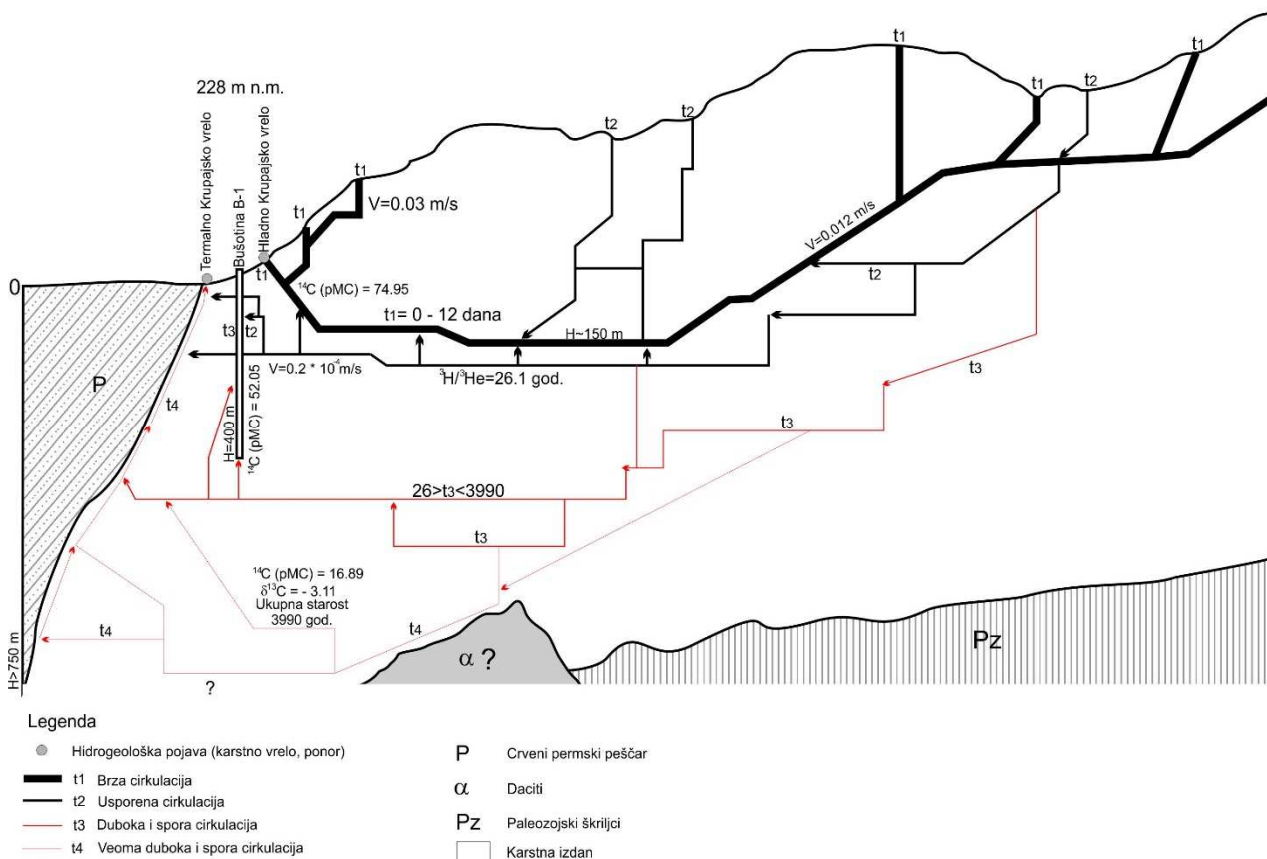
Na kraju se može zaključiti da sistem Krupajskih pojava ima veoma razvijenu karstifikaciju i izraženu zonalnost u cirkulaciji podzemnih voda, gde se hladne vode kreću do 133 metara (verovatno i preko 150-200 m) i imaju starost vode od 26.1 godinu, dok na dubini od 400 metara i više, cirkulišu vode temperature 25 °C, a preko 400 m vode od 26 °C. Izdan termalnih voda je razvijena u okviru pukotinskog tipa, budući da se radi o

veoma dujoj i usporenoj cirkulaciji, koja zaleže do baze karstifikacije, dok su za cirkulaciju hladnih voda Krupajskog vrela karakteristični kanali velikih dimenzija, koji mogu da propuste vode kapaciteta i preko 30 m³/s.

Na kraju se, kao prilog dobijenim podacima i izvedenim analizama, kao i uzimanjem u obzir ranije prikupljenih podataka o cirkulaciji podzemnih voda unutar Kučajsko-beljaničkog masiva, može dati shematski prikaz okvirne geneze i cirkulacije podzemnih voda složenog karstnog sistema Krupaje (slika 7.52.). Kao što se vidi sa ovog shematskog profila, ovo je jedini sistem u okviru Kučajsko-beljaničkog masiva, u kojem su se jasno mogli izdiferencirati četiri tipa cirkulacije. Prvi tip pripada brznoj cirkulaciji (kanali t₁), čije vode u potpunosti odražavaju aktivan karstni sistem koji veoma brzo reaguje na padavine, odnosno na površinsko prihranjivanje, kako u zonama u neposrednoj okolini isticanja, tako i u udaljenim zonama ovog sistema. Pa se tako, na osnovu prikupljenih i obrađenih podataka, može zaključiti da sistem u slučaju jačih padavina reaguje za manje od jednog dana (primer 2014. godine, kada se poplavni talas pojavio u roku od 16 sati), pa do 12 dana, što je generalno prosečna brzina za tečenje kroz glavne provodnike Kučajsko-beljaničkog masiva. Glavni provodnici, njihove glavne zone prihranjivanja, kao i duboko zaleganje (kanali t₁) su prikazani na slici 7.52.

Drugi tip cirkulacije se odvija kroz kanale i pukotine znatno manjih dimenzija, kojima, neretko, treba dosta duži vremenski period da se „uliju“ u glavne provodnike (kanali t₂). Kod ovih provodnika se pretpostavlja i da zaležu dublje od glavnih, do sada istraženih kanala Krupajskog vrela (130 m), te da se naknadno spajaju sa glavnim kanalima i ascedentno ističu na površinu, čemu ide u prilog utvrđena starost. Kanali t₃ grupe se nalaze znatno dublje od zone cirkulacije hladnih voda i mogu se posmatrati kao prelazna zona, odnosno zona mešanja sa najstarijim vodama sistema. Ovi kanali su nabušeni bušotinom B-1, kada je i ustanovljeno da iz dubljih delova sistema postoji priliv toplih voda i do 25°C, a da do dubina i većih od 200 m postoji uticaj, odnosno kontakt sa „mladim“ vodama iz hladnog dela sistema. Na osnovu toga se i pretpostavlja da su kanali grupe t₃ razvijeni i do dubina od 400-500 m. Najdublja cirkulacija ovog sistema sa najstarijim (3.390 godina) vodama definisanim kroz analizu izotopa ¹⁴C, odnosi se na zone (kanali) t₄. Na shematskom profilu (slika 7.52.) je prikazan pretpostavljen sistem cirkulacije, zagrevanja i isticanja termalnih voda duž navlake crvenih permskih pešćara.

Brzine v su prosečne brzine dobijene opitima bojenja na Kučajsko-beljaničkom masivu za gravitacione i sifonalne cirkulacije voda.



Slika 7.52. Shematski prikaz geneze i cirkulacije podzemnih voda složenog karstnog sistema Krupajske pojave

Sistem Sisevac (Gravitaciono – ascendentni sistem)

Sistem Sisevac predstavlja još jedan kompleksni sistem u kojem dominiraju hladne vode vrela Crnice, a u kome su istražnim bušenjem na 216 metara dobijene vode značajno veće temperature od svih subtermalnih i termalnih pojava na Kučajsko-beljaničkom masivu. Veza voda na izvoru Crnice sa ponorom Nekudovo je dokazana (poglavlje 4.6), pa će se iz tog razloga, paralelno sa vodama na vrelu i u bušotini, razmatrati i površinske vode koje prihranjuju podzemne vode ovog sistema.

Količine voda koje poniru u ponor Nekudova kretale su se u periodima istraživanja od 154 do 485 l/s, a na vrelu su isticale količine od 375 od 1840 l/s, ukazujući na veće količine voda koje ističu na vrelu u odnosu na vode koje poniru, što ukazuje i na druge

zone prihranjivanja voda vrela Crnice. Bušotina SIS-1 ima konstantan samoizliv od 36 °C. Temperatura ponorske vode odražava sezonski karakteri i kreće se od 2.5 do 11.3 °C. Vrednost pH se kreće uglavnom iznad 8 (maksimalno 8.45), ukazujući na vode koje se formiraju na slivnom području pretežno izgrađenim od stena paleozojske starosti. Ostali fizičko-hemijski parametri ponorskih voda, odražavaju potpuno površinski karakter cirkulacije, koji se odlikuje niskim vrednostima elektroprovodljivosti (133 do 197 $\mu\text{s/cm}$) i kiseonika (1.33 do 7 mg/l). Mutnoća vode je blago povišena, što i jeste odlika površinskih tokova, i kreće se od 1.33 do 4.2 NTU. Fizičko-hemijski parametri voda na ponoru Nekudovo su prikazani u tabeli 129.

Tabela 129. Rezultati monitoringa voda ponora Nekudovo

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost ($\mu\text{s/cm}$)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	372	2.5	8.45	154	1.33	1.8
Proleće	485	11.3	8.2	133	2.92	3.8
Leto	154	8.4	8.1	197	7	4.2
Jesen	250	3.6	8.2	181	6.7	1.33

Temperatura vode na vrelu Crnice, takođe ima sezonski karakter. U zimskom periodu beleže se najniže temperature od 8.5 °C, dok su najviše temperature zabeležene u letnjem periodu i iznose 13.4 °C. Ova vrednost temperature može biti i posledica prodora toplih voda iz dubljih karstnih kanala u periodu minimuma. Temperatura vode na bušotini je konstantna i kreće se od 34-35.2 °C. Vrednost pH sa povećanjem temperature neznatno opada, pa na vrelu Crnice minimalno iznosi 7.16 (u letnjem periodu), dok na bušotini SIS-1 iznosi 7.

Elektroprovodljivost sa porastom temperature raste do 521 $\mu\text{s/cm}$, ukazujući na veću koncentraciju rastvorene materije na većim dubinama. Rastvoreni kiseonik u vodi vrela Crnice takođe odražava sezonski karakter, i najveći je u maksimumu isticanja voda na vrelu, kada iznosi 10.52 mg/l, dok je vrednost rastvorenog kiseonika u vodi na bušotini stalno niža i kreće se od 2.6 do 4.55 mg/l, ukazujući na dublju, sifonalnu cirkulaciju podzemnih voda. Povišena mutnoća vode na vrelu varira i kreće se od 1.86 do 2.84 NTU, dok je voda na bušotini dosta bistrija, odražavajući blago zamućenje u zimskom i jesenjem periodu. Rezultati fizičko-hemijskih karakteristika voda vrela Crnice i bušotine SIS-1, prikazani su u tabelama 130 i 131.

Tabela 130. Rezultati monitoringa podzemnih voda vrela Crnice

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost (μs/cm)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	620	8.5	7.5	432	9.8	1.9
Proleće	1840	9.3	7.4	429	10.2	2.31
Leto	375	13.4	7.16	483	9.52	1.86
Jesen	520	11.2	7.5	460	5.46	2.84

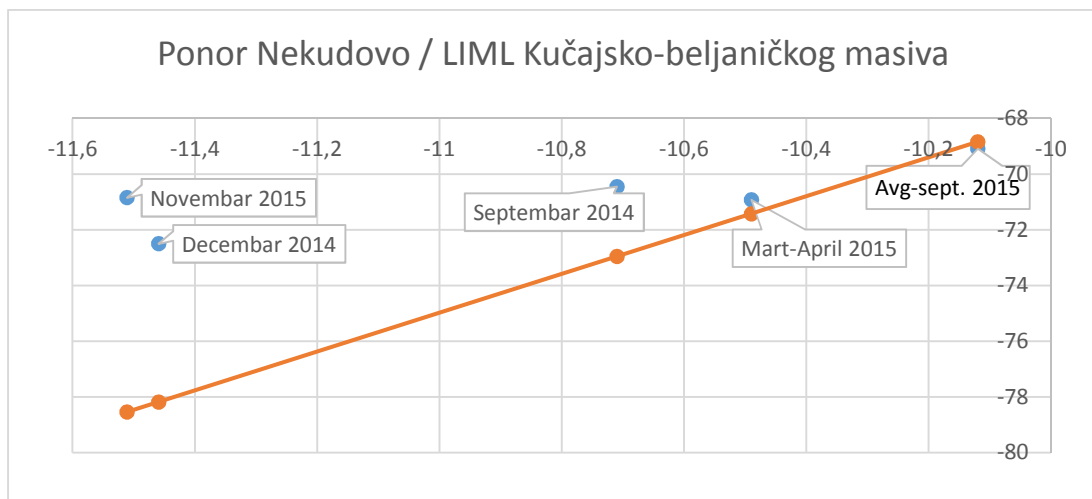
Tabela 131. Rezultati monitoringa podzemnih voda iz bušotine SIS-1 u Sisevcu

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost (μs/cm)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	18	34.5	7	517	2.9	1.1
Proleće	18	35.2	7	521	3.6	0.2
Leto	18	35.2	7.35	515	4.55	0.5
Jesen	18	34	7.3	516	2.6	1.96

Sadržaj stabilnih izotopa u vodi ponora Nekudovo leže blizu lokalne meteorske linije (slika 7.53.), čime odražavaju izotopski sastav padavina, izuzev uzoraka decembra 2014. i novembra 2015. godine, koji ukazuju na znatno negativnije vrednosti kiseonika i vodonika, čime reflektuju izotopski sadržaj snežnog pokrivača. Vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ se kreću od -11.63 do -13.55 ‰ (tabela 132), što odgovara povišenim i površinskim vrednostima sadržaju stabilnog ugljenika u zemljišnom sloju.

Tabela 132. Sadržaj stabilnih izotopa voda ponora Nekudovo

Ponor Nekudova	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Septembar 2014	-	-70.45	-10.71
Zima	-12.42	-72.50	-11.46
Proleće	-13.55	-70.92	-10.49
Leto	-12.10	-69.09	-10.12
Jesen	-11.63	-70.84	-11.51

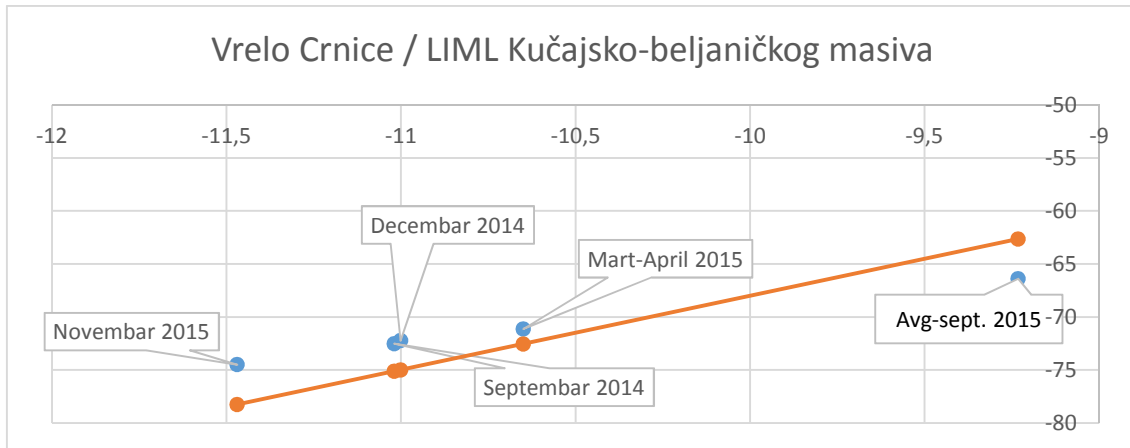


Slika 7.53. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi ponora Nekudova

Sadržaj stabilnog izotopa ugljenika u vodi Crnice se kreće od -9.50 do -11.55 ‰ (tabela 133), dok se u vodi bušotine SIS-1 kreće od -4.02 do -5.59 ‰ (tabela 134), reflektujući izotopski sadržaj starih voda. Niži sadržaj od -9.50‰ na vrelu Crnice ukazuje na starije vode koje su isticale na vrelu u periodu minimalne izdašnosti. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi Crnice raspoređen je blizu i duž LIML (slika 7.54.), reflektujući jaku vezu podzemnih voda sa atmosferskim padavinama. Izuzetak su vrednosti iz novembra 2015., što ukazuje na brzu cirkulaciju i uticaj izotopskog sadržaja voda ponora Nekudovo, formiranog od snežnih padavina. Takođe, vrednost iz letnjeg perioda 2015 godine, leži ispod LIML, ukazujući na prolongirani kontakt vode sa stenom, odnosno duži boravak u podzemlju.

Tabela 133. Sadržaj stabilnih izotopa voda vrela Crnice

Vrelo Crnice	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Septembar 2014	-	-72.51	-11.02
Zima	-11.55	-72.23	-11.00
Proleće	-9.58	-71.12	-10.65
Leto	-9.50	-66.39	-9.23
Jesen	-10.74	-74.49	-11.47

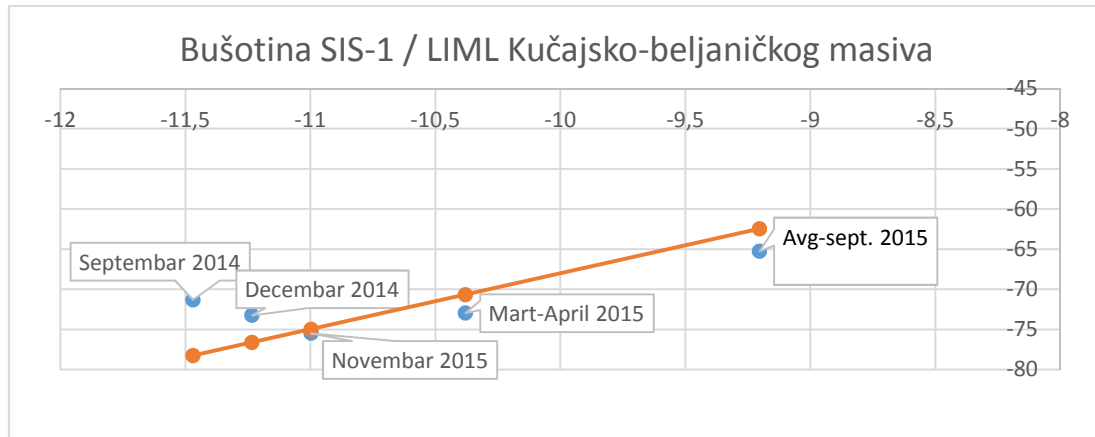


Slika 7.54. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi vrela Crnice

Vrednosti stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi bušotine SIS-1, raspoređene su koncentrično u levom delu LIML sa gornje i donje strane (slika 7.55.). Na osnovu sadržaja koji se kreće od -20 do -11.47 ‰ za $\delta^{18}\text{O}$ i od -65.25 do -75.96 ‰ za δD (tabela 134), može se zaključiti da vode iz bušotine imaju značajan priliv sveže atmosferske vode, izuzev u letnjem periodu, kada su vrednosti dosta niže, pa tačka sadržaja izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD iz letnjeg perioda leži udaljeno od ostalih tačaka.

Tabela 134. Sadržaj stabilnih izotopa voda iz bušotine SIS-1 u Sisevcu

Sisevac termalna	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Septembar 2014	-	-71.3	-11.47
Zima	-5.57	-73.24	-11.23
Proleće	-4.02	-72.96	-10.38
Leto	-4.65	-65.25	-9.20
Jesen	-5.59	-75.47	-11.00

Slika 7.55. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi bušotine SIS-1

Kako bi se odredile ulazne vrednosti ^3H i ^{14}C u sistemu, odnosno početne, nulte vrednosti, a u svrhu utvrđivanja starosti voda na pojavama i objektima, izvršeno je uzorkovanje vode za utvrđivanje sadržaja ovih izotopa u vodama ponora Nekudovo. Dobijeno je da su ulazne vrednosti tricijuma za područje Nekudova 7.02 TJ tabele (135 i 136), što je niže od vrednosti na ponoru Busovate, a što može biti posledica isticanja voda iz pukotinske izdani kao i u okviru površinskih voda koje i formiraju tok reke Nekudovo. Vrednost ^{14}C iznosi 102.46 pMC. Proračunom starosti voda sa vrednostima $\delta^{13}\text{C}$ u vodi ponora u periodu uzorkovanja i $\delta^{13}\text{C}$ u matičnoj steni za Kučajsko-beljanički masiv, dobija da su vode veoma mlade, odnosno moderne.

Tabela 135. Sadržaj radioaktivnog izotopa ^3H u vodi ponora Nekudovo

Sadržaj radioaktivnih izotopa	^3H (TU)	(+/-) 1 sigma
Ponor Nekudova	7.02	0.22

Tabela 136. Sadržaj ugljenika ^{14}C i procenjena starost voda ponora Nekudovo

Radioaktivni izotopi	^{14}C (pMC)	(+/-) 1 sigma	$\delta^{13}\text{C}$ u vodi ponora Nekudovo ‰	^{14}C starost (godine) ($^{14}\text{C}_{\text{inic}}=100$ pMC) ($\delta^{13}\text{C}$ u vodi i u matičnoj steni je uzet u obzir)
Ponor Nekudova	102.46	0.29	-12.1	moderne

Sadržaj tricijuma u vodi vrela Crnice meren je u dva navrata, pri čemu su dobijene vrednosti od 6.2 (period većih voda) i 5.57 TJ, period minimalnog isticanja iz vrela. Na osnovu tabele 16, vode pripadaju modernim vodama starosti od 5 do 10 godina. Međutim, u cilju preciznijeg utvrđivanja starosti voda na vrelu Crnice sprovedena je analiza, odnosno izračunata je starost vode izotopskom metodom $^3\text{H}/^3\text{He}$ (tabela 137). Starost vode na vrelu Crnice iznosi 19.5 godina (+/- 0.8 godina). Metodom $^3\text{H}/^3\text{He}$ utvrđena je najveća starost mlade komponente u uzorku vode, koja je isticala u septembru mesecu, što ukazuje da na vrelu Crnice u periodu minimuma, odnosno periodu recesije, ističu vode koje znatno dublje zaležu u karstnom sistemu.

Tabela 137 Sadržaj radioaktivnih izotopa ^3H i $^3\text{H}/^3\text{He}$ u vodi vrela Crnice

Sadržaj radioaktivnih izotopa	^3H (TU)	(+/-) 1 sigma	$^3\text{H}/^3\text{He}$ starost (godine)	Neposredna starost (godine)
Vrelo Crnice	6.2	0.4	19.5	0.8
	5.75	0.23		

Sadržaj plemenitih gasova u vodi vrela Crnice ukazuje na temperaturne uslove koji su vladali u periodu prihranjivanja podzemnih voda, odnosno na temperaturu vazduha od 10.30 °C (tabela 138), što govori da se vode dubljih karstnih kanala prihranjuju u prolećnom periodu, kada se usled velikih količina voda i pritiska u zaleđu sistema, veliki deo voda infiltrira u dublje kanale, odakle polako cirkuliše prema površini terena.

Tabela 138. Sadržaj plemenitih gasova u vodi vrela Crnice

Naziv lokacije	He (ccSTP/g)	Ne (ccSTP/g)	Ar (ccSTP/g)	Kr (ccSTP/g)	Xe (ccSTP/g)	R/Ra	T(°C)	chi2-test
Vrelo Crnice	1.4359E-07	1.8711E-07	3.7251E-04	8.6688E-08	1.2630E-08	0.4564	10.85	0.19

Pored sadržaja ^3H i $^3\text{H}/^3\text{He}$ u vodi vrela Crnice, izvršeno je i uzorkovanje vode za utvrđivanje sadržaja ^{14}C u vodi, čiji sadržaj iznosi 73.41 pMC (tabela 139). Daljim proračunom starosti voda sa vrednostima $\delta^{13}\text{C}$ u vodi vrela Crnice u periodu uzorkovanja i $\delta^{13}\text{C}$ u matičnoj steni za Kučajsko-beljanički masiv, dobijeno je da su vode vrela mlade, i da se starost ne može detektovati metodom ugljenika ^{14}C .

Tabela 139. Sadržaj ugljenika ^{14}C i procenjena starost voda vrela Crnice

Radioaktivni izotopi	^{14}C (pMC)	(+/-) 1 sigma	$\delta^{13}\text{C}$ u vodi vrela Crnice ‰	^{14}C starost (godine) ($^{14}\text{C}_{\text{inic}}=100$ pMC) ($\delta^{13}\text{C}$ u vodi i u matičnoj steni je uzet u obzir)
Vrelo Crnice	73.41	0.22	-9.5	moderne

Sadržaj tricijuma u vodi bušotine SIS-1, takođe je meren u dva navrata, i iznosi 1.2-1.6 TJ (tabela 140), ukazujući na postojanje mlade komponente u termalnim vodama, odnosno na mešanje mladih voda sa vodama veće starosti. Međutim, vrednost tricijuma je relativno niska, što ukazuje da je i mlada komponenta u vodi, takođe veće starosti. Zbog visoke temperature vode i niskih vrednosti tricijuma, u vodi bušotine je izvršeno i analiziranje sadržaja ugljenika ^{14}C (tabela 141).

Tabela 140. Sadržaj radioaktivnog izotopa ^3H u vodi bušotine SIS-1 u Sisevcu

Sadržaj radioaktivnih izotopa	^3H (TU)	(+/-) 1 sigma
Krupajsko vrelo	1.2	0.2
	1.63	0.85

Vrednost ^{14}C za bušotinu SIS-1 iznosi 26.57 pMC, dalje proračunom starosti voda sa vrednostima $\delta^{13}\text{C}$ u vodi bušotine u periodu uzorkovanja i $\delta^{13}\text{C}$ u matičnoj steni za Kučajsko-beljanički masiv, dobija da su vode na bušotini SIS-1 stare 2.687 godina, što ukazuje na veoma stare vode u poređenju sa drugim uzorcima ovog područja.

Tabela 141. Sadržaj ugljenika ^{14}C i procenjena starost voda iz bušotine SIS-1 u Sisevcu

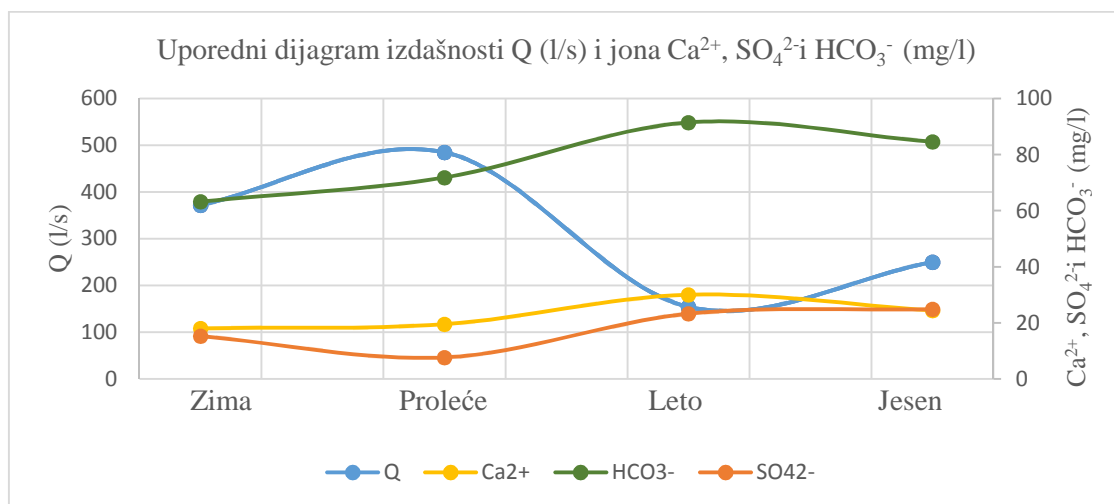
Radioaktivni izotopi	^{14}C (pMC)	(+/-) 1 sigma	$\delta^{13}\text{C}$ u vodi bušotine SIS-1 ‰	^{14}C starost (godine) ($^{14}\text{C}_{\text{inic}}=100$ pMC) ($\delta^{13}\text{C}$ u vodi i u matičnoj steni je uzet u obzir)
vrelo Crnice	26.57	0.12	-4.65	2.687

U pogledu jonskog sastava, vode na ponoru Nekudovo su HCO_3^- - Ca^{2+} vode. Vrednosti Ca^{2+} iznose od 19.5 mg/l, u periodu velikih voda, do 30 mg/l u periodu malih voda. Sadržaj HCO_3^- se kreće od 69.23 do 84.586 mg/l. Od ostalih jona, zastupljeni su i joni sulfata, sa koncentracijama od 7.65 do 24.82 mg/l, a takođe se u malim koncentracijama

detektuju i vrednosti Mg^{2+} (do 4.39 mg/l), Na^+ (do 2.424 mg/l), kao i male vrednosti K^+ (do 1.22 mg/l). Sadržaj jonskog sastava prikazan je u tabeli 142. Uporednom analizom izdašnosti i sadržaja Ca^{2+} , SO_4^{2-} i HCO_3^- , uočava se porast vrednosti jona sa opadanjem izdašnosti i obrnuto (slika 7.56.).

Tabela 142. Jonski sastav voda ponora Nekudovo

Ponor Nekudovo	mg/L								
	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Na^+	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Zima	18.04	0.84	3.6	1.96	0.0615	1.0234	1.7782	15.2552	63.23667
Proleće	19.5	0.8304	3.576	1.768	0.02	0.6948	5.8184	7.649	71.87833
Leto	30	1.121	4.52	2.357	0.0839	0.9861	0.5644	23.2216	91.5
Jesen	24.4	1.219	4.939	2.424	0.065	1.2074	1.8654	24.8223	84.58667



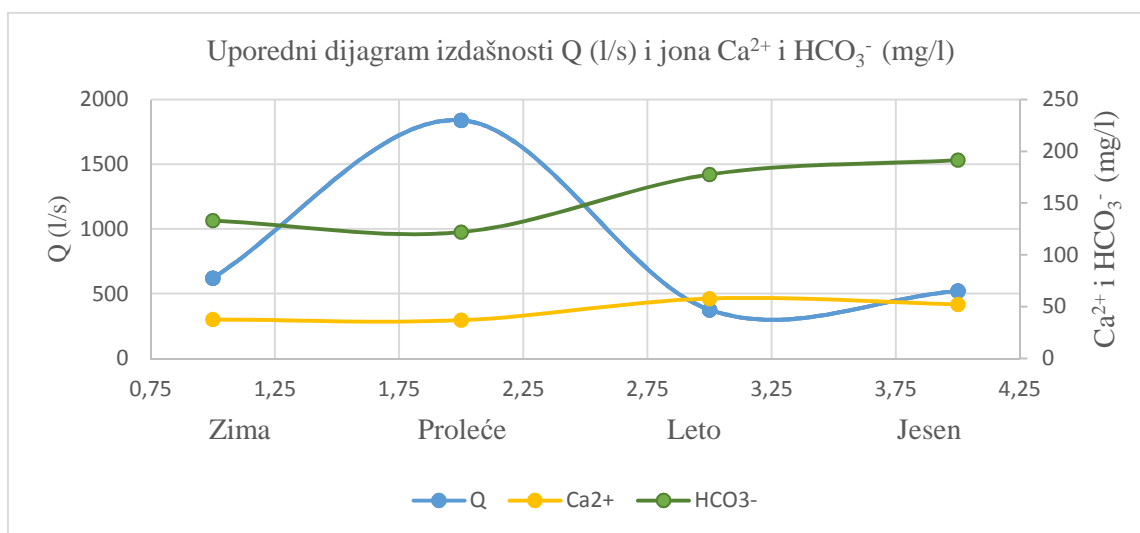
Slika 7.56. Uporedni dijagram izdašnosti Q (l/s) i jona Ca^{2+} , SO_4^{2-} i HCO_3^- (mg/l) ponoru Nekudovo

Prilikom cirkulacije voda kroz podzemlje ka vrelu Crnice, vrednosti Ca^{2+} , Mg^{2+} i HCO_3^- rastu, dok vrednosti Na^+ i SO_4^{2-} blago opadaju. Sadržaj Ca^{2+} u vodi Crnice kreće se od minimalnih 36.87 mg/l i HCO_3^- 122 mg/l u prolećnom periodu, kada se usled brze cirkulacije voda nedovoljno obogati ovim jonima. Najveće vrednosti Ca^{2+} od 57.85 mg/l zabeležene su u letnjem periodu, odnosno za HCO_3^- u jesenjem, kada je iznosio 191.48 mg/l. Uporedni dijagram proticaja i sadržaja Ca^{2+} i HCO_3^- , prikazan je na slici 7.57. Sadržaj Mg^{2+} je porastao u odnosu na vode ponora Nekudovo, na maksimalnih 7.88 mg/l,

takođe u letnjem periodu, dok se sadržaj sulfata snizio na 13.47 mg/l. Jonski sastav vrela Crnice prikazan je u tabeli 143.

Tabela 143. Jonski sastav voda vrela Crnice

Vrelo Crnice	mg/L								
	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Zima	37.52	0.7957	3.847	1.612	0.0278	1.0247	3.5011	12.4135	133.1833
Proleće	36.87	0.8338	4.538	1.46	0.03	0.8995	3.4744	12.9321	122
Leto	57.85	0.9374	7.889	2.145	0.0357	1.0837	4.1674	11.6704	177.6625
Jesen	52.16	0.9377	5.836	1.792	0.0202	1.0406	4.4821	13.4762	191.4892



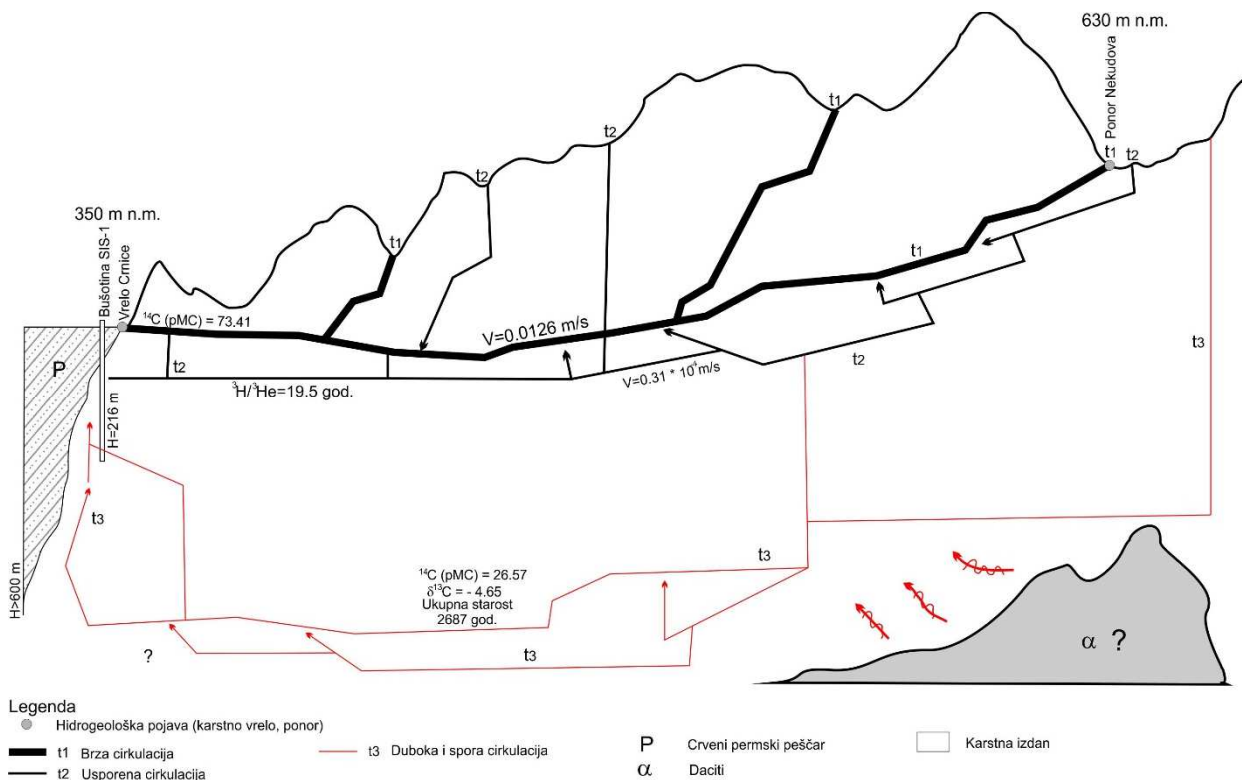
Slika 7.57. Uporedni dijagram izdašnosti Q (l/s) i jona Ca²⁺ i HCO₃⁻ (mg/l) na vrelu Crnice

U termalnoj vodi bušotine SIS-1 sadržaj Ca²⁺ je manji u odnosu na sadržaj na vrelu Crnice i kreće se od minimalnih 24.6 do 42.97 mg/l (tabela 144). Takođe je i sadržaj sulfata niži u odnosu na hladne vode i konstantno iznosi oko 9 mg/l. Vrednosti HCO₃⁻ rastu, pa su maksimalne koncentracije od 236.07 mg/l, zabeležene u jesenjem periodu. Nitrati u vodi opadaju, pa se tako vrednosti sa maksimalnih 4.48 mg/l na vrelu Crnice, spuštaju na maksimalnih 2.74 mg/l u termalnoj vodi. Vrednosti jona Mg²⁺ i Na⁺ rastu, s tim što se kod Na⁺ vrednost povećava na 4.33 mg/l, dok vrednost Mg²⁺ raste sa maksimalnih 7.89 mg/l na vrelu Crnice na konstantnih 17 mg/l u termalnoj vodi.

Tabela 144. Jonski sastav voda iz bušotine SIS-1 u Sisevcu

Sisevac bušotina SIS-1	mg/L								
	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Zima	24.6	1.036	17.34	4.035	0.0715	1.2073	2.0118	9.8125	175.1717
Proleće	27.32	1.064	17.88	3.833	0.06	1.168	2.4357	9.6173	164.7
Leto	40.51	0.9969	17.04	3.779	0.0681	1.1936	2.7447	9.6295	212.1275
Jesen	42.97	1.076	17.82	4.333	0.0435	1.2301	1.7494	9.5455	236.07

Sistem Sisevac, kao i svi kompleksni karstni sistemi Kučajsko-beljaničkog masiva, pokazuje dobro razvijenu mrežu podzemnih karstnih kanala. Ono što je posebno karakteristično za ovaj sistem je postojanje termalne vode od čak 36 °C, na svega 216 m dubine (kanali t₃), koja je ujedno i najviša temperatura na istražnom prostoru. Vrelo Crnice ima starost od 19.5 godina (slika 7.58.), što takođe govori o dobro razvijenoj mreži karstnih pukotina i kanala hladne vode (kanali t₂), čije je zaleganje dublje od glavnih kanala kojima cirkulišu vode od ponora Nekudovo (kanali t₁), do samog vrela. Pri minimalnim izdašnostima, na vrelo Crnice se javlja dominantno isticanje voda starosti 19.5 godina, koje u tom periodu već poprimaju blagi subtermalni karakter, kao i druge karakteristike voda koje dublje zaležu u podzemlje. Upravo ovo može da ukaže na blizinu proboja grejnog tela površini terena. Vode termalne bušotine imaju najviše vrednosti Mg²⁺, u odnosu na druge subtermalne i termalne pojave na masivu.



Slika 7.58. Shematski prikaz cirkulacije podzemnih voda složenog karstnog sistema Sisevac

Sistem Krivi Vir (ascendentno – gravitacioni)

Sistem Krivi Vir predstavlja jedinstven sistem, gde hladno vrelo Crnog Timoka u periodu malih voda gubi svoj preovlađujući značaj, dok vode Krivovirske banjice imaju dosta ujednačene proticaje, koji su u minimumu veći od hladnog vrela Crnog Timoka. Opitom obeležavanja je uspostavljena veza Crnog Timoka sa ponorom Gajine Mlake, ali obzirom da je ponor uglavnom bio suv prilikom terenskih obilazaka, za ponorske vode se raspolaže samo podacima izotopskog i jonskog sastava voda u jesenjem periodu 2015. godine.

Mereno proticaj vrela Crnog Timoka u periodima uzorkovanja se kreće od 88 do 1278 l/s, dok se proticaji Krivovirske banjice kreću od 101 l/s u minimumu, do 168 l/s u maksimumu. Vrelo Crnog Timoka ima ujednačene vrednosti temperature, koje malo osciliraju i kreću se od 9.8 do 10.5 °C. Temperatura vode na Krivovirskoj banjici veoma oscilira i kreće se od minimalnih 15.9 °C u zimskom periodu, do maksimalnih 23.4 °C, u letnjem periodu, kada dominantno isticanje preuzima toplija voda sa veće dubine, koja ima termalni karakter.

Vrednosti pH sa postepenim prelazom u termalni karakter opadaju, pa su najviše vrednosti zabeležene na vrelu Crnog Timoka, kada pH vrednost iznosi 7.63, dok su najniže vrednosti zabeležene na Krivovirskoj banjici, upravo u periodu malih voda, odnosno u periodu kada primarno isticanje preuzima termalna voda iz dubljih delova ovog jedinstvenog sistema. Ono što je karakteristično kod sistema Krivi Vir je da hladna voda ima veću elektroprovodljivost i ukazuje da je veći sadržaj rastvorenih mineralnih materija u hladnoj, nego u subtermalnoj vodi. Vrednost na vrelu Crnog Timoka je konstantna i kreće se od 600 do 616 $\mu\text{s/cm}$, dok se na Krivovirskoj banjici kreće od 509 do 516 $\mu\text{s/cm}$.

Kiseonik sa dubinom, kao i u drugim slučajevima termalne i subtermalne vode, opada, pa na vrelu Crnog Timoka u maksimumu vrela iznosi 11.47 mg/l, dok je najniža vrednost zabeležena u Krivovirskoj banjici u jesen, kada je iznosila 4.18 mg/l. Mutnoća vode je na vrelu Crnog Timoka stalno povišena i kreće se od 1.12 do 1.44 NTU, ali nema izraženih pikova zamućenja u prolećnom periodu, odnosno u periodu velikih voda, što može da ukaže na prolongiranu cirkulaciju voda u zoni dubljih kanala, kao i na difuzno prihranjivanje podzemnih voda sa ogolićenih karstnih površina, pri čemu se u podzemlje ne unose velike količine suspendovanog nanosa. Mutnoća vode u Krivovirskoj banjici varira i kreće se od 0.95 do 2.83 NTU, što ukazuje na prodor pripovršinske vode u kanale termalne vode, koji, osim što hladi, unosi i nečistoće u termalnu vodu. Fizičko-hemijske karakteristike Crnog Timoka i Krivovirske banjice, prikazani su u tabelama 145 i 146.

Tabela 145. Rezultati monitoringa podzemnih voda vrela Crnog Timoka

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost ($\mu\text{s/cm}$)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	377	9.8	7.366	604	10.2	1.38
Proleće	1278	9.9	7.29	600	11.47	1.12
Leto	88	10.5	7.2	601	10.52	1.12
Jesen	225	10.4	7.63	616	6.17	1.44

Tabela 146. Rezultati monitoringa podzemnih voda termalnog izvora u Krivom Viru

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost (μs/cm)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	132	15.9	7.4	512	6.8	1.2
Proleće	168	18.4	7.2	509	7.5	1.44
Leto	104	23.4	7.1	511	5	0.95
Jesen	114	19.3	7.2	516	4.18	2.83

Sadržaj stabilnog izotopa ugljenika $\delta^{13}\text{C}$ u vodi ponora Gajine Mlake iznosi -16.19 ‰ (tabela 147), ukazujući na sadržaj ovog izotopa u gasu zemljišnog sloja. Vrednost ugljenika $\delta^{13}\text{C}$ u vodi vrela Crni Timok je dosta niža od vrednosti u Krivovirskoj banjici, i kreće se od -6.81 do -8.59 ‰ (tabela 148), dok se u banjici kreće od -7.17 do -10.8 ‰ (tabela 149). Ovakav izotopski sastav vode vrela Crni Timok, može da ukaže na prolongirani kontakt vode sa krečnjačkom stenom, ali i na sasvim različite izvore prihranjivanja hladne i tople vode.

Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD varira i kreće se za $\delta^{18}\text{O}$ od -9.56 do -10.91 ‰ na vrelu Crnog Timoka, dok je na Krivovirskoj banjici od -9.20 do -11.03 ‰. Vrednost δD se na Crnom Timoku kreće od -68.21 do -76.01 ‰, a na Krivovirskoj banjici od -66.26 do -71.35 ‰. Najniže vrednosti na obe pojave su uočene u letnjem periodu, što ukazuje na duži boravak voda u podzemlju, odnosno da su se u letnjem periodu drenirale vode iz najdubljih kanala hladnih i termalnih voda, o čemu svedoče i druge fizičko-hemijske i hemijske karakteristike voda.

Tabela 147. Sadržaj stabilnih izotopa voda ponora Gajine Mlake

Ponor Gajine Mlake	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Jesen 2015	-16.19	-71.06	-10.91

Tabela 148. Sadržaj stabilnih izotopa voda vrela Crnog Timoka

Vrelo Crnog Timoka	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Septembar 2014	-	-76.01	-10.88
Zima	-8.59	-70.62	-10.91
Proleće	-6.93	-70.14	-10.61
Leto	-6.81	-68.21	-9.56
Jesen	-7.48	-75.02	-10.68

Na dijagramima poređenja vrednosti stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD sa LIML, uočava se jaka veza izotopskog sastava podzemnih voda sa padavinama, izuzev za letnji period. Letnji podaci se nalazi udaljeni od ostalih vrednosti i ispod lokalne meteorske linije, što ukazuje na prolongirani uticaj matične stene na izotopski sastav podzemnih voda (slike 7.59. i 7.60).

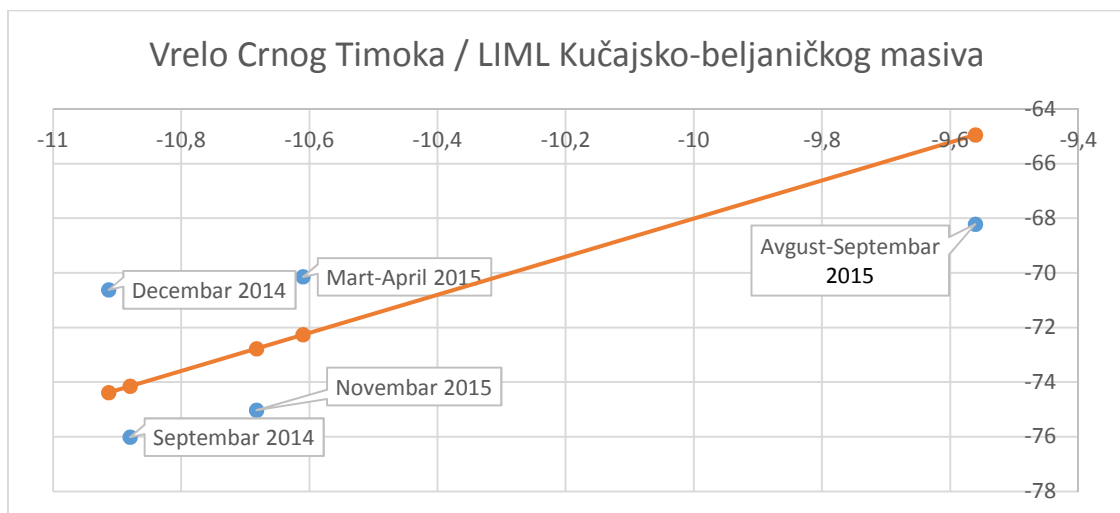
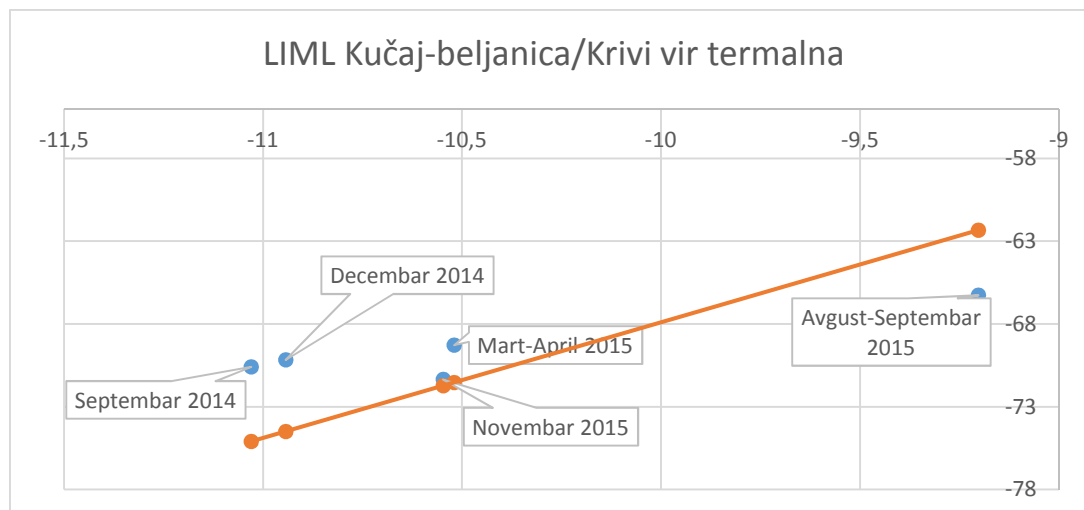
Slika 7.59. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi Crnog Timoka

Tabela 149. Sadržaj stabilnih izotopa voda termalnog izvora u Krivom Viru

Krivi Vir termalna	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Septembar 2014		-70.59	-11.03
Zima	-10.8	-70.17	-10.94
Proleće	-7.30	-69.27	-10.52
Leto	-7.17	-66.26	-9.20
Jesen	-10.52	-71.35	-10.55



Slika 7.60. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi Krivovirske banjice

U cilju definisanja starosti voda na vrelu Crnog Timoka i Krivovirskoj banjici, odnosno kako bi se definisalo vreme koje voda provede od ulaza do izlaza iz sistema, izvršeno je uzokrovanje vode za utvrđivanje sadržaja radioaktivnih izotopa vodonika i ugljenika ^3H , $^3\text{H}/^3\text{He}$ i ^{14}C , na osnovu kojih su proračunate starosti voda.

Vrednost tricijuma ^3H u vodi vrela Crni Timok izmerena je u dva navrata, odnosno u periodu velikih voda, kada je iznosila 7 TJ, i u periodu minimuma, kada je vrednost bila nešto niža, iznosila 6.35 TJ, i ukazivala na duži boravak vode u podzemlju (tabela 150). U vodi Krivovirske banjice sadržaj tricijuma je takođe određivan u periodu velikih voda i bio je viši u odnosu na period malih voda i kretao se od 3.31 TJ do 4.3 TJ (tabela 151). Upoređujući rezultate sa tabelom 16, utvrđeno je da vode Krivovirske banjice spadaju u grupu submodernih (polu starih) voda koje su „miksovane“ sa skorije infiltriranom vodom u podzemlje, dok vrednosti tricijuma na vrelu Crnog Timoka ukazuju na starost vode između 5 i 10 godina.

Za preciznije definisanje starosti vode na vrelu Crnog Timoka, proračunata je starost vode metodom $^3\text{H}/^3\text{He}$, čime je utvrđeno da starost voda, odnosno vreme zadržavanja vode u podzemlju od ulaza do izlaza iz sistema iznosi 5.7 godina (+/- 1.1 godina) (tabela 150), što ukazuje na zonalnost kanala hladne vode. Metodom $^3\text{H}/^3\text{He}$ utvrđena je najveća starost mlade komponente u uzorku vode, koja je isticala u septembru mesecu, odnosno u periodu recesije, što govori o najdužem periodu boravka vode u podzemlju za hladne vode. U periodu velikih voda, na vrelu Crnog Timoka primarno se dreniraju mlade vode, kada su

i vrednosti tricijuma više, potiskujući značajno isticanje vode iz dubljih kanala, ali uz konstantno procurivanje starijih voda, o čemu svedoče i ujednačene fizičko-hemijske karakteristike.

Tabela 150. Sadržaj radioaktivnih izotopa ^3H i $^3\text{H}/^3\text{He}$ u vodi vrela Crnog Timoka

Sadržaj radioaktivnih izotopa	^3H (TU)	(+/-) 1 sigma	$^3\text{H}/^3\text{He}$ starost (godine)	Neposredna starost (godine)
Crni Timok	7.0	0.4	5.7	1.1
	6.35	0.24		

Tabela 151. Sadržaj radioaktivnih izotopa ^3H i $^3\text{H}/^3\text{He}$ u vodi termalnog izvora u Krivom Viru

Sadržaj radioaktivnih izotopa	^3H (TU)	(+/-) 1 sigma
Krivovirska banjica	4.3	0.3
	3.31	0.17

Sadržaj plemenitih gasova u vodi vrela Crni Timok prikazan je u tabeli 152, a koji su definisali temperaturene uslove koji su vladali u periodu prihranjivanja podzemnih voda u sistem. Sračunata temperaturu vazduha od 10.87 °C (tabela 152), takođe ukazuje da su vode koje su se drenirale u periodu recesije, prihranjene u prolećnom periodu, kada se usled velikih količina voda i pritiska u sistemu, veliki deo voda perkolirao u dublje kanale, odakle je polako cirkulisao prema površini terena.

Tabela 152. Sadržaj plemenitih gasova u vodi vrela Crnog Timoka

Naziv lokacije	He (ccSTP/g)	Ne (ccSTP/g)	Ar (ccSTP/g)	Kr (ccSTP/g)	Xe (ccSTP/g)	R/Ra	T (°C)	chi2-test
Vrelo Crnog Timoka	5.1182E-08	1.8741E-07	3.7150E-04	8.6451E-08	1.2709E-08	0.9577	10.87	0.57

Vrednosti ^{14}C izmerene su na vrelu Crnog Timoka i Krivovirskoj banjici, Sadržaj ^{14}C u Crnog Timoku iznosi 79.59 pMC, a proračunom starosti voda sa vrednostima $\delta^{13}\text{C}$ u vodi vrela u letnjem periodu i $\delta^{13}\text{C}$ u matičnoj steni za Kučajsko-beljanički masiv, dobija da su ove vode mlade i da se njihova starost ne može definisati metodom ugljenika ^{14}C .

Vrednost ^{14}C u Krivovirskoj banjici iznosi 49.51 pMC. Proračunom starosti voda sa vrednostima $\delta^{13}\text{C}$ u vodi banjice u letnjem periodu i $\delta^{13}\text{C}$ i u matičnoj steni, sračunato je da starost voda iznosi svega 432 godine, što ih svrstava u najmlađe vode povišene temperature. Rezultati starosti voda i sadržaja ^{14}C , prikazani su u tabelama 153 i 154.

Tabela 153. Sadržaj ugljenika ^{14}C i procenjena starost voda vrela Crnog Timoka

Radioaktivni izotopi	^{14}C (pMC)	(+/-) 1 sigma	$\delta^{13}\text{C}$ u vodi vrela Crni Timok ‰	^{14}C starost (godine) ($^{14}\text{C}_{\text{inic}}=100$ pMC) ($\delta^{13}\text{C}$ u vodi i u matičnoj steni je uzet u obzir)
Crni Timok	79.75	0.21	-6.81	moderne

Tabela 154. Sadržaj ugljenika ^{14}C i procenjena starost voda termalnog izvora u Krivom Viru

Radioaktivni izotopi	^{14}C (pMC)	(+/-) 1 sigma	$\delta^{13}\text{C}$ u vodi termalnog vrela C. Timoka	^{14}C starost (godine) ($^{14}\text{C}_{\text{inic}}=100$ pMC) ($\delta^{13}\text{C}$ u vodi i u matičnoj steni je uzet u obzir)
Krivovirska banjica	49.51	0.16	-7.17	432

Jonski sastav u vodi ponora Gajine Mlake ukazuje na tipične površinske vode, sa niskom mineralizacijom. Pored nešto povišenih vrednosti HCO_3^- , SO_4^{2-} i Ca^{2+} , javljaju se i povišene vrednosti nitrata od 14.04 mg/l. Takođe, vrednosti Mg^{2+} i Na^+ su blago povišene i kreću se do 2.84 mg/l (Tabela 155).

Tabela 155. Jonski sastav voda ponora Gajine Mlake

Ponor Gajine Mlake	mg/L								
	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Na^+	F	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Decembar 2015	7.273	1.327	2.106	2.846	0.0166	1.0219	14.0461	11.7831	15.00092

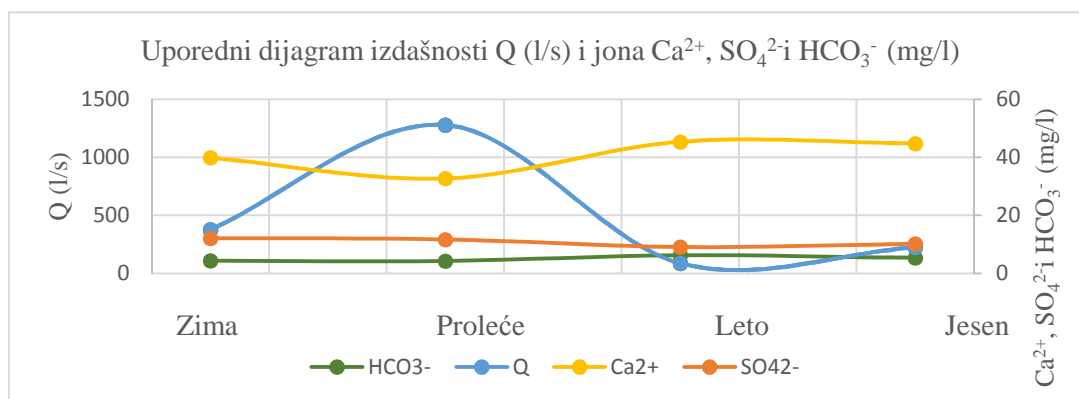
U hladnim vodama vrela Crnog Timoka dominiraju joni HCO_3^- - Ca^{2+} vode, čije vrednosti Ca^{2+} iznose od 32.68 mg/l, u periodu velikih voda, do 45.34 mg/l u periodu malih voda. Sadržaj HCO_3^- se kreće od 107.81 do 156.31 mg/l. Od ostalih jona, zastupljeni su i joni sulfata, sa koncentracijama od 9.126 do 12.14 mg/l, a takođe se u vodama Crnog Timoka uočavaju i povišene vrednosti Mg^{2+} (do 7.31 mg/l) i Na^+ . U zimskom periodu zabeležena

je vrednost od 8.27 mg/l. Povišen sadržaj magnezijuma, može biti posledica priliva vode iz dolomitičnih krečnjaka jurske starosti. Sadržaj jonskog sastava prikazan je u tabeli 156.

Tabela 156. Jonski sastav voda vrela Crnog Timoka

Crni Timok	mg/L								
	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Zima	39.85	1.166	7.371	8.276	0.0331	1.9118	3.1167	12.1405	110.2575
Proleće	32.68	0.7408	2.566	0.963	0.03	0.9522	2.9281	11.7223	107.8175
Leto	45.34	0.7256	4.744	1.161	0.0253	1.1737	4.7474	9.126	156.3125
Jesen	44.77	0.7558	3.209	0.8385	0.0091	0.9007	5.3534	10.2032	134.2

Uporednom analizom izdašnosti i sadržaja Ca²⁺, SO₄²⁻ i HCO₃⁻, uočava se porast Ca²⁺ i HCO₃⁻ sa opadanjem izdašnosti. Sadržaj suflata raste sa povećanjem izdašnosti i obrnuto (slika 7.61.).



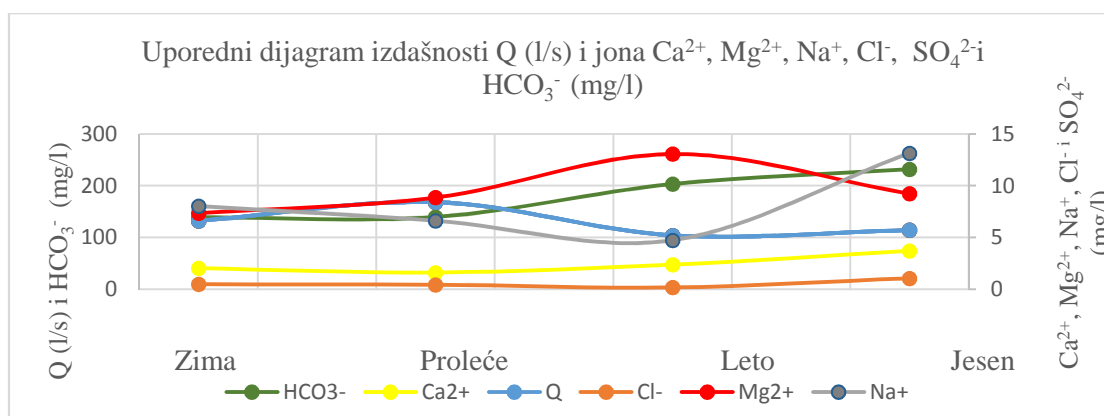
Slika 7.61. Uporedni dijagram izdašnosti Q (l/s) i jona Ca²⁺, SO₄²⁻ i HCO₃⁻ (mg/l) na vrelu Crni Timok

Vrednosti Ca²⁺ i HCO₃⁻ su znatno više u Krivovirskoj banjici, pa tako u periodu jeseni ove vrednosti iznose 74.2 mg/l za Ca²⁺, odnosno 231.8 mg/l za HCO₃⁻. U vodi se takođe uočavaju povišene vrednosti Mg²⁺ do 13.06 mg/l i Na⁺ od 13.15 mg/l.

Tabela 157. Jonski sastav voda termalnog izvora u Krivom Viru

Krivi Vir termalna	mg/L								
	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Zima	40.34	1.136	7.34	8.023	0.064	9.4056	0.6117	15.0512	138.9783
Proleće	32.24	1.093	8.854	6.625	0.06	8.5289	2.9829	14.6789	139.5883
Leto	47.38	1.174	13.06	4.723	0.0752	3.2467	2.2918	10.7154	203.1808
Jesen	74.2	1.134	9.225	13.15	0.0786	21.1035	4.9896	16.3423	231.8

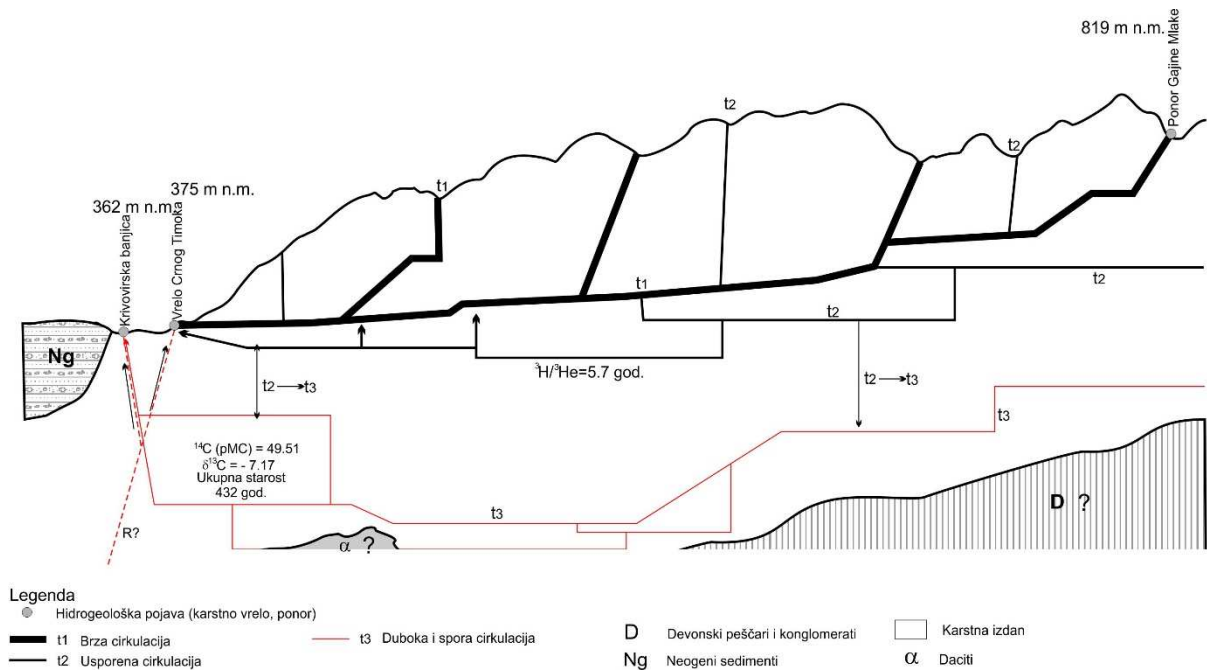
Dijagram zavisnosti izdašnosti i sadržaja jona, pokazuje da se sa povećanjem izdašnosti povećavaju i vrednosti Cl⁻ i Na⁺, dok opadaju Ca²⁺, Mg²⁺ i HCO₃⁻, i obrnuto (slika 7.62).



Slika 7.62. Uporedni dijagram izdašnosti Q (l/s) i jona Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ i HCO₃⁻ (mg/l) na Krivovirskoj banjici

Termalne vode u Krivom Viru predstavljaju mešavinu dve različite vode, a takođe imaju i priliv sveže, atmosferske vode, naročito u prolećnom periodu (kanali t₁) slika 7.63. Hladne vode ukazuju na stabilan režim hidrohemijskih karakteristika analizirane vode. Vode koje se dreniraju u periodu recesije, zaležu dublje u podzemlje, provodeći u karstnom sistemu oko 5.7 godina (kanali t₂). Najstarije termalne vode od 23.4 °C (kanali t₃), dominantno izbijaju na površinu u letnjem periodu, kada je znatno smanjen uticaj mlađih i atmosferskih voda, a vreme koje ova voda provede u podzemlju iznosi svega 432 godine (kanali t₃), što ove vode čini najmlađim termalnim vodama u okviru Kučajsko-beljaničkog masiva, a čija je temperatura najverovatnije posledica grejnog tela (dacito-andenzit), slika 7.63, ili duboke cirkulacije duž raseda. Naravno, treba istaći da su konkretne starosti voda dobijene analizom jednog uzorka na pojavama u datom

periodu, a obzirom na dinamiku karstnog sistema, ovo se ne može usovjiti kao apsolutna starost.



Slika 7.63. Shematski prikaz cirkulacije podzemnih voda složenog karstnog sistema Krivi Vir

Sistem Mrljiš (ascendentno-gravitacioni sistem)

Sistem Mrljiš predstavlja još jedan ascendentno-gravitacioni sistem, u kome vode sa veće dubine preovlađuju nad izvorskom vodom. Količine voda koje su isticale na vrelo Mrljiš, kretale su se od 160 do 235 l/s u vreme uzorkovanja, dok su u testiranoj bušotini IEBOG-2 opitom crpenja, definisane količine vode od 116 l/s (Stevanović, 2010), pri sniženju od svega 1.2 m, što ukazuje da se iz većih dubina mogu zahvatati znatno veće količine. Glavni sistem karstnih provodnika (velikih kaverni) se nalazi na 90-110 m. Ovo čini ovaj sistem ascendentno-gravitacionim sistemom.

Temperatura vode na vrelo je vrlo ujednačena i iznosi oko 13 °C (13.1 do 13.4 °C), dok temperatura vode na bušotini varira i kreće se od 12.7 do 14.5 °C, ukazujući na jako mešanje voda u bušotini. Vrednost pH je oko 7 i veća je u vodama bušotine gde iznosi do 7.6. Elektroprovodljivost vode varira i raste sa dubinom, pa tako na izvoru najveća vrednost iznosi 482 μs/cm, dok u bušotini najveća vrednost iznosi 505 μs/cm. Rastvoreni kiseonik u vodi je vrlo sličan u vodama na vrelo i u bušotini, što ukazuje na jaku

hidrauličku vezu i kreće se od 5.23 do 9.7 mg/l. Mutnoća vode je povišena samo u bušotini i maksimalno iznosi 1.36 NTU, dok je u vodi vrela konstantno ispod 1 NTU, što ukazuje na veoma bistre vode. Mutnoća vode je u bušotini povišena najverovatnije usled priliva voda pri radu pumpe i većim ulaznim filtracionim brzinama, dok kanal vode vrela Mrljiš sprovodi ascendentno vode bez stvaranja pritisaka u stenskoj masi ili aktiviranja sedimenata nataloženih u kanalima, o čemu svedoče i ostali stabilni parametri fizičko-hemijskih karakteristika voda. Rezultati merenja fizičko-hemijskih karakteristika voda prikazani su u tabelama 158 i 159.

Tabela 158. Rezultati monitoringa podzemnih voda vrela Mrljiš

Datum	Q (l/s)	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost (µs/cm)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	235	13.2	7.53	474	6.1	0.9
Proleće	320	13.1	7.5	480	9.7	0.38
Leto	160	13.3	7.43	482	5.5	0.9
Jesen	210	13.4	7.4	472	5.23	0.8

Tabela 159. Rezultati monitoringa podzemnih voda bunara na Mrljišu

Datum	Temperatura (°C)	pH vrednost	Elektroprovodljivost (µs/cm)	Kiseonik (mg/l)	Mutnoća (NTU)
Zima	13.7	7.6	498	6.8	1.3
Proleće	14.5	7.5	486	8.3	1.22
Leto	13.5	7.6	505	5.9	0.9
Jesen	12.7	7.53	480	5.36	1.36

Sadržaj stabilnog izotopa $\delta^{13}\text{C}$ je niži u vodi iz bušotine i kreće se od -8.17 do -9.38 ‰ (tabela 160), dok se u vodi vrela kreće od -8.38 do -9.66 ‰ (tabela 161). Niži sadržaj izotopa ugljenika ukazuje da su vode u bušotini starije i da su duže vremena provele u interakciji sa krečnjačkom stenom. Sadržaj stabilnog izotopa $\delta^{18}\text{O}$ u vodi vrela iznosi -9.88 do -10.50 ‰, dok se u vodi bušotine kreće od -9.93 do -10.50 ‰. Vrednost δD se kreće od -66.16 do -69.23 ‰ u vodi izvora, dok se u vodi bušotine kreće od -69.07 do -71.28 ‰. Obzirom da su vrednosti stabilnih izotopa na izvoru niže od vrednosti u bušotini, potvrđuje se zaključak da vode iz bušotine imaju priliva sveže, atmosferske vode, „privučene“ crpenjem.

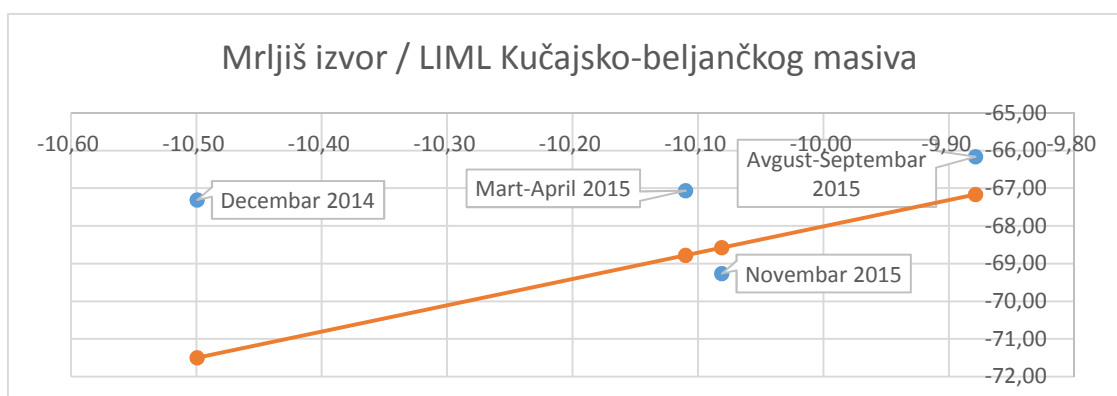
Tabela 160. Sadržaj stabilnih izotopa voda vrela Mrljiš

Mrljiš izvor	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Zima	-9.66	-67.31	-10.50
Proleće	-8.38	-67.06	-10.11
Leto	-8.55	-66.16	-9.88
Jesen	-9.57	-69.26	-10.08

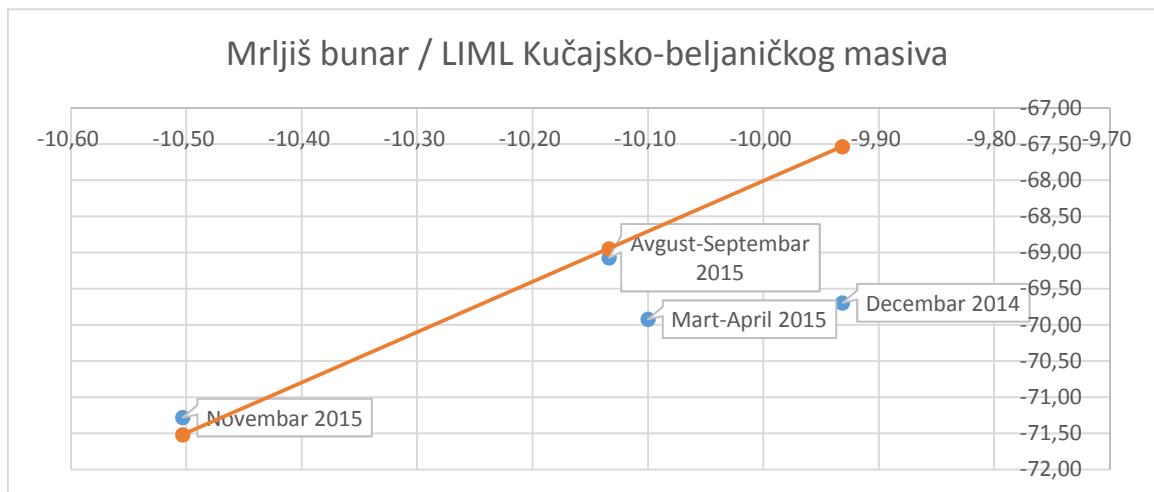
Tabela 161. Sadržaj stabilnih izotopa voda bunara na Mrljišu

Mrljiš bunar	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (V-PDB) ‰	δD (V-SMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW) ‰
Zima	-9.38	-69.69	-9.93
Proleće	-8.32	-69.92	-10.1
Leto	-8.17	-69.07	-10.13
Jesen	-8.38	-71.28	-10.50

Plotovanjem ovih vrednosti na dijagram sa LIML, uočava se veza vrela Mrljiš sa Bogovinskom pećinom (slika 157), gde se vidi da uzorci vrela iz decembra 2014. godine i novembra 2015. godine odgovaraju vodama Bogovinske pećine. Vode vrela Mrljiš iz novembra meseca padaju ispod LIML, što ukazuje na nešto dužu cirkulaciju kroz podzemlje, obzirom na sekundarnu frakcionaciju izvršenu u interakciji vode sa stenskom masom (slika 7.64.).

Slika 7.64. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi izvora Mrljiš

Vrednosti stabilnih izotopa iz bušotine iz novembra 2015. godina i avgust-septembra 2015. godine reflektuju jaku vezu sa atmosferskim vodama, što može biti posledica odloženog uticaja padavina iz prolećnog perioda, dok vrednosti iz aprila 2015. i decembra 2014. godine pokazuju duži boravak u podzemlju (slika 7.65).



Slika 7.65. Sadržaj stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i δD u vodi bušotine na Mrljišu

Kako bi se utvrdila temperatura vazduha koja je vladala u trenutku prihranjivanja vode vrela Mrljiš, izvršeno je utvrđivanje sadržaja plemenitih gasova u vodi (tabela 162). Rezultat je pokazao da je voda vrela Mrljiš infiltrirana u podzemlje pri srednjoj temperaturi vazduha od samo 8.17°C , što je čini najnižom temperaturom prihranjivanja. Ovaj podatak može da ukaže na prihranjivanje vode u ranom prolećnom periodu, ili prihranjivanje na najvišim delovima masiva u prolećnom periodu. Takođe, ovakav temperaturni režim koji odražava značajno hladnije temperature prihranjivanja u odnosu na sve ostale pojave hladnih voda, može da ukaže i na dosta starije vode, koje su se u podzemlje infiltrirale u drugačijim klimatskim uslovima koji su vladali hiljadama godina ranije, međutim, izotopski sadržaj kiseonika i deuterijuma ovu mogućnost isključuju. Ipak, u narednim istraživanjima u okviru masiva je potrebno sprovesti detaljnija izotopska istraživanja na vrelu Mrljiš, uključujući i datiranje voda metodama ^3H , $^3\text{H}/^3\text{He}$ i ^{14}C .

Tabela 162. Sadržaj plemenitih gasova u vodi vrela Mrljiš

Naziv lokacije	He (ccSTP/g)	Ne (ccSTP/g)	Ar (ccSTP/g)	Kr (ccSTP/g)	Xe (ccSTP/g)	R/Ra	T ($^\circ\text{C}$)	chi2-test
Mrljiš	3.5656E-07	2.0061E-07	3.9980E-04	9.1942E-08	1.4703E-08	0.2311	8.17	2.64

Poređenjem rezultata jonskog sastava, uočava se jaka sličnost voda vrela i bušotine Mrljiš. U vodama dominiraju joni Ca^{2+} i HCO_3^- , a pored njih, javljaju se i joni SO_4^{2-} , kao i joni Mg^{2+} , Na^+ i Cl^- (tabele 163 i 164). Sadržaj Ca^{2+} u izvorskoj vodi je viši od sadržaja u vodi bušotine i kreće se od 32.86 do 48.65 mg/l, dok se na bušotini kreće od 31.71 do 42.56 mg/l. Sadržaj HCO_3^- je veći u izvorskoj vodi i maksimalno zabeležena vrednost je u letnjem periodu, kada iznosi 160.83 mg/l, dok maksimalna vrednost u bušotini iznosi 152.05 mg/l, takođe zabeležena u letnjem periodu. Sadržaj sulfata je gotovo isti u vodi sa vrela i iz bušotine i kreće se od 15.08 do 16.28 mg/l. Sadržaj natrijuma je takođe ujednačen i kreće se od 2.14 do 2.63 mg/l, a sadržaj magnezijuma raste minimalno sa dubinom, pa tako najviša vrednost izmerena na vrelu u letnjem periodu iznosi 6.07 mg/l, dok u vodi iz bušotine iznosi 6.377 mg/l.

Tabela 163. Jonski sastav voda vrela Mrljiš

Mrljiš izvor	mg/L								
	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Na^+	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Zima	38.5	0.8787	5.938	2.411	0.043	1.7613	1.5049	15.6415	143.655
Proleće	32.86	0.9314	5.978	2.29	0.05	1.7039	2.641	16.1861	125.2533
Leto	44.28	0.9464	6.07	2.613	0.0442	1.8775	3.3199	15.8824	160.8367
Jesen	48.65	0.9493	5.955	2.537	0.0539	1.907	3.2406	15.7629	146.4

Tabela 164. Jonski sastav voda bunara na Mrljišu

Mrljiš bunar	mg/L								
	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Na^+	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Zima	31.71	0.7982	5.949	2.195	0.0487	1.4231	2.5916	15.4952	120.2717
Proleće	33.23	0.8255	6.029	2.141	0.06	1.3695	1.7161	16.2878	126.4225
Leto	40.05	0.8006	6.377	2.353	0.0544	1.4431	3.0163	15.0856	152.0425
Jesen	42.56	0.8138	6.231	2.4	0.0586	1.4093	2.9204	15.1283	140.3

Na kraju se može zaključiti da vode formirane u okviru sistema Mrljiš imaju veoma slične fizičko-hemijske, jonske i izotopske karakteristike voda, a što govori o približno istoj dubini cirkulacije voda, odnosno ukazuje na činjenicu da i vode vrela Mrljiš zaležu relativno duboko u podzemlje.

7.3. Rezultati multivarijantne statističke analize

U okviru multivarijantne statističke analize izvršena je podela na tri grupe podataka. Analizom su obuhvaćeni osnovni fizičko-hemijski parametri i jonski sastav vode. Ispitivane su veze između dobijenih rezultata i pojava u okviru Kučajsko-beljaničkog masiva, uz razmatranje grupisanja podataka i veze sa izdvojenim karstnim sistemima. Za tumačenja veza, primenjene su faktorska, odnosno metoda glavne komponente i klusterska analiza. Rezultati klusterske analize poslužili su kao potvrda pravilnosti izdvojenih sistema, na osnovu njihovih hidrogeohemijskih sličnosti.

Kako se radi o velikom broju podataka, od kojih jedan broj elemenata ima različite merne jedinice, bilo je neophodno primeniti neki od vidova standardizacije podataka, pa je tako na dve grupe podataka izabrana logaritamska standardizacija uzoraka, dok je u trećoj grupi sprovedena z-transformacija, proračunom standardnih vrednosti, čiji je zadatak da sve promenljive imaju ujednačenu vrednost, odnosno jednaku težinu u analizi (Helena, *et al.* 1999, Güler, *et al.* 2002, Stojković, 2013).

Multivarijantna statistička analiza sprovedena je na grupi podataka, koji su dobijeni na istočnoj strani masiva, gde je obuhvatila:

1. pojave vrela i bušotine Mrljiš, vrela Beljevine i Zlotska vrela,
2. grupaciju gravitacionih vrela sa brзом cirkulacijom (Veliko i Malo vrelo, izvor Epikarst, Grza, Radovansko vrelo, Bogovinska pećina i pećina Živkova reka),
3. grupaciju termalnih voda (Belosavac 2, subtermalni izvor u Suvom Dolu i Krepoljinska banjica, Milanovačka banjica, Krupaja termalni izvor i bušotina, Sisevac bušotina i Krivovirska banjica).

Analize su uvažile podelu rezultata prema lokacijskoj pripadnosti i prema hidrohemijskoj promenljivosti.

7.3.1. Istočna strana Kučajsko-beljaničkog masiva

Za grupu podataka fizičko-hemijskih i jonskih karakteristika voda pojava na Istočnoj strani, odnosno istočnom obodu Kučajsko-beljaničkog masiva, primenjena je klusterska i faktorska analiza, pri čemu je samo klusterska analiza dala rezultate, obzirom da za

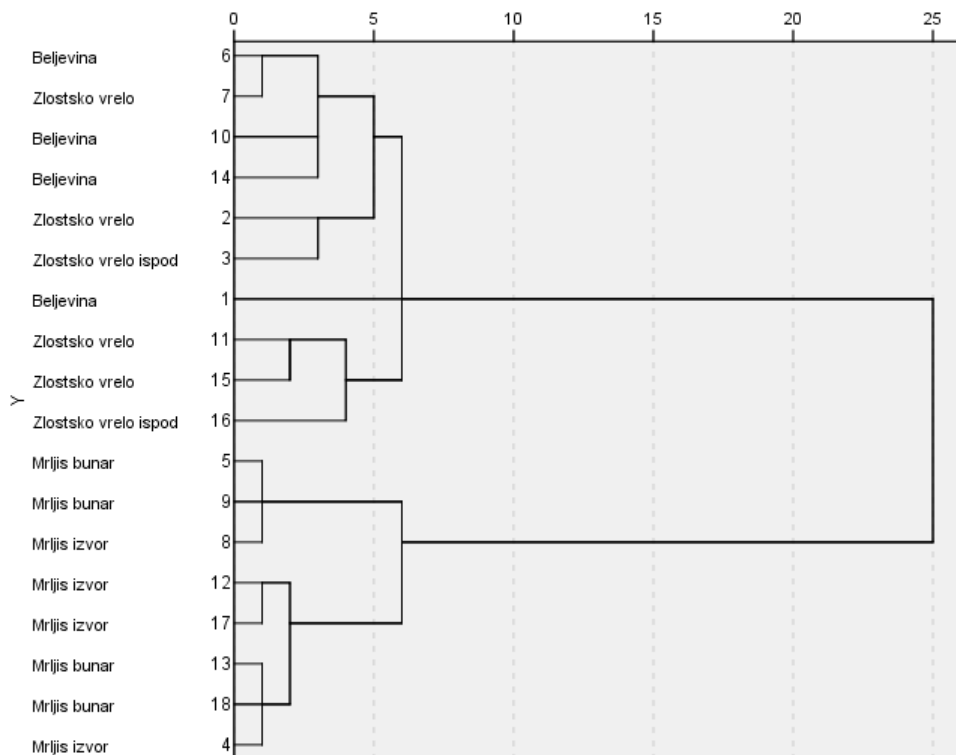
faktorsku analizu baza podataka nije bila dovoljno velika, o čemu će kasnije biti reči. Za klustersku analizu primenjena je standardizacija varijabli z-transformacijom podataka.

U cilju analize grupisanja uzoraka formiran je dendogram primenom hijerarhijskog aglomerativnog metoda (slika 7.66.), u okviru kojeg se uočavaju dva glavna klastera. Jedan klaster izdvaja po svojim sličnostima vode Zlotskih vrela i vrela Beljevine, dok drugi izdvaja vode izvorišta Mrljiš (Mrljiš bunar i Mrljiš izvor). Dva klastera ukazuju da ovi sistemi imaju razlike, koje nisu samo lokacijske, već se razlike uočavaju i u kvalitetu voda, koje prema hidrogeohemijskim uslovima, odražavaju različito vreme vode u podzemlju, drugačije geološke i hidrogeološke karakteristike terena.

U okviru klastera voda vrela Beljevine, uočavaju se dva podklastera. U prvom podklasteru se na najmanjem rastojanju (kvadrat Euklidove distance), nalaze vode sa Beljevine i Zlotskog vrela uzorkovane u prolećnom periodu, koji odgovara periodu velikih voda. Obzirom na veliku blizinu na dendogramu, ukazuju i na visok stepen korelacije parametara ovih voda (što se može uočiti na osnovu sniženih vrednosti svih parametara ovog perioda u setu podataka). U okviru ovog podklastera nalaze se na većem rastojanju vode vrela Beljevine, uzorkovane u letnjem i jesenjem periodu, kojima se zatim na većoj distanci pripajaju vode Zlotskog vrela i vrela ispod pećine, uzorkovane u zimskom periodu. Drugi podklaster povezuje dva uzorka Zlotskog vrela iz letnjeg i jesenjeg perioda, s najmanjom Euklidovom distancom (rastojanjem), kojima se na nešto većoj distanci zatim pripaja Zlotsko vrelo ispod pećine, iz takođe jesenjeg perioda, odnosno perioda najviših koncentracija hidrohemijjskih parametara u vodi, odakle se ovaj podklaster spaja na većoj distanci sa vodama prvog podklastera. Generalno se može uočiti da u periodu velikih voda, vrela Beljevine i Zlotskih vrela imaju slične hidrohemijske karakteristike, dok se u periodu malih voda (sušni period), ova dva vrela dosta razlikuju u pogledu sadržaja jona i osnovnih fizičko-hemijskih karakteristika, što može biti posledica različitih zona prihranjivanja i kontakta sa različitim stenama.

Analiza drugog klastera, koja, takođe, obuhvata dva podklastera, odnosi se na vode izvorišne zone Mrljiš. Na najmanjem rastojanju u okviru prvog podklastera, kao pojave najveće sličnosti, spojene su vrednosti izvora Mrljiš u prolećnom periodu, kao i vrednosti bunara u zimskom i prolećnom periodu. Drugi podklaster na najmanjem rastojanju vezuje izvor u letnjem i jesenjem periodu (zbog dužeg vremena boravka u podzemlju i viših

vrednosti varijabli), dok na većem rastojanju spaja vrednosti bunara iz letnjeg i jesenjeg perioda, sa izvorom u zimskom periodu.

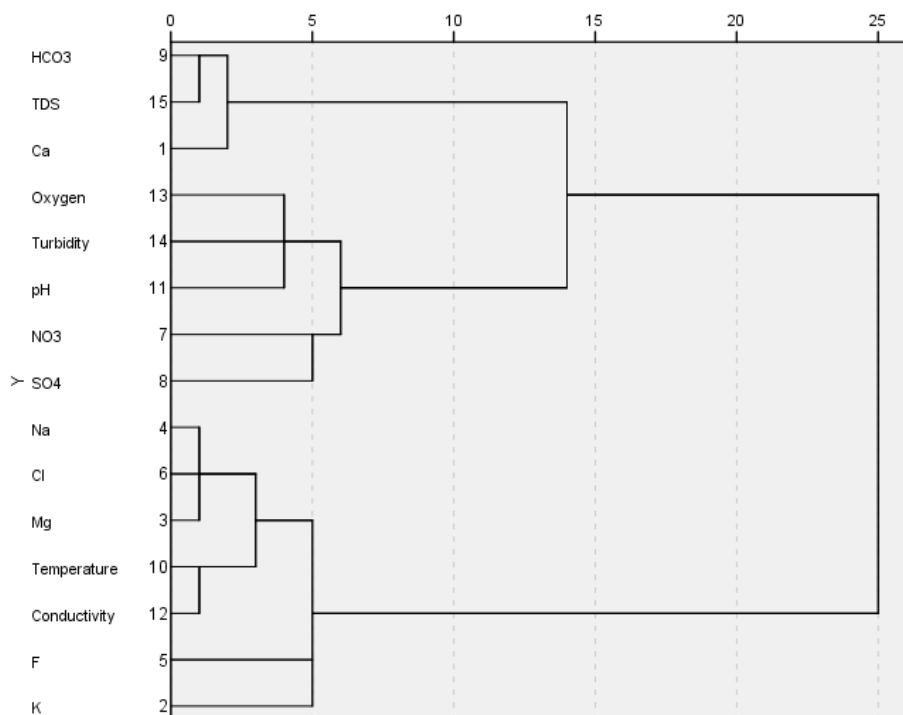


Slika 7.66. Dendrogram pojava na istočnoj strani masiva

Primenom Hijerarhijske klaster analiza (HCA) za grupisanje varijabli (slika 7.67.), izdvajaju se tri klastera. U okviru prvog klastera, kao prvi podklaster i kao najbolja veza, spajaju se HCO_3^- sa TDS-om, koji na nešto većoj distanci vezuju Ca^{2+} . Ova veza je logična i opravdana za vode karstnih izdani. Drugi podklaster spaja O_2 , mutnoću i pH vrednost, kojima se na većem rastojanju pripajaju SO_4^{2-} i NO_3^- , što može da ukaže na prisustvo nekog zagađenja ili na kontakt sa vodama koje dolaze sa terena izgrađenog od paleozojskih škriljaca (Klencuš – Bogovinska pećina – Mrlijš).

Drugi podklaster na malom rastojanju, odnosno u jakoj vezi, spaja Na^+ , Cl^- i Mg^{2+} , kojima zatim pripaja temperaturu i elektroprovodljivost, što ukazuje da se vrednosti ovih jona menjaju sa promenom provodljivosti i temperature, a što je u direktnoj vezi sa sezonskim efektom i količinama voda koje se dreniraju na pojavama. Na znatno većem rastojanju, ovim varijablama se pripajaju vrednosti K^+ i F^- , koji čine poseban podklaster, obzirom na minimalne koncentracije u uzorcima, i slabu korelaciju sa drugim varijablama.

Originalni podaci za sve izmerene varijable su pre podvrgavanja matrice klaster analizi, odnosno pre grupisanja varijabli, z-transformisani.



Slika 7.67. Dendrogram grupacije varijabli za istočnu stranu masiva

FA/PCA Istočne strane masiva

Kako je za faktorsku analizu (*Principal Component Analysis -PCA*) ova baza podataka, odnosno broj uzoraka uzorak bio mali, sadržala je samo 18 slučajeva, Kaiser-Mayer-Olkinov kriterijum je imao vrednost ispod 0.5, što ukazuje da matrica nije dovoljna za faktorizaciju. Iz tog razloga, faktorska analiza za pojave na istočnoj strani nije primenjena.

7.3.2. Vrela sa brzom – gravitacionom cirkulacijom voda Kučajsko-beljaničkog masiva

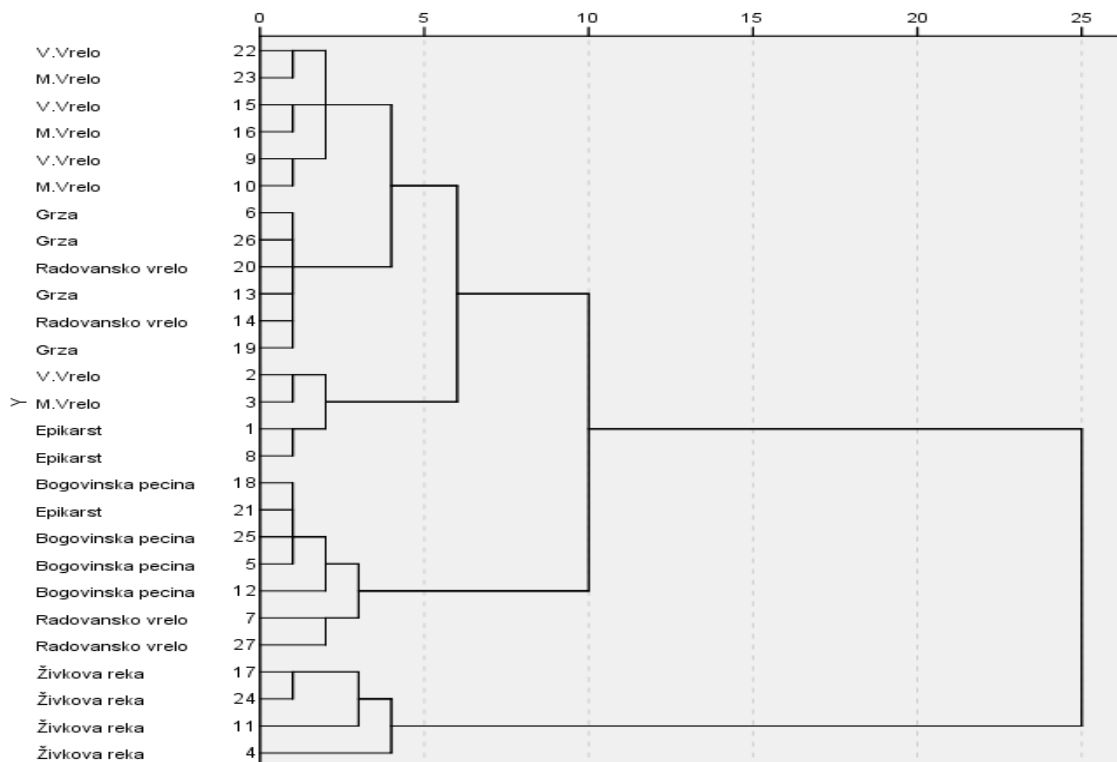
Klasterska analiza – grupisanje po lokacijama

U okviru grupe pojava sa brzom, gravitacionom cirkulacijom, korišćeni su logaritmovani podaci. Generalno se na dendrogramu (slika 7.68.) izdvajaju dva klastera, od kojih je jedan na jako velikom udaljenju od drugih podklastera, objedinjenih u jedan klaster. U pitanju su vode pećine Živkova reka, koje su jakom vezom spojene na osnovu varijabli iz svih

godišnjih doba, što govori da hidrohemijske karakteristike ovih voda u potpunosti odudaraju od drugih hladnih voda sa brзом cirkulacijom, ukazujući na specifične hidrogeološke i geološke uslove izdani. Upravo zbog svoje specifičnosti, ovaj sistem je izdvojen kao posebna celina, čija je opravdanost potvrđena klusterskom analizom.

U prvi podklast svrstane su vode Malog i Velikog vrela u periodu proleća, leta i jeseni. Varijable Malog i Velikog vrela iz ovog perioda ukazuju na jaku vezu. Na većem rastojanju pripajaju im se vrednosti Grze i Radovanskog vrela (Grza za sva 4 perioda, a Radovansko vrelo za prolećni i letnji period), što ukazuje na dosta dobru vezu ove četiri pojave, koja je izražena u maksimumu i minimumu za sve pojave. U jesenjem periodu izražena je veza Grze, Velikog i Malog vrela, odražavajući na taj način tipičan gravitacioni režim i hidrohemijske karakteristike vode u takvim uslovima cirkulacije. Na većem rastojanju, ovom podklasteru se pripaja podklaster voda Malog i Velikog vrela iz zimskog perioda, kao i pripovršinskog izvora Epikarst iz zimskog i prolećnog perioda, što može da ukaže na veći uticaj površinskih voda sa kristalastih škriljaca u periodu malih voda, na vode koje se dreniraju na ovim izvorima, a potvrđeno je da imaju veze sa površinskim vodama sa kristalastih škriljaca.

Na najvećem rastojanju u ovom klasteru, vodama sa brзом cirkulacijom se pripajaju vrednosti Bogovinske pećine (svi periodi), Radovanskog vrela (zimski i jesenji period), kao i vrednosti Epikarsta iz jesenjeg perioda. Varijable po kojima je metod izvukao sličnost su povišeni sadržaji Ca^{2+} , Mg^{2+} i HCO_3^- , gde povišen sadržaj Mg^{2+} može biti posledica prihranjivanja voda sa dolomitičnih krečnjaka.

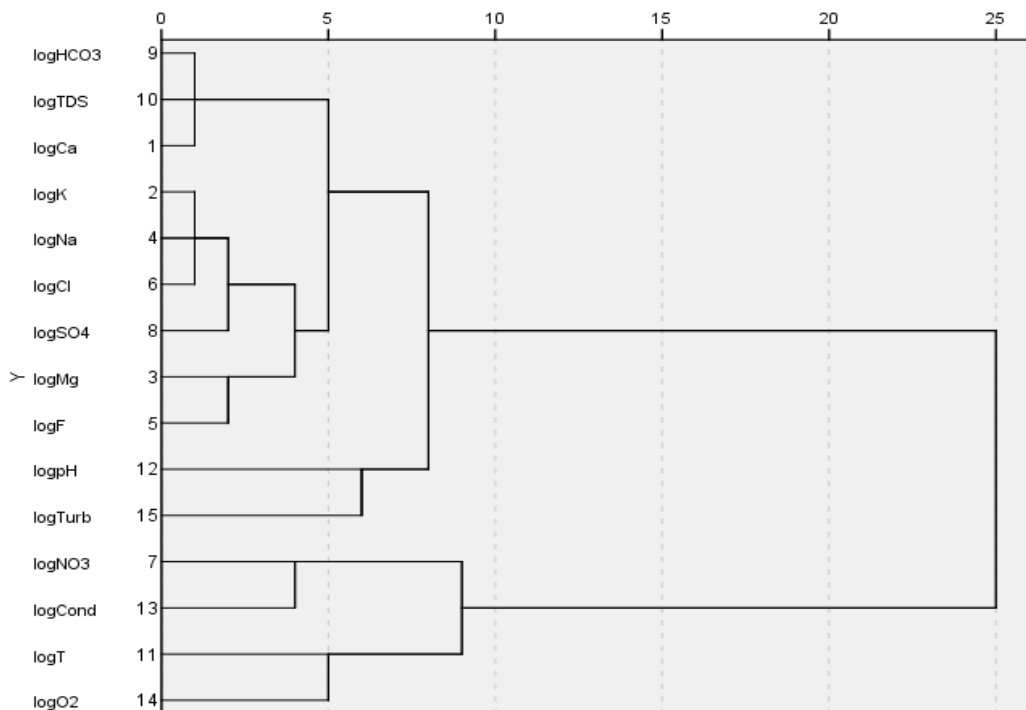


Slika 7.68. Dendrogram pojava sa brzom cirkulacijom na masivu

U okviru analize grupisanja logaritmovanih varijabli, na dendrogramu se uočavaju dva klastera, gde se u okviru prvog izdvajaju tri podklastera, a u okviru drugog dva podklastera, spojena na većem rastojanju (slika 7.69.). U okviru prvog klastera se izdvajaju na najmanjem rastojanju HCO_3^- , Ca^{2+} i TDS, kao najjače korelisane varijable. U okviru drugog podklastera nalaze se joni Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Mg^{2+} i F^- , pri čemu su najbolje korelisani joni Na^+ , K^+ i Cl^- , kojima se na većem rastojanju pripajaju joni SO_4^{2-} . Kao treću grupaciju u ovom podklasteru čine joni Mg^{2+} i F^- , koji se na znatno većem rastojanju vezuju za prethodnu grupaciju jona. Treći podklaster predstavljen je vezom pH vrednosti i mutnoće, koji se s većom distancom vezuju za prvi podklaster. Treći podklaster povezuje dve grupe varijabli, odnosno NO_3^- i elektropovodljivost (bliže vezuje), čineći vezu ovih varijabli jačom u odnosu na vezu temperature i rastvorenog kiseonika O_2 .

Ovako grupisane varijable odlika su voda sa brzom cirkulacijom, pri čemu se jasno izdvajaju parametri sa najvećom sličnošću, odnosno najmanjom vrednošću kvadrata Euklidove distance, HCO_3^- , Ca^{2+} i TDS i Na^+ , K^+ i Cl^- , dok su ostale varijable međusobno

mnogo slabije povezane (veće Euklidovo rastojanje). Veza HCO_3^- , Ca^{2+} i TDS, odlika je karstnih voda, dok prisustvo minimalnih koncentracija Cl^- može biti rezultat atmosferskih padavina, a Na^+ i K^+ mogu biti posledica kratkotrajnog kontakta sa nekom od stena, preko koje voda cirkuliše.



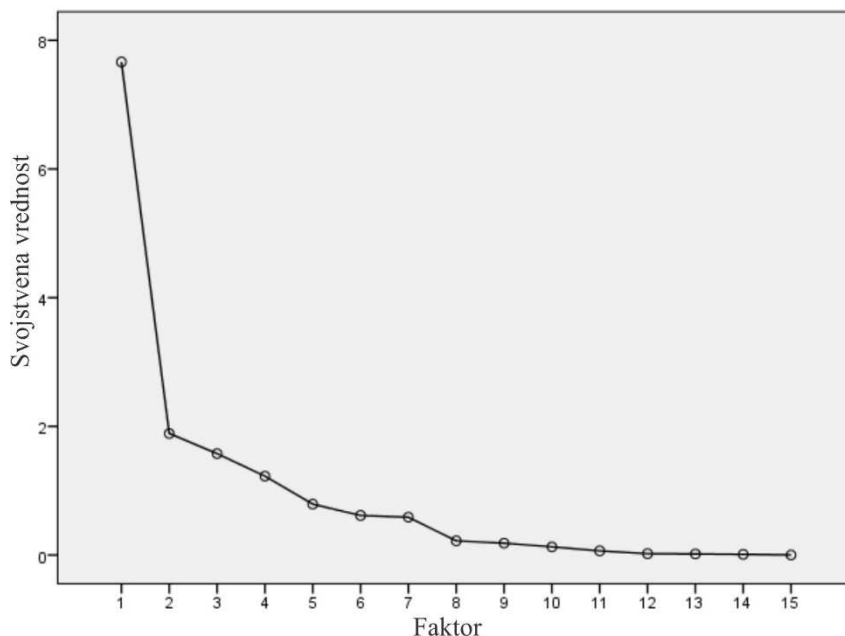
Slika 7.69. Dendrogram grupacije varijabli za istočnu stranu masiva

Faktorska analiza (PCA)

Za proveru podobnosti matrice za faktorsku analizu, korišćen je Kaiser-Mayer-Olkinov (KMO) kriterijum i Bartlettov test sferičnosti. KMO vrednost je iznosila 0.660 (tabela 165), što ukazuje da je matrica faktorijabilna i dovoljna za detaljniju i dalju analizu.

Tabela 165. KMO i Bartlett-ov test	
Kaiser-Meyer-Olkin-ova adekvatnost.	0.660
Bartlett-ov test sferičnosti.	105
	0.000

Na slici 7.70, prikazan je Katelov dijagram lakta (prevoja), koji nam pomaže u odluci o zadržavanju broja komponenti iznad preloma, a kojima se može potpuno objasniti najveći procenat varijanse (Živojinović, 2013).



Slika 7.70. Dijagram prevoja (Katelov grafički test preloma)

U odabiru broja faktora koji će biti izdvojeni i analizirani, korišćeni su Kajzerov kriterijum, dijagram prevoja, odnosno Katelov grafički test preloma i kumulativno procenat varijanse. Kajzerovim kriterijumom se u razmatranju zadržavaju samo komponente čije su svojstvene vrednosti (*eigenvalue*) veće od 1 (Kaiser, 1960), kojih za sistem vrela sa gravitacionom, brzom cirkulacijom ima 4. Dijagram preloma na svojoj x-osi prikazuje faktore, dok na y-osi prikazuje svojstvene vrednosti faktora, a za analizu se uzima broj faktora koji se nalaze na strmijem delu dijagrama, odnosno broj faktora (tačaka) koje se nalaze do najvećeg preloma na dijagramu, pri čemu se odbacuje deo sa blažim nagibom (Cattell, 1966, Stojković, 2013).

U sistemu brze cirkulacije Kajzerov kriterijum zadovoljavaju četiri faktora, dok Katelov dijagram na osnovu preloma krive ukazuje na dva faktora. Kako se sa 4 faktora objašnjava 82.359 % ukupne varijanse analiziranih podataka, usvojena su sva 4 faktora, umesto dva faktora predložena od strane Katelovog grafičkog testa, gde se sa dva faktora objašnjava ukupno 63.673 % ukupne varijanse analiziranih podataka (tabela 166).

Tabela 166. Objašnjenje ukupne varijanse preko svojstvenih vrednosti

Faktor	Početna svojstvena vrednost			Izvučena vrednost varijanse		
	Svojstvena vrednost	% Varijanse	Kumulativni % varijanse	Svojstvena vrednost	% Varijanse	Kumulativni % varijanse
1	7.662	51.082	51.082	7.662	51.082	51.082
2	1.889	12.591	63.673	1.889	12.591	63.673
3	1.576	10.509	74.183	1.576	10.509	74.183
4	1.226	8.176	82.359	1.226	8.176	82.359
5	.791	5.275	87.633			
6	.615	4.099	91.733			
7	.589	3.923	95.656			
8	.221	1.475	97.131			
9	.185	1.232	98.363			
10	.128	.853	99.217			
11	.066	.439	99.656			
12	.022	.147	99.803			
13	.018	.120	99.923			
14	.011	.073	99.996			
15	.001	.004	100.000			

U okviru matrice glavnih komponenti izdvojene su 4 grupe, gde prvoj pripadaju vrednosti Na^+ , TDS, K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , F^- , Ca^{2+} i Mg^{2+} , svi sa jakom korelacijom u opsegu 0.81-0.97. Drugoj grupi pripadaju rastvoreni kiseonik O_2 i elektroprovodljivost, dok trećoj pripadaju temperatura i NO_3^- , a četvrtoj mutnoća sa srednjim faktorskim opterećenjem 0.567 (tabela 167). Jasno se uočava da PCA ima najjaču vezu između većine jona, koji čine prvu i drugu komponentu, izuzev NO_3^- , koje je izdvojila uz temperaturu, i na kraju mutnoću.

Tabela 167. Matrica glavnih komponenti

	Faktor			
	1	2	3	4
logNa	.969			
logTDS	.937			
logK	.931			
logHCO3	.903			.307
logCl	.893		.305	
logSO4	.843			-.352
logF	.831			
logCa	.827			.452

logMg	.814	.350		
pH	.453	-.413	.338	
logO2		.807	-.353	
logCond		.710	.545	
logT			-.631	-.334
logNO3	-.441	.346	.599	.379
logTurb	.436		-.310	.567

U cilju sticanja boljeg uvida u odnose između varijabli, Živojinović (2013) predlaže da se: "matrica glavnih komponenti je podvrgnuta *Varimax* ortogonalnoj rotaciji. Rotiranjem faktora dolazi do redukcije dimenzionalnosti i otkrivanja najpogodnijeg modela sa manjim brojem faktora. Rotacija faktora omogućuje promenu odnosa vrednosti faktorskih opterećenja, čime se olakšava interpretacija modela. Postoji više vrsta rotacija. *Varimax* rotacijom faktora povećava se varijansa kvadrata opterećenja na faktoru na svim varijablama u faktorskoj matrici. Opterećenje se računa za svaku kolonu posebno, pa se dobija veći broj zajedničkih faktora".¹⁰

Rotacijom matrice dobijaju se nešto izmenjene grupacije varijabli, pa se tako u prvoj grupi vezuju joni Na⁺, TDS, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, F⁻, i Mg²⁺, dok se u drugoj izdvajaju Ca²⁺ i HCO₃⁻ sa mutnoćom, u trećoj sadržaj NO₃⁻ i elektroprovodljivost, dok se u četvrtoj grupi našla grupa fizičko-hemijskih parametara: pH, O₂ i temperatura (tabela 168). Ovako vezane varijable pokazuju veće logičnosti i veze sa karstnim sistemima brze cirkulacije, gde se kalcijum i bikarbonati nalaze u jakoj vezi uz pojavu mutnoće, a većina jona uz TDS.

Tabela 168. Rotirana matrica glavnih komponenti sa vrednostima faktorskih opterećenja

	Faktor			
	1	2	3	4
logCl	.929			
logNa	.910			
logK	.879			
logSO4	.868			
logMg	.861			

¹⁰ D. Živojinović: „Razvoj i primena hemometrijskih metoda za klasifikaciju i procenu kvaliteta vode“, str. 38

logF	.756	.409		
logTDS	.727	.658		
logCa	.522	.808		
logTurb		.748		
logHCO ₃	.669	.705		
logCond			.837	
logNO ₃	-.403		.791	
logO ₂				.847
logT			-.319	.695
pH	.463			-.527

7.3.3. Grupacija termalnih voda

Za klustersku analizu termalnih voda korišćeni su logaritmovani podaci. Dobijeni dendrogram se sastoji iz tri glavna klastera (slika 7.71.), koji se dalje dele na podklaster. Poslednji klaster, koji se izdvaja od drugih klastera, grupisao je varijable Milanovačke banjice, izdvajajući ovaj sistem kao poseban, a što i jeste interpretacijom podataka dokazano.

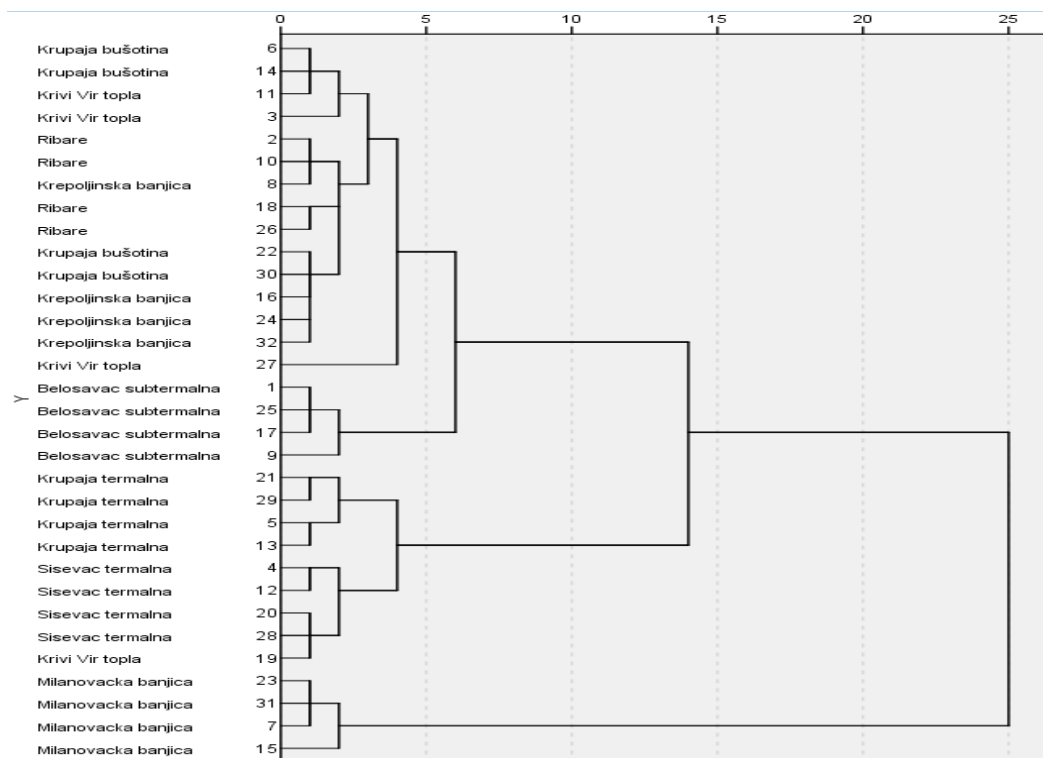
Prvi klaster se sastoji od dva podklastera, u okviru kojih su dalje razvijene grupe. Na najmanjem rastojanju u prvoj grupi se nalaze pojave Krupaje, bušotine iz zimskog i prolećnog perioda, zajedno sa vodama Krivovirske banjice, čije su prolećne vrednosti parametara u jakoj vezi sa bušotinom na Krupaji, dok su na većem rastojanju vrednosti zimskog perioda. Ovo se može objasniti temperaturnom sličnošću vode na ove dve lokacije u prolećnom periodu, dok su u zimskom periodu vrednosti na Krivovirskoj banjici znatno veće i nisu toliko slične bušotini na Krupaji, obzirom da se u tom periodu dreniraju vode sa povišenim sadržajem magnezijuma, natrijuma i hlorida, a koje potiču sa većih dubina.

Dalje se u okviru istog podklastera nalaze vode subtermalne bušotine u Suvom Dolu u zimskom i prolećnom periodu, kao i vrednosti Krepoljinske banjice iz zimskog perioda. Vrednosti subtermalne bušotine u Suvom Dolu, u letnjem i jesenjem periodu izdvojene su kao jako korelisane, a zatim su ovoj grupi pripojene vrednosti bušotine na Krupaji iz letnjeg i jesenjeg perioda, zajedno sa vrednostima Krepoljinske banjice (proleće, leto i jesen). Ovako formiran podklaster spaja se sa podklasterom svih pojava Belosavca 2, čije se vrednosti svih sezona nalaze u jakoj vezi. Razmatranjem ovog klastera izvodi se

zaključak da su se u okviru njega grupisale subtermalne pojave, na osnovu sličnosti u temperaturnom režimu, kao i na osnovu hidrohemijskih karakteristika.

Drugi klaster predstavljaju grupacije varijabli, koje su izdvojile već postojeće sisteme u okviru masiva, pa je tako na najmanjem rastojanju spojen termalni izvor Krupaje iz zimskog i prolećnog perioda, kao i letnjeg i jesenjeg, spajajući ih zajedno na većem rastojanju. Na drugom mestu su spojene vrednosti bušotine u Sisevcu, po istom sistemu kao i vrednosti na Krupaji, izuzev što je grupaciji Sisevca pripojena i vrednost Krivovirske banjice iz letnjeg perioda, kada je temperatura vode iznosila 23.4 °C i imala veoma povišene vrednosti magnezijuma, koje su takođe povišene u vodi bušotine u Sisevcu.

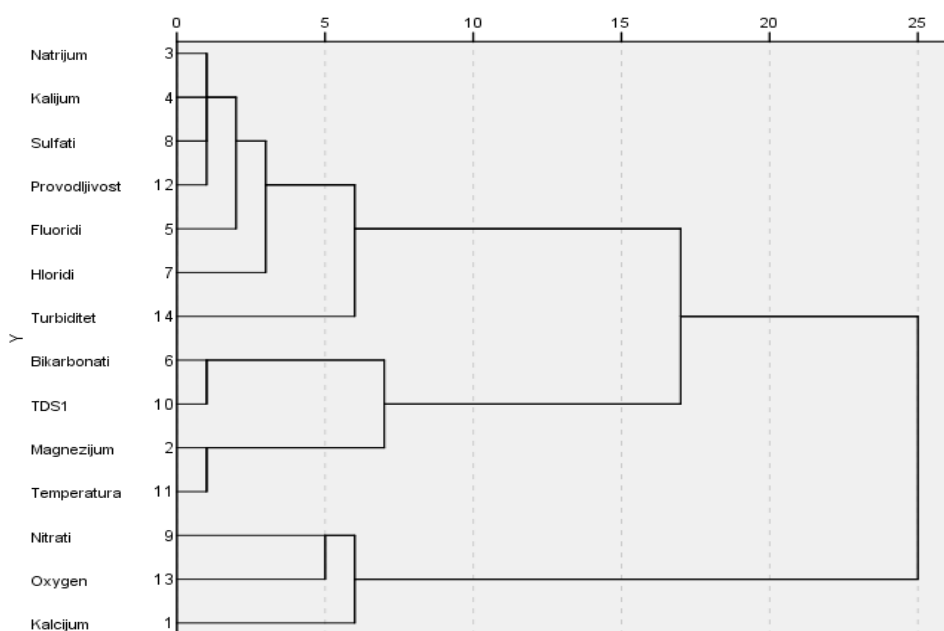
Generalno, može se zaključiti da je klasterska analiza izdvojila sisteme primarno na osnovu njihovih temperaturnih režima, kao i delimično na osnovu hidrohemijskih karakteristika. Pri tome je jasno odvojila sistem Milanovačke banjice, i sistem termalnog izvora na Krupaji i bušotine u Sisevcu, dok je u sistem tzv. prvog klastera, uvrstila pojave subtermalnog karaktera. Na slici 198, prikazan je dendrogram, koji pokazuje lokacijsko grupisanje termalnih voda.



Slika 7.71. Dendrogram termalnih pojava na masivu

Grupisanjem varijabli (slika 7.72.) u okviru termalnih voda Kučajsko-beljaničkog masiva, izdvojena su tri klastera. U okviru prvog klastera izdvojeni su Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , elektroprovodljivost, F^- , Cl^- i mutnoća. Na najmanjem rastojanju, odnosno najbolju korelaciju daju Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , elektroprovodljivost, dok su na većem rastojanju, odnosno sa manjom jačinom veze pripojeni fluoridi, a zatim na još većoj distanci hloridi i mutnoća. Drugi klaster karakteriše pripadnost HCO_3^- , TDS, Mg^{2+} i temperatura. Na najmanjem rastojanju se nalaze grupacije HCO_3^- i TDS, ukazujući na jaku vezu između ukupno rastvorenih materija i bikarbonata, dok se na najmanjoj vezi druge grupacije nalaze Mg^{2+} i temperatura, indikujući vezu da sa porastom temperature raste i sadržaj Mg^{2+} u subtermalnim i termalnim vodama, a što može biti posledica oslobađanja jona Mg^{2+} iz dacita (minerali biotit i hornblenda) u uslovima povišene temperature podzemnih voda.

U trećem klasteru našli su se Ca^{2+} , O_2 i NO_3^- . Ukoliko su vrednosti O_2 i NO_3^- jako korelisane, to može da ukaže na zagađenje, gde se sadržaj NO_3^- povećava, a sadržaj rastvorenog kiseonika, opada u zagađenim vodama. Međutim, kako karstne vode Kučajsko-beljaničkog masiva nemaju takvu vrstu zagađenja u sistemu, veza se može opravdati javljanjem nitrata u periodu velikih voda, kada se kod termalnih voda uočava smanjenje sadržaja Ca^{2+} , koji prati mali porast O_2 i NO_3^- , a što može biti posledica priliva mladih voda u drenirajući kanal duboke sifonalne cirkulacije.



Slika 7.72. Dendrogram grupacije varijabli za istočnu stranu masiva

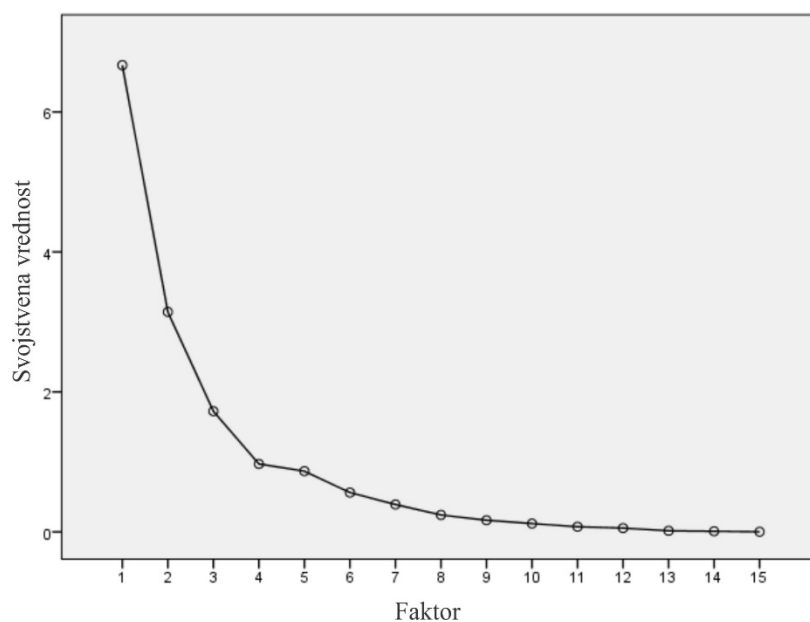
Faktorska analiza (PCA)

Pre primene FA/PCA, određen je KMO kriterijum podobnosti matrice i Bartletov test značajnosti. Dobijena je vrednost KMO 0.573, što je iznad 0.5 i ukazuje da je matrica dovoljna za analizu (tabela 169).

Tabela 169. KMO i Bartlett-ov Test

Kaiser-Meyer-Olkin-ova adekvatnost.	0.573
Bartlett-ov test sferičnosti.	105
	0.000

Katelov grafički test pokazuje četiri faktora do najvećeg preloma (slika 7.73.), ali Kajzerov kriterijum nalaže svega tri faktora, koja objašnjavaju 76.89 % ukupne varijanse analiziranih podataka (tabela 170), a što je dovoljno za analizu izdvojenih grupa.



Slika 7.73. Dijagram prevoja (Katelov grafički test odrona)

Tabela 170. Objašnjenje ukupne varijanse preko svojstvenih vrednosti

Faktor	Početna svojstvena vrednost			Izvučena vrednost varijanse			Početna svojstvena vrednost		
	Svojstvena vrednost	% Varijanse	Svojstvena vrednost	% Varijanse	Svojstvena vrednost	% Varijanse	Svojstvena vrednost	% Varijanse	Kumulativni % varijanse
1	6.669	44.457	44.457	6.669	44.457	44.457	5.874	39.157	39.157
2	3.142	20.948	65.405	3.142	20.948	65.405	3.888	25.919	65.076
3	1.723	11.489	76.894	1.723	11.489	76.894	1.773	11.818	76.894
4	.970	6.464	83.358						
5	.867	5.778	89.136						
6	.562	3.745	92.881						
7	.391	2.607	95.488						
8	.241	1.610	97.097						
9	.166	1.108	98.205						
10	.118	.789	98.994						
11	.073	.490	99.484						
12	.053	.356	99.839						
13	.015	.101	99.940						
14	.008	.053	99.993						
15	.001	.007	100.000						

Posle primene Varimax rotacije, novoformirana matrica ima tri komponente (tabela 171). Prvu grupu čine SO_4^{2-} , K^+ , elektroprovodljivost, Na^+ , Cl^- , F^- , TDS i mutnoća, ukazujući na povišen sadržaj jona sa povećanjem rastvorene materije u vodama i malim povećanjem mutnoće vode, obzirom da su vode subtermalnog i termalnog karaktera izrazito bistre (izuzetak je Milanovačka banjica). Drugu grupu čine Mg^{2+} , temperatura, pH vrednost, O_2 , i NO_3^- , koja, kao i u prethodnoj grupi pojava sa brзом cirkulacijom, ukazuje da sa porastom temperature, raste i sadržaj Mg^{2+} u vodi, a opada pH vrednost i sadržaj rastvorenog kiseonika. Ovo može biti posledica dužeg boravka vode u podzemlju i, verovatno, uticaja mladih vulkanita. U trećoj grupi se nalaze joni Ca^{2+} i HCO_3^- , odražavajući jaku vezu vode sa karbonatima.

Tabela 171 Matrica rotiranih komponenti posle primene *Varimax* rotacije^a

	Faktor		
	1	2	3
Sulfati	.937		
Kalijum	.930		
Provodljivost	.925		
Natrijum	.903	.325	
Hloridi	.839		
Fluoridi	.825	.365	
TDS1	.705	.381	.585
Turbiditet	.615	-.347	
Magnezijum		.928	
Temperatura		.891	
pH		-.630	
Oxygen		-.622	
Nitrati		-.591	
Kalcijum		-.376	.885
Bikarbonati		.624	.735

7.4. Rezultati petroloških i hidrogeohemijskih istraživanja

U okviru petroloških i hidrogeohemijskih istraživanja, sprovedene su analize utvrđivanja sadržaja stabilnog izotopa $\delta^{13}\text{C}$ u steni na 28 lokacija, u cilju definisanja ukupne srednje vrednosti sadržaja $\delta^{13}\text{C}$ u steni za ceo Kučajsko-beljanički masiv, a za potrebe preciznog proračunavanja starosti podzemnih voda.

Takođe, izvršen je eksperiment praćenja rastvaranja karbonatne stene u realnim uslovima, pri čemu je ispitivana razlika u masi pločice, odnosno koliko se karbonatna pločica devonske starosti sa visokim sadržajem CaCO_3 , rastvorila u vremenu u različitim prirodnim uslovima. Na terenu je postavljeno 20 pločica. Takođe, izvršena je i analiza starosti jednog stalagmita.

Na kraju, u vodi je na određenim pojavama hladnih i toplih voda vršeno utvrđivanje sadržaja mikroelemenata u vodi, sa ciljem da se definiše eventualno postojanje jakog uticaja mladog vulkanizma na subtermalne i termalne vode. Kako se proboji vulkanita koncentrisano nalaze po severozapadnom i zapadnom obodu masiva, u razmatranje su uzete pojave koje se nalaze duž javljanja proboja vulkanita, sa izuzetkom pojava u Krivom Viru i Mrljiša.

Generalno, sadržaj stabilnog ugljenika $\delta^{13}\text{C}$ u steni se kreće oko 0 ‰, pa se u proračunima starosti voda, gde ne postoji informacija o sadržaju ugljenika u steni, koristi upravo ova vrednost. Međutim, kako je svaki planinski masiv slučaj za sebe, i kako uvrštavanje generalne vrednosti stabilnog ugljenika u steni može značajno promeniti stvarne starosti voda, za Kučajsko-beljanički masiv je utvrđena realna vrednost $\delta^{13}\text{C}$, dobijena osrednjavanjem sadržaja $\delta^{13}\text{C}$ sa 27 lokacija. Vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ u stenama Kučajsko-beljaničkog masiva se kreću od -0.42 (na vrelu Belosavac) do 2.91 ‰ (izvor Epikarst), sa izuzetkom vrednosti od -10.47 ‰, dobijenom utvrđivanjem sadržaja $\delta^{13}\text{C}$ u bigrenim naslagama kod Malog vrela, a koje predstavljaju najmlađu stensku masu u okviru masiva (tabela 172). Kako bigrene naslage nisu od značaja za formiranje sadržaja $\delta^{13}\text{C}$ u vodi, ova vrednost je isključena iz srednje vrednosti $\delta^{13}\text{C}$ za stene masiva. Proračunom srednje vrednosti, dobijeno je da ukupni sadržaj $\delta^{13}\text{C}$ u matičnim stenama Kučajsko-beljaničkog masiva iznosi 1.37 ‰, a što je i korišćeno u proračunima starosti podzemnih voda masiva.

Tabela 172. Sadržaj izotopa $\delta^{13}\text{C}$ u steni na lokacijama Kučajsko-beljaničkog masiva

Redni broj uzorka	Lokacija	$\delta^{13}\text{C}$ (V-PDB) ‰
1	Busovata ponor	2
2	Mlava	0.48
3	Belosavac	-0.42
4	Suvi Do subtermalna	2.29
5	Krepoljinska banjica	1.75
6	Milanovačka banjica	2.75
7	Krupajsko vrelo	2.58
8	Živkova reka	2.34
9	Veliko vrelo	1.29
10	Malo vrelo	0.62

11	Malo vrelo - bigar	-10.47
12	Grza	2.66
13	Crni Timok	0.98
14	Krivovirska banjica	0.5
15	Sisevac	2.1
16	Ponor Rečke	0.27
17	Ponor Suvi do	1.91
18	Izvor epikarst	2.91
19	Izvor Suvi do	2.48
20	Radovansko vrelo	2.3
21	Ponor Velike Brezovice	0.19
22	Ponor Gajine Mlake	-1.43
23	Ponor Nekudovo	0.34
24	Ponor Vojal	1.05
25	Beljevina	0.38
26	Zlotsko vrelo	2.61
27	Bogovinska pećina	0.61
28	Mrljiš	1.47

Merenje karbonatnih pločica na analitičkoj vagi velike preciznosti pokazalo je da se početne vrednosti kreću od 10.4793 gr do 13.7360 gr (tabela 173). Pločice su boravile na terenu, izložene realnim terenskim uslovima 18 meseci, odnosno godinu i po dana, sa izuzetkom tri pločice, koje su, nakon nestanka, zamenjene novim pločicama, nakon čega su na terenu boravile 11 meseci.

Tabela 173. Rastvaranje karbonatnih pločica

	Lokacija	Sr. T vode (°C)	TDS (mg/l)	Masa pločice pre postavljanja (gr)	Masa pločice nakon rastvaranja (gr)	Razlika u masi (gr)	Vreme boravka na terenu (br. Meseci)	Rastvorena masa po mesecu gr/mes
Ponori	Ponor Busovata (voda)	7.78	53.5	12.5267	8.8425	-3.6842	18	0.2047
	Ponor Rečka (voda)	5.55	80.62	13.8159	11.9483	-1.8676	18	0.1038
	Ponor Suvi Do (voda)	7.8	249.97	12.1059	12.3380	+0.2321	11	+0.0211
Hladne vode	Mlava (voda)	9.43	273.21	12.9025	12.8586	-0.0439	11	0.0039
	Belosavac 1 (voda)	9.88	202.45	13.3582	13.0428	-0.3154	18	0.0175
	Malo vrelo (voda)	9.38	177.87	11.8626	13.9387	+2.0761	18	+0.1153
Subtermalni izvori	Krupaja termalni izvor (voda)	26.33	277.9	11.7214	11.6751	-0.0463	11	0.0042
	Suvi Do subtermalna (voda)	19.8	233.48	12.7873	12.7598	-0.0275	18	0.0015
	Krepoljinska banjica (voda)	16.73	213.61	11.6810	11.6343	-0.0467	18	0.0026
	Belosavac 2	14.95	218.07	12.2465	13.1078	+0.8613	18	+0.0479
	Milanovačka banjica (voda)	22.3	387.58	11.7624	11.7530	-0.0094	18	0.0005
Površina terena	Busovata bor (vazduh)	-	-	12.3783	12.3396	-0.0387	18	0.0022
	Busovata bukva (vazduh)	-	-	12.0745	11.8607	-0.2138	18	0.0119

	Epikarst bor (vazduh)	-	-	11.4484	11.3821	-0.0663	18	0.0037
	Epikarst (površina terena)	-	-	11.9013	11.8476	-0.0537	18	0.0029
Pećina	Živkova pećina - (voda)	8.83	364.3	11.8449	11.8438	-0.0011	18	0.0001
	Živkova pećina - (vazduh)	-	-	13.3630	13.3800	+0.017	18	+0.0009
Zemljište	Epikarst u zemlji 1	-	-	13.7360	13.7171	-0.0189	18	0.0011
	Epikarst u zemlji 2	-	-	12.5231	12.4474	-0.0757	18	0.0042
	Epikarst u zemlji 3	-	-	10.4793	10.4393	-0.04	18	0.0022

Ponovnim premeravanjem pločica na analitičkoj vagi, došlo se do saznanja da su u najvećoj meri rastvorene pločice postavljene u zoni ponora Busovate i Rečke, koje su za 18 meseci izgubile -1.8676 gr na Rečkoj, odnosno čak -3.6842 gr na Busovati. Izuzetak je pločica koja je postavljena na ponoru Suvog dola, gde je došlo do povećanja težine pločice od +0.2321 gr, nakon 11 meseci, što može biti posledica povišene koncentracije TDS u ponorskoj vodi zbog ulivanja karstnih voda vrela Buka i obaranja kalcijum-karbonata izdvajanjem CO₂, tokom površinske cirkulacije.

Upravo koncentracije TDS u vodi ukazuje da se najveću rastvaračku moć imaju vode koje su najmanje obogaćene rastvorenim materijom u vodi, kao što je slučaj ponora Busovate. Rastvorena količina od 0.2047 gr na mesečnom nivou, posledica je veoma niskog sadržaja mineralnih materija u vodi (53.5 mg/l). Upravo ovako nizak sadržaj rastvorenih materija u vodi, koji odgovara sadržaju padavina, jedan je od glavnih uslova pojačane karstifikacije u pripovršinskom sloju stenske mase, što nije posledica agresivnosti vode, već nezasićenja (vode) rastvora, koji lakše vezuje mineralne materije iz stene.

Rastvaračka moć hladne izvorske vode, dosta je niža u odnosu na vode ponorske zone, što je posledica obogaćenih rastvora i koncentracija TDS do 273.21 mg/l. Pločica na vrelu

Mlave boravila je sedam meseci kraće u odnosu na vrelo Belosavac, pa je stoga i manje rastvorena. Međutim, proračunom srednje mesečne rastvorene vrednosti, dobija se da se na Belosavcu na mesečnom nivou, rastvori veća količina krečnjaka od 0.0175 gr/mes, u odnosu na vrelo Mlave, gde je rastvoreno 0.0039 gr/mes, a što je posledica razlike u količini TDS u vodi, samim tim i njene sposobnosti da veže veće sadržaje jona.

Izuzetak u masi pločice, vezan za hladne izvorske vode, predstavlja Malo vrelo, čija je pločica u vodi dobila +2.0761 gr, ali što nije posledica količine rastvorene materije u vodi, već mesta na kome je postavljena pločica. Naime, pločica je postavljena u otvorenom toku Malog vrela, oko 50 metara od ulaza u pećinski otvor odakle voda izbija na površinu. Kako pri izlasku podzemne vode iz pećine na površinu terena dolazi do obaranja karbonata iz vode i formiranja bigrenih naslaga (bigreni plato ispod Malog vrela), to se i na površini pločice istaložio sloj bigra (vidi sliku 91, iz poglavlja 5.3). Ono što je značajno je da se na mesečnom nivou, na veoma maloj površini pločice od svega 11.34 cm² istaloži 0.1153 gr bigrenih naslaga.

Pločice postavljene u subtermalnim i termalnim izvorima pokazale su rastvaranje u rasponu od 0.0005 gr u vodi Milanovačke banjice, koja ima koncentraciju TDS od čak 387.58 mg/l, do maksimalnih 0.0042 gr u termalnom izvoru na Krupaji. Iako sa povišenom temperaturom vode, nije uočena veća razlika u odnosu na rastvaračku snagu hladnih voda, već se uočava zavisnost opadanja rastvaračke moći sa porastom TDS u vodi, bez obzira na temperaturu vode. Takođe, i kod subtermalnih voda se uočava izuzetak, težina pločice u vodi izvora Belosavac 2 povećala se za +0.0479 gr na mesečnom nivou, što nema veze sa koncentracijom TDS u vodi, već može da ukaže na drugačije geohemijske uslove koji vladaju na većim dubinama.

Rastvaranje pločica na površini terena i u zemljištu se u proseku kreće od 0.0011 do 0.0119 gr za period od 18 meseci, a najveći gubitak u masi uočen je na površini terena, što može biti posledica udružene mehaničke i hemijske erozije stene.

Pločice postavljene u vazduhu i u vodi u pećini, pokazale su drugačije uslove rastvorljivosti. Naime, količina rastvorenog karbonata u vodi na mesečnom nivou iznosi svega 0.0001 gr, što se opravdava veoma povišenom koncentracijom TDS u vodi pećine Živkova reka, dok je pločica postavljena u vazduhu dobila na svojoj težini masu od +0.0009 gr. Povećanje težine pločice u vazduhu se može pripisati minimalnim

procurivanjem vode kroz sitne pukotine koje se nalaze na pećinskoj tavanici i kapanju po pločici koja je postavljena ispod njih.

Iako je eksperiment dao zadovoljavajuće rezultate, koji ukazuju na vezu sadržaja rastvorenih materija u vodi, naročito kod ponorskih voda, sa stepenom rastvaranja stenske mase, bez značajnog uticaja temperature, neophodno je nastaviti istraživanja tokom višegodišnjeg perioda, kako bi se doneli bolji zaključci.

U pogledu sadržaja mikroelemenata, hladne, subtermalne i termalne vode ne sadrže ni minimalne koncentracije Mn, Cr, Cu i Ni. Bitno je napomenuti da se sadržaji mikroelemenata detektovani u podzemnim vodama nalaze ispod maksimalno dozvoljenih vrednosti. U svim vodama zabeležen je sadržaj Sr, koji je naročito izražen u subtermalnim i termalnim vodama, a koji se zapravo često javlja zajedno sa kalcijumom, pa se smatra i njegovim pratiocem. Stojković (2013) navodi, da zbog veličine jonskog radijusa, koji je sličan kalcijumu i kalijumu, stroncijum u kristalnim rešetkama mnogih glavnih i akcesornih minerala, može da zamenjuje ova dva mikroelementa. Sadržaj mikroelemenata u uzorcima vode, prikazan je u tabeli 174.

Sadržaj stroncijuma u hladnim vodama kreće se od 48.3 µg/l, koliko iznosi na Krupajskom vrelu, pa do 69.3 µg/l na vrelu Crnog Timoka. Povišen sadržaj Sr konstatuje se u svim uzorcima subtermalnim i termalnih voda, pa se kod subtermalnih javljaju koncentracije od 111.3 µg/l (Krepoljinska banjica) do 177.3 µg/l (Krivovirska banjica), dok su najviše vrednosti zabeležene na termalnim vodama Sisevca (212.3 µg/l), Krupaje (341.3 µg/l) i u Milanovačkoj banjici, koja ima najviše vrednosti od čak 459.7 µg/l. Na osnovu ovoga se zaključuje da je sadržaj Sr raste sa porastom temperature, odnosno najniži je u hladnim vodama, zatim je nešto veći u subtermalnim vodama, dok je najviši u termalnim vodama. Obzirom da njegov sadržaj nije najveći u vodi najviše temperature, kao ni u vodi najveće starosti, izvodi se zaključak da sadržaj Sr u vodama zavisi od dubine cirkulacije podzemnih voda i prolongiranog kontakta sa stenom.

Relativno povišen sadržaj gvožđa, detektovan je u tri uzorka, odnosno na vrelu Crnice, gde ima najviše vrednosti od 137.5 µg/l, zatim niže vrednosti od 66.5 µg/l na Krivovirskoj banjici i na Milanovačkoj banjici 18.5 µg/l. Sadržaj gvožđa može biti posledica nekog od akcesornih minerala koji se javljaju u stenama. Sadržaj Zn se javlja u sistemu Sisevca,

odnosno raste sa temperaturom vode, pa tako na vrelu Crnice njegov sadržaj iznosi 0.77 $\mu\text{g/l}$, dok na termalnoj vodi bušotine SIS-1, iznosi 2.27 $\mu\text{g/l}$.

Koncentracije mikroelementa Li ukazuju na značajan kontakt podzemne vode sa magmatskim stenama, naročito stenama paleogenog magmatizma, a što je slučaj proboja vulkanita na zapadnoj strani Kučajsko-beljaničkog masiva. Sadržaj Li od 33 $\mu\text{g/l}$ detektovan je samo na termalnom izvoru Milanovačke banjice. Litijum pokazuje sličnost po veličini jonskog radijusa sa magnezijumom, pa ga neretko zamenjuje u kristalnim rešetkama minerala (Hitchon 1999, Reimann & Birke 2010, Stojković, 2013). Upravo iz tog razloga se u vodi Milanovačke banjice javljaju niže vrednosti magnezijuma do 5.9 mg/l. U podzemnim vodama sadržaj litijuma je uglavnom nizak i kreće se od 0.01 do 0.5 $\mu\text{g/l}$, dok povišene vrednosti mogu biti posledica evaporacije u slučaju slanih jezera, priliva konatnih voda sa većih dubina, koje su veoma bogate litijumom, kao i posledica geotermalnih procesa vezanih za savremeni magmatizam i vulkanizam, a u termalnim vodama može iznositi i nekoliko desetina mg/l (Hitchon 1999, Stojković, 2013). Generalno, sadržaj Li u podzemnoj vodi Milanovačke banjice bi se mogao vezati za savremeni vulkanizam koji se u tercijaru odvijao na području Karpato-balkanida, međutim, jako povišene koncentracije natrijuma i hlorida, koje se takođe javljaju u vodama i prate sadržaj Li, mogu da ukažu na priliv voda sa znatno veće dubine. Upravo, to ide u prilog nemogućnosti proračuna starosti vode na Milanovačkoj banjici, što ukazuje da, ukoliko ove vode potiču sa jako velikih dubina, imaju starost znatno veću od one koja se može proračunati metodom ^{14}C .

Arsen je detektovan u svim analiziranim uzorcima, a najniža vrednost konstatovana je na Milanovačkoj banjici (3.3 $\mu\text{g/l}$). U većini uzoraka kreće se do 10 mg/l, izuzev u uzorcima bušotine SIS-1 (14.1 $\mu\text{g/l}$) i bušotine B-1 (14.7 $\mu\text{g/l}$), a najveća vrednost od čak 22.7 $\mu\text{g/l}$, zabeležena je na termalnom izvoru u Krupaji.

Sadržaj fosfora je detektovan u svim analiziranim uzorcima i vrednosti se kreću uglavnom preko 20 $\mu\text{g/l}$, sa izuzetkom Milanovačke banjice, čiji sadržaj u vodi iznosi 12 $\mu\text{g/l}$. Vrednosti od 34 i 35 $\mu\text{g/l}$, konstatovane su u vodama vrela Crnice i Krivovirskoj banjici. Poreklo fosfora u vodi potiče od raznih oblika kalcijum-fosfata, čije se rasprostranjenje nalazi i u okviru sedimentnih stena. Kako sadržaj fosfora nije zastupljen u vodi u visokim koncentracijama, isključuje se mogućnost njegovog porekla od zagađenja.

Silicijum je u većini uzoraka nešto povišen, a najniži je u hladnim vodama. Sadržaj ovog mikroelementa zastupljen je u okviru svih stena (magnatske, metamorfne i sedimentne), pa je stoga teško odrediti poreklo ovog elementa u podzemnim vodama. U hladnim vodama se nalazi u koncentracijama do 5.4 mg/l, što može da ukaže na koncentracije silicijuma koje su oslobođene iz sedimentnih stena. U subtermalnim vodama se kreće od 8 do 10.7 mg/l, ukazujući na bogaćenje vode ovim mikroelementom tokom dužeg i prolongiranog kontakta stene i vode. Najviše koncentracije silicijuma u vodi uočavaju se na izvorima Milanovačke banjice (21.9 mg/l) i Krupaje (19.4 mg/l), koje bi, pored silicijuma iz sedimentnih stena, mogle da ukažu na silicijum mlađih vulkanita.

Tabela 174. Sadržaj mikroelemenata u vodama Kučajsko-beljaničkog masiva

µg/L	1 Ribare	2 Vrelo Crnic	3 Siseva c termalna	4 Mrljiš bušotina	5 Mrljiš izvor	6 Crni Timok	7 Krivi Vir termalna	8 Krepoljinska banjica	9 Milanovačka banjica	10 Krupaja izvor	11 Krupaja Termalni izvor	12 Krupaja bušotina
Fe	< 0.5	137.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	66.5	< 0.5	18.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Mn	0.75	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
Cr	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Sr	139.3	57.3	212.3	66.3	67.3	69.3	177.3	111.3	459.7	48.3	341.3	169.3
Li	< 16	< 16	< 16	< 16	< 16	< 16	< 16	< 16	33	< 16	< 16	< 16
Zn	< 0.03	0.77	2.27	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03
Cu	< 0.25	< 0.25	< 0.25	< 0.25	< 0.25	< 0.25	< 0.25	< 0.25	< 0.25	< 0.25	< 0.25	< 0.25
As	9.6	6.9	14.1	7.4	6.7	8	9	7.9	3.3	8.7	22.7	14.7
Ni	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
P	24	34	20	27	27	25	35	21	12	28	21	24
Si (Mg/l)	9.2	4.8	9.7	4.9	5.4	3	10.7	8	21.9	3.4	19.4	10.2

Generalno, sadržaj mikroelemenata u vodi može da ukaže na dejstvo prolongiranog kontakta vode sa stenama tercijarnog magmatizma, koji takođe može i da dovede do povećanja temperatura voda na većim dubinama, ali svakako da najveći doprinos ovakvom hidrogeohemijskom sastavu i temperaturnom režimu voda, daje vreme boravka vode u podzemlju, kao i dubina zaleganja pukotina i kanala, kojima se voda kreće do većih dubina, u kojima vladaju potpuno drugačiji hidrogeohemijski uslovi.

U okviru ovog poglavlja, razmotren je i rezultat analize stalagmita koji je uzorkovan u Bogovinskoj pećini. Za potrebe rada disertacije izvršeno je uzorkovanje 2 stalagmita, ali zbog veličine stalagmita iz pećine Velika Atula, analiziranje uzorka je još uvek u proceduri u laboratoriji IRCK-a.

Stalagmit iz Bogovinske pećine nije ubran, već je uzet odlomljeni stalagmit dužine 27 cm i prečnika \varnothing 12 cm u korenu stalagmita, koji se nalazio, na višem nivou, odnosno pri vrhu glavnog pećinskog kanala, oko 450 metara od ulaza u pećinu. Kako stalagmit nije ubran, odnosno kako nije bio u fazi aktivnog rasta, nije bilo moguće da se utvrde paleoklimatski uslovi koji su vladali u prošlosti u oblasti Kučajsko-beljaničkog masiva, ali je bilo moguće izvršiti dataciju starosti stalagmita i odrediti vreme kada je počelo njegovo formiranje. Primenom formula za datiranje, prikazanih u okviru poglavlja 5.3, izvršeno je datiranje stalagmita, a rezultat analiziranja starosti stalagmita, prikazan je u tabeli 175.

Tabela 175. Rezultati datiranja stalagmita

BR uzorka	²³⁰ Th datiranje									
	²³⁸ U	²³² Th	²³⁰ Th / ²³² Th	d ²³⁴ U	²³⁰ Th / ²³⁸ U	²³⁰ Th Starost	²³⁰ Th Starost	d ²³⁴ U _{Initial}	²³⁰ Th godine (pre danas)	
	(ppb)	(ppt)	(atomic x10 ⁻⁶)	(izmeren)	(aktivnost)	(greška)	(korekcija)	(korekcija)	(korekcija)	(korekcija)
S-1	170	385	8028	485.4	1.1007	132181	132142	705	132.078	±1350
S-2	141	180	10399	51.9	0.8049	154729	154694	80	154.630	±1903

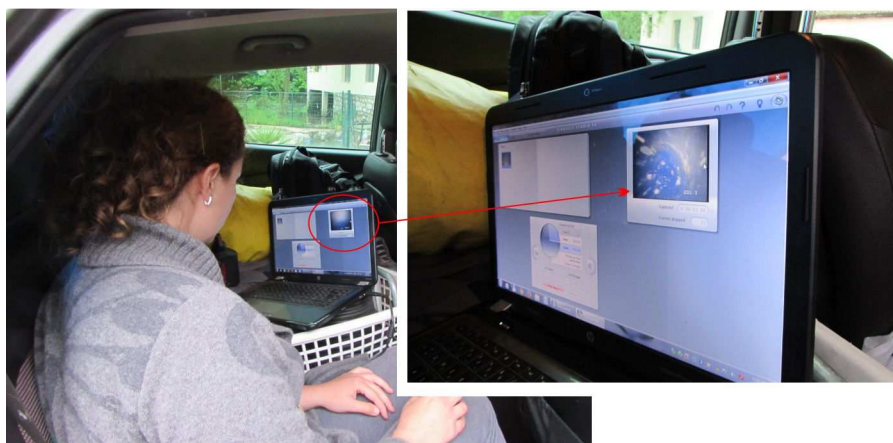
Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 175, vidi se da je formiranje stalagmita počelo pre 154.630 ± 1.903 godine, što daje važnu informaciju o aktivnosti kanala i procesu karstifikacije u okviru ovog dela masiva. Naime, formiranje stalagmita moguće je samo kada je pećinski kanal suv, odnosno kada nema stalno aktivan tok, pa se izvodi zaključak da je pre početka formiranja stalagmita, glavni kanal Bogovinske pećine konstantno bio aktivan, odnosno pod vodom. Od pre 154.630 godina, nivo vode u pećinskom se kanalu, se usled karstifikacije, spušta, odnosno deo bliže tavanici kanala gde je stalagmit pronađen, postaje suv u određenim periodima godine, što rezultira uslovima za rast stalagmita.

Formiranje stalagmita je, usled nekog od prirodnih faktora, prekinuto pre 132.078 ± 1.350 godina (starost korena stalagmita), što je rezultiralo krajnjom starošću stalagmita od 22.552 godina, koliko je bilo potrebno da se formira stalagmit dužine 27 cm i prečnika 12 cm. Analizom stalagmita nisu definisani paleoklimatski uslovi koji su vladali u prošlosti niti su utvrđeni faktori koji su uticali na prekid u formiranju stalagmita, kao ni periodi aktivnog formiranja stalagmita.

7.5. Rezultati videoendoskopskih i karotažnih ispitivanja

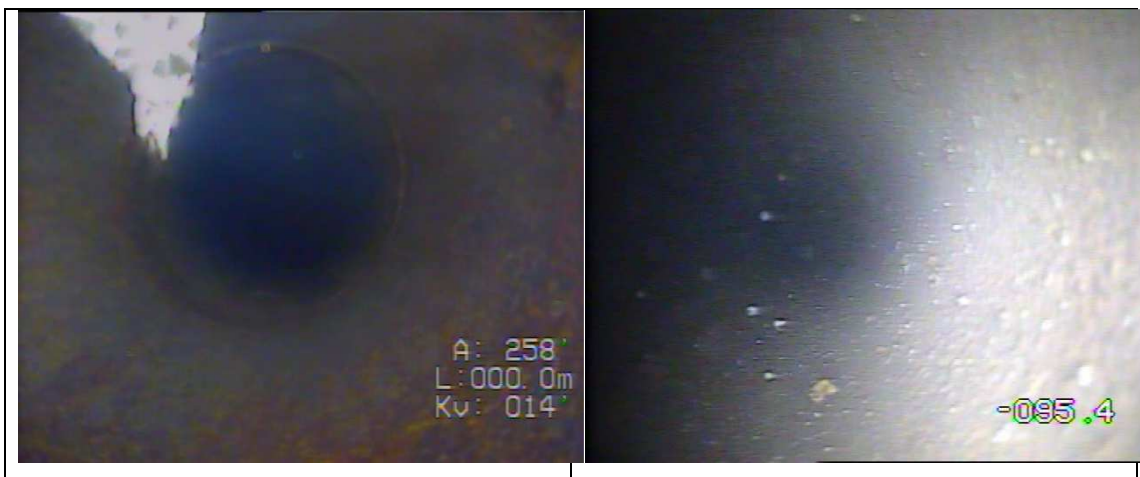
Kako na Kučajsko-beljaničkom masivu ne postoji adekvatan broj objekata na kojima bi se izvela ova istraživanja (za značajniju statističku obradu), i ovako skroman broj podataka je doprineo stvaranju slike o stepenu i dubini karstifikacije, pogotovo u korelaciji sa podacima dobijenim kroz druga istraživanja.

U okviru istraživanja za potrebe izrade doktorske disertacije, odnosno definisanja dubine zaleganja karstnih kanala (stepena karstifikacije), izvedena su videoendoskopska istraživanja bušotine B-1, prilikom čega je izvršeno snimanje do dubine od 300 m, odnosno do -80 m n.m. Videoendoskopija bušotine B-1, izvedena je u dva navrata 2014. i 2016. godine (slika 7.74.). U istraživanjima su učestvovali članovi Centra za hidrogeologiju karsta (gde je i razvijen sistem za videoendoskopiju), Departmana za hidrogeologiju, Rudarsko-geološkog fakulteta, u Beogradu.



Slika 7.74. Izvođenje videoendoskopskih istraživanja u bušotini B-1

Videoendoskopija bušotine izvedena je u dva koraka i to kamerom za vertikalno snimanje do 298 m dubine i rotacionom do 291 m. Snimanjem bušotine uočeno je da je stanje bušotine do 128 m, odnosno stanje konstrukcije zadovoljavajuće, sa manjim karbonatnim naslagama na šavovima cevi (slike 7.75. i 7.75.).



Slike 7.75. i 7.76. Detalj snimanja konstrukcije bušotine do 128 m

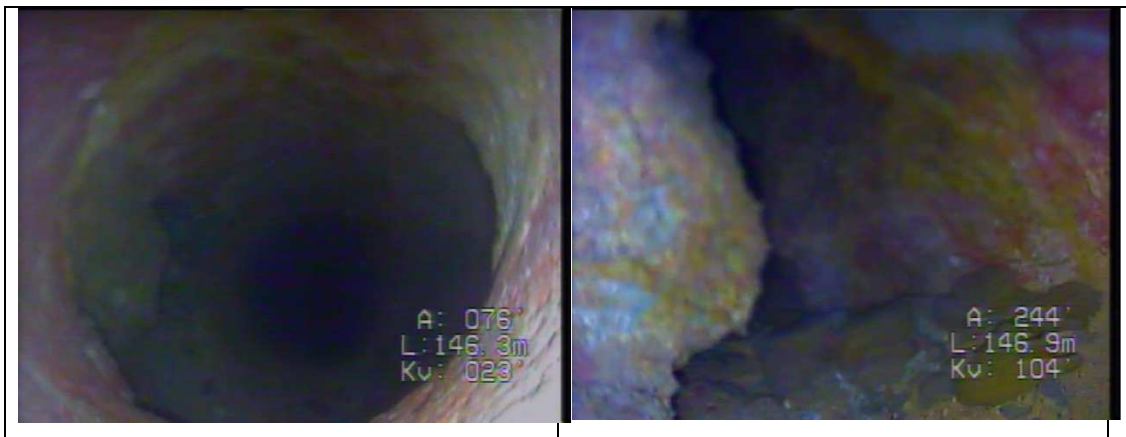
Do 128 metra se nalazi čelična konstrukcija (puna kolona), nakon čega se ulazi u „open hole“, odnosno deo bušotine bez konstrukcije, kada je konstatovano da je stena u delu do 138 m, bez većih pukotina i kaverni (slika 7.77.). Na 138 metru se uočava slabija karstifikacija sa pojavom manjih pukotina i kaverni, bez jasno uočene cirkulacije vode (slika 7.78.).



Slika 7.77. Slabo ispucala stenska masa, Slika 7.78. Slaba karstifikacija u stenskoj masi

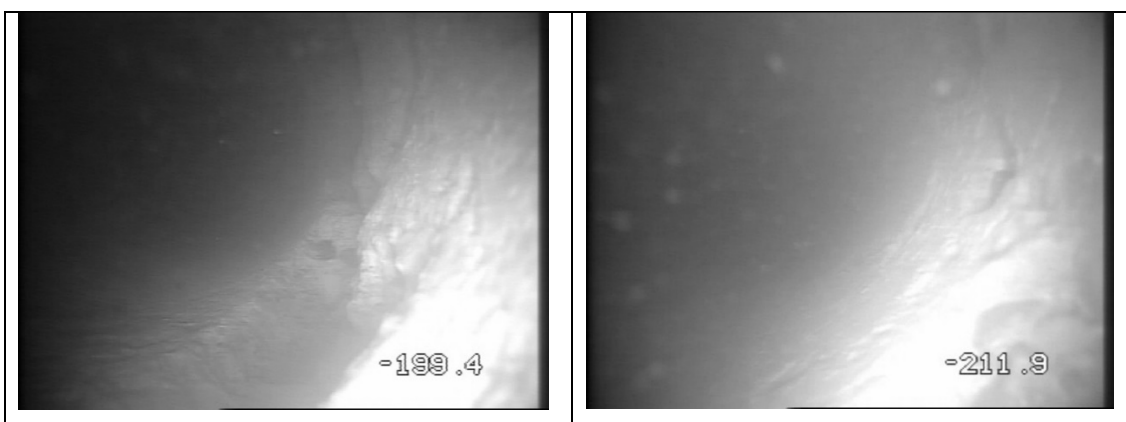
Na 146 metru se ulazi u zonu jače karstifikacije, sa izraženom kavernožnošću (slika 7.79.). U jednom od kanala u okviru ove zona, ustanovljena je pojačana cirkulacija podzemne vode (voda niže temperature), usled čije aktivne cirkulacije dolazi do smanjenja temperature vode na ustima bušotine. Do ove dubine je praćena temperatura, koja je varirala u rasponu od 18 °C do 18.8 °C. Nakon prolaska kroz ovu karstifikovanu zonu, uočen je i porast temperature, pa se zaključuje da je ovo jedna od glavnih zona priliva hladnih voda i njihovog mešanja sa dubljim termalnim vodama. Takođe, u ovoj

karstifikovanoj zoni je zabeležena i povećana mutnoća, a što ide u prilog teoriji da se duboke termalne vode mešaju sa hladnim vodama, povezanim sa kanalima nešto dubljim od glavnog kanala Krupajskog vrela (slika 7.80.).

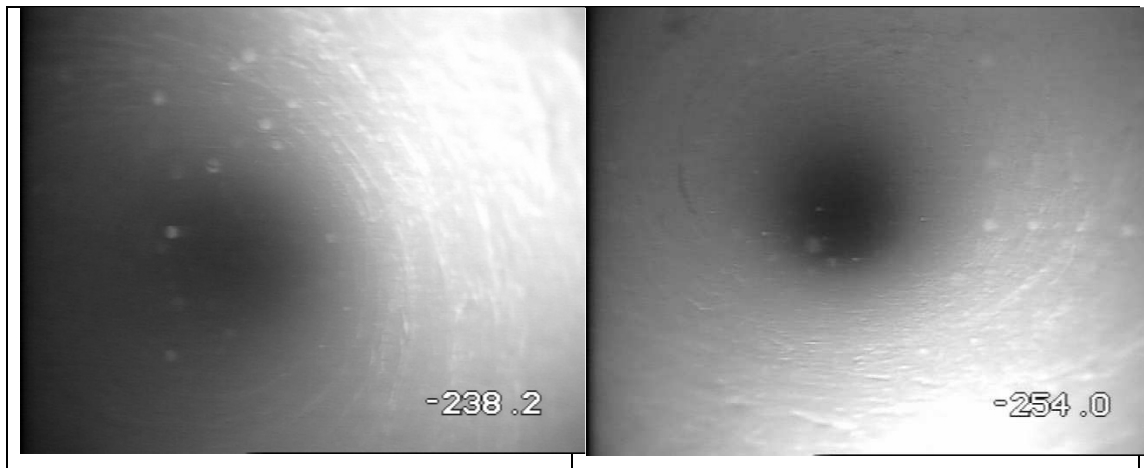


Slika 7.79. Ulazak u intenzivno ispućalnu zonu, Slika 7.80. Kanal iz koje ističe voda niže temperature

Daljim snimanjem bušotine, manje pukotine i kaverne registrovane su na dubini od 199 m, 212 m i 215 m (slike 7.81. i 7.82.). Blagi skok u povećanju temperature je još zabeležen i u karstifikovanoj zoni na dubini od 199 m, da bi se nakon toga temperaturni rast konstantno uočavao, do 291 m dubine, gde je zabeležena temperatura od 23.8 °C. Kao što je i prikazano, stena je do 290 metra uglavnom kompaktna, sa potpuno stabilnom zidovima bušotine. Tek na dubini od 291 m se ponovo ulazi u zonu slabije karstifikacije i neznatnog povećanja mutnoće, kao i blagog rasta temperatura, što ukazuje na dotok toplijih voda iz dubljih delova izdani. Prikaz stenske mase u bušotini dat je na slika 7.83. i 7.84.



Slika 7.81. Manja kaverna na 199 metru, Slika 7.82. Slaba karstifikovanost na 212 m dubine

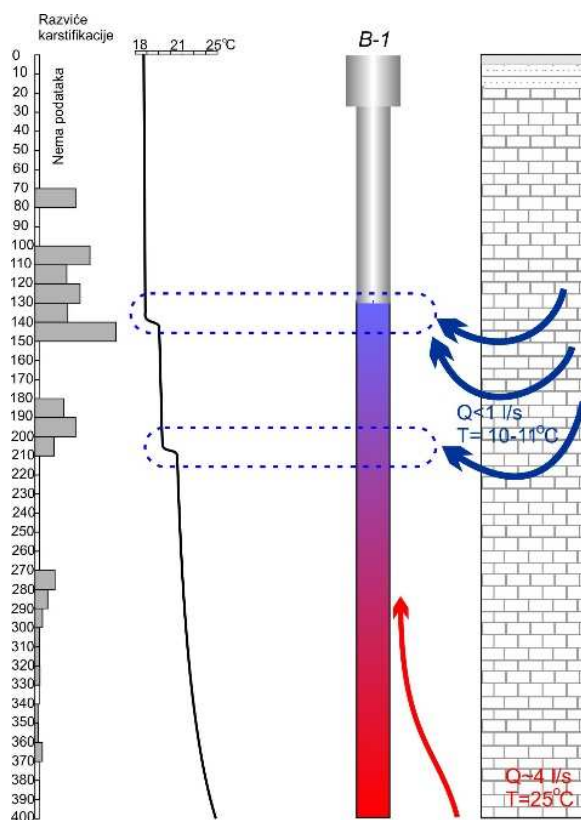


Slike 7.83. i 7.84. Kompaktna stena u intervalu 238 i 254 metara

Na bušotini B-1 Krupajskog vrela su 1984. godine izvršena karotažna ispitivanja (Filipović & Stevanović, 1984), kada su i ustanovljene glavne karstifikovane zone i to na dubinama 75.4-78.2 m, 103.8-116.8 m, 137-148.4 m, 182-201.6 m, 276-304 m, koje su najvećim delom i potvrđene snimanjem videoendoskopskim sistemom. Karotažna merenja su i izvedena do 382.6 m, pri čemu su od 300 m ustanovljeni i blago karstifikovani intervali, i to na dubinama 310.2-335.2 m, 344.6-349 m, 354.8-358.2 m, 264.4-368 m i 381-382.6 m. Iako se radi o dobroj karstifikaciji dubljih nabušenih horizonata, reinterpretacijom karotažnih merenja preostalih 80 m bušotine, može se zaključiti da se ne radi o značajnoj, već izuzetno slaboj karstifikaciji stene, koja se i dalje smanjuje sa dubinom. Jedina značajnija zona koja se može izdvojiti na osnovu karotažnih ispitivanja je zona koja se nalazi na dubini od 365 m, ali je ipak znatno slabija od onih na dubinama do 200 m. Temperatura zabeležena na kraju bušotine iznosi 25 °C, što je potpuno usaglašeno i sa rastom temperature zabeleženim tokom videoendoskopskih snimanja, odnosno sa porastom temperature pri povećanju dubine.

Na osnovu gore iznetih podataka karotažnih i videoendoskopskih istraživanja na bušotini B-1 na Krupajskom vrelu, može se zaključiti da se radi o hidrogeološkom objektu koji je kaptirao duboke karbonatne tvorevine, u okviru kojih je formirana izdan sa vodama temperature 25 °C, a moguće i više, obzirom da sa porastom dubine raste i temperatura. Sa druge strane, ovom bušotinom su zahvaćeni i karstni kanali, odnosno ispucala zona kojom cirkulišu hladne vode, i to na dubinama od oko 146 m, što odgovara, odnosno nešto je veća od dubine razvića glavnih karstnih kanala Krupajskog vrela. Iako postoji priliv hladnih voda do gore navedene dubine, radi se o prilivu na koji utiču faktori režima

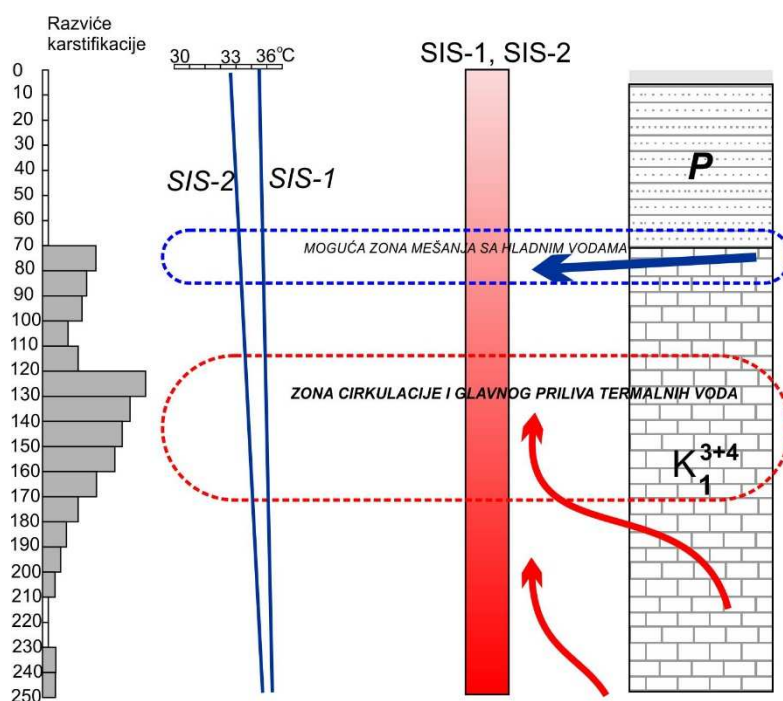
i cirkulacije podzemnih voda Krupajskog vrela, ali u znatno manjem obimu. Na slici 7.85., dat je prikaz obrade i korelacije podataka videoendoskopskih i karotažnih merenja.



Slika 7.85. Interpretacija podataka karotaža i videoendoskopije na bušotini B-1 u Krupaji

Pored gore prikazanih istraživanja na bušotini B-1 u Krupaji, izvedena je i reinterpretacija karotažnih ispitivanja na dva bunara na lokaciji Sisevac. Izrada dve istražne bušotine SIS-1 i SIS-2, kao i reinterpretacija karotažnih merenja u njima, je pomoglo u shvatanju razlika karstifikacije u zoni Sisevca, kao i u definisanju tipa cirkulacije podzemnih voda, kako hladnih, tako i dubokih termalnih voda. Bušotina SIS-1 je izvedena do dubine od 216 m, dok je bušotina SIS-2 izvedena do dubine od 250 m. Po svojim geološkim i hidrogeološkim karakteristikama, obe bušotine odražavaju isti mehanizam cirkulacije podzemnih voda, i to hladnih pripovršinskih, dubljih hladnih voda sa sifonskom cirkulacijom, kao i dubokih termalnih voda. Obe bušotine su nabušile vode povišenih temperatura (SIS-1 - 36°C) i (SIS-2 - 33°C), pri čemu je lokacija druge bušotine znatno bliže zoni vrela Crnice, pa se može zaključiti da u toj bušotini dolazi do jačeg mešanja termalnih voda sa vodama koje se dreniraju na pomenutom vrelu. Glavna karstifikovana zona, registrovana na obe bušotine,

nalazi se od 120 - 200 m, i to u bušotini SIS-1 u intervalu od 120 – 180 m, a u bušotini SIS – 2 u intervalu od 130 – 200 m. Istočno od istražno-eksploatacionog bunara SIS-1 i SIS-2, kredni krečnjaci u okviru kojih je formirana izdan se nalaze direktno na površini terena, bez povlatnog sloja, što omogućava njeno direktno prihranjivanje na račun atmosferskih padavina, što je i potvrđeno i objašnjeno kroz izotopske analize. Debljina donjokrednih krečnjaka u koje se ušlo nakon crvenih permskih peščara, nije poznata, ali je karotažnim merenjima potvrđeno da na dubinama preko 245 m postoji određeni stepen karstifikacije. Prikaz analize reinterpetiranih podataka karotaža izvedenih na bušotinama SIS-1 i SIS-2 dat je na slici 7.86.



Slika 7.86. Kompilacioni podaci interpretacije karotaža bunara SIS-1 i SIS-2

Pored gore prikazanih podataka istraživanja u bušotinama na Krupajskom vrelu i Sisevcu u prilog poznavanju razvića i dubine karstifikacije korišćeni su još i podaci sa istražnih bušotina u Krivom viru i Suvom Dolu. Pa tako, kao i kod ranije obrađenih istražnih bušotina i bunara, podaci sa bušotine u Krivom Viru potvrđuju analize o postojanju karstifikacije u dubljim delovima karbonatnog kompleksa (ispod erozionog bazisa), koji uslovljavaju akumuliranje značajnih “statičkih” rezervi karstnih izdanskih voda. Registrovani intervali sa karstifikovanim krečnjacima u bušotini TKV-1 u Krivom Viru, pokrivaju tezu o razviću “dubokog karsta”, odnosno o postojanju značajnije karstifikacije ispod nivoa

erozionih bazisa, gde je posebno razvijena cirkulacija termalnih voda. Karstifikovani intervali, u odnosu na površinu terena 362 m n.m., se nalaze na dubinama od 40 – 65 m, 225-234 m. i 231 – 239 m., odnosno na 123 m n.m.

Pored gore prikazane tri duboke bušotine-bunara u okviru karsta Kučajsko-beljaničkog masiva, pri tome pokrivajući njegovu južnu, jugozapadnu i zapadnu stranu, u zonama vezanim za isticanje termalnih voda, treba još dodati i objekat u Suvom dolu koji je izrađen u cilju zahvatanja voda znatno veće temperature u odnosu na subtermalne vode na prirodnom izvoru, a koje pripadaju severnoj strani Kučajsko-beljaničkog masiva. U neposrednoj blizini subtermalnog izvora Suvi Do, koji se nalazi na nadmorskoj visini od 282 m n.m., izbušena je istražna bušotine dubine 200 m. Tokom bušenja je konstatovano da je bušotina, na dubini od 74-106 m, presekla rasednu zonu (Stevanović, 1981), pri čemu je došlo do znatnog povećanja samoizliva od 1.84 l/s i temperature od 15 °C. Bušenjem do projektovane dubine su registrovane karstifikovane zone, a čije nabušivanje je imalo za rezultat povećanja temperature na 16.5 °C. Kako sam termalni izvor u Suvom Dolu ima temperaturu oko 20 °C, dok bušotina iako kaptira slojeve i do 200 m dubine, ima nižu temperaturu, to se može zaključiti da postoji veliki priliv i mešanje sa hladnijim vodama unutar bušotine. Kao i kod ostalih razmatranih hidrogeoloških objekata, nije se ušlo u potpuno kompaktnu stensku masu. I na dubinama ispod 200 m od primarne zone isticanja postoje pukotine i prsline, a ponegde i manji karstni kanali, što ukazuje da je karstifikacija u gotovo celokupnom području južnog, zapadnog i severnog Kučaja razvijena znatno dublje od primarne zone isticanja, odnosno i od zone cirkulacije hladnih izdanskih voda bilo da se radi o gravitacionom ili ascedentnom tipu isticanja.

Kao zaključak istraživanjima sprovedenim u dubokim hidrogeološkim objektima u zonama pojavljivanja termalnih voda na Kučajsko-beljaničkom masivu, može se reći da se radi o razviću veoma duboke cirkulacije, odnosno da je karstifikacije karbonatnog kompleksa razvijena znatno ispod erozionog bazisa, kao i ispod karstnih kanala u okviru duboke sifonalne cirkulacije. Prema do sada prikazanim i analiziranim podacima, može se pretpostaviti da je karstifikacija u okviru karbonatnog kompleksa, na većini ispitivanih lokacija, razvijena dublje od 500 m od zona primarnih isticanja, a što ide u prilog razviću karstno-pukotinskog tipa izdani, u okviru kojih se, pod specifičnim, lokalnim uslovima, formiraju vode povišene temperature (16 – 36 °C).

8.0. ANALIZA REZULTATA I ZAKLJUČCI

8.1. Opšti uslovi formiranja i cirkulacije podzemnih voda Kučajsko-beljaničkog masiva

Kučajsko-beljanički masiv se odlikuje značajnim rezervama podzemnih voda koje se javljaju na površini terena u vidu hladnih, subtermalnih i termalnih voda (prema klasifikaciji u poglavlju 4.7). Ono što je od posebnog interesa sa aspekta korišćenja voda, je utvrđivanje potencijalnih količina raspoloživih voda, koje se nalaze ispod nivoa dinamičkih rezervi, a koje su obnovljive u vremenu i prostoru. Upravo karstni sistem, kao što je Kučajsko-beljanički masiv, sa zonalno razvijenom mrežom podzemnih karstnih kanala po dubini, idealan je za formiranje ovakvih rezervi.

Kao što je navedeno u prethodnim poglavljima, a što je potvrđeno istraživanjima, formiranje podzemnih voda Kučajsko-beljaničkog masiva i njihovog hemijskog sastava počinje na površini terena. Količine voda koje ulaze u podzemni karstni sistem u najvećoj meri zavise od veličine atmosferskog taloga, koji se izluči na površini planinskog platoa, od nagiba terena, kao i od stepena karstifikovanosti krečnjaka u površinskoj zoni. Značajan deo voda ponire koncentrično preko velikog broja ponorskih zona, razvijenih po celoj površini Kučaja i Beljanice, a naročito izraženim u zoni kontakta sa vodonepropusnim stenama, gde se voda, usled specifične geologije i morfologije terena, duže zadržavala, rastvarala stenu i stvorila uslove za infiltraciju u podzemlje. Međutim, najveće količine površinskih voda, koje formiraju podzemne vode, u podzemlje dospevaju difuznim procurivanjem, preko manje ili više karstifikovane karstne površine, o čemu svedoče i znatno veće količine voda koje ističu na vrelima, u odnosu na količine voda koje poniru na ponorima, za koje je utvrđena veza ponor-izvor.

Ulaskom u podzemni karstni sistem, a usled niske koncentracije rastvorenih mineralnih materija u vodi, voda stupa u interakciju sa stenskom masom, rastvara je, gde uz obogaćivanje hidrohemijjskog sastava i menjanje fizičko-hemijjskih karakteristika podzemnih voda, ima uticaj i na proširenje karstnih provodnika i kanala. Razviće podzemnih karstnih kanala, najveće je do zone isticanja, gde na površinu terena izbijaju vode brze i gravitacione cirkulacije. Tokom dugog vremenskog perioda, voda je fizičkim i hemijjskim dejstvom produblivala velike kanale, stvarajući uslove za dublje zaleganje hladnih voda u podzemlje.

Uslovi za nastanak subtermalnih i termalnih karstnih voda, stvoreni su veoma dugačkim periodom karstifikacije dubokih karstnih sistema, u čijem nastanku najveću ulogu su imale takozvane hidrogeološko – geološke barijere. Usled nemogućnosti isticanja voda iz sistema, zbog navlake crvenih permskih peščara na zapadnom obodu i formiranja neogenih basena na severnom i južnom obodu masiva, voda je sistemom malih pukotina i kanala zalegala dublje u podzemlje, menjala temperaturne i hidrogeohemijske karakteristike u kontaktu sa različitim stenama, i duž lokalnih i regionalnih ruptura i/ili navlake crvenih permskih peščara, izbijala na površinu terena u vidu subtermalnih ili termalnih voda.

Upravo ovakva zonalnost cirkulacije podzemnih voda u vertikalnom profilu, usloвила je različite starosti i hidrogeohemijske karakteristike podzemnih voda. Ulazne fizičko-hemijske karakteristike, jonski i izotopski sastav voda, odlika su atmosferskih padavina i stenske mase sa kojom je voda u kontaktu pre ulaza u podzemni karstni sistem. Cirkulacijom voda do prve, epikarstne zone isticanja, fizičke i hidrohemijske karakteristike voda se minimalno menjaju, blago poprimajući karstni karakter podzemnih voda. U drugoj, nižoj zoni isticanja, vrela sa gravitacionim tipom cirkulacije, imaju tipične karbonatne odlike voda, sa izraženim sadržajem Ca^{2+} i HCO_3^- .

Sa dubinom cirkulacije, menjaju se i koncentracije jonskog i izotopskog sastava podzemnih voda, kao i osnovni fizičko-hemijski parametri. Jedna od značajnih karakteristika podzemnih voda Kučajsko-beljaničkog karstnog masiva je promena temperatura voda sa povećanjem dubine, pa se tako dreniranjem najdubljih karstnih kanala na površini terena javljaju vode subtermalnog i termalnog karaktera, sa temperaturama od 16 do 36 °C i starošću vode od 26.6 do 5. 979 godina.

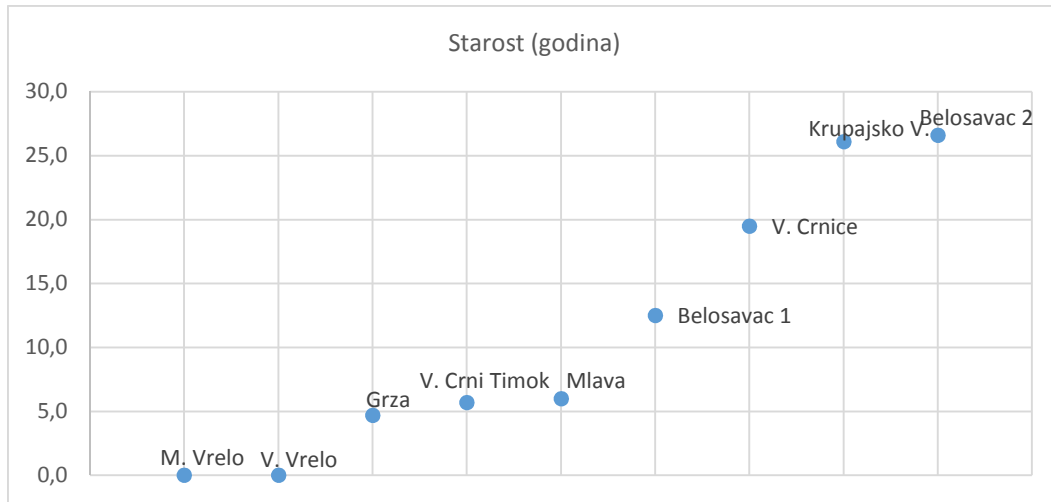
Ono što posebno čini ovaj masiv interesantnim je činjenica da najveću starost vode ne karakteriše i najviša temperatura vode. Naprotiv, voda sa najvišom temperaturom od 36 °C ima starost od 2. 687 godina, dok voda sa starošću od 5. 979 godina, ima temperaturu vode od prosečno 19 °C. Ovaj rezultat ukazuje da na porast temperature podzemnih voda Kučajsko-beljaničkog masiva utiče i prirodni temperaturni gradijent i postojanje grejnih tela, pri čemu vode blago povišene temperature, nastale usled prirodnog gradijenata, imaju niže temperature, ali duže vremena borave u podzemlju i imaju veću starost, dok vode čije su temperature uslovljene postojanjem grejnog tela, imaju znatno više

temperature voda. O postojanju grejnog tela svedoči i povišen sadržaj pojedinih jona, kao i sadržaj mikroelemenata u vodi.

8.2. Intenzitet i baza karstifikacije Kučajsko-beljaničkog masiva

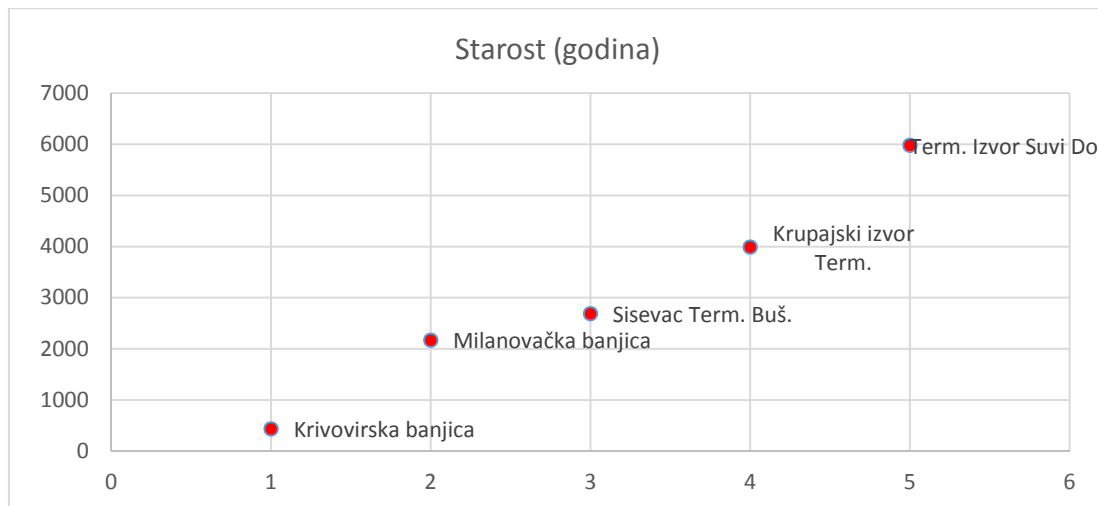
Često dubina karstifikacije ima različito vertikalno rasprostranjenje u okviru iste izdani, a u okviru Kučajsko-beljaničkog masiva ona prelazi i 1 km. Po dubini stene zahvaćene karstifikacijom i one ispod manje karstifikovane, pa do potpuno homogenih masiva, nisu i ne mogu biti, odvojene oštrom granicom. Iako ne postoji oštra granica kojom bi se mogli podeliti tipovi cirkulacije podzemnih voda (što je u zavisnosti od stepena karstifikacije), u okviru karstnih sistema, na osnovu dosadašnjih istraživanja, kao i na osnovu istraživanja i analiza sprovedenih u okviru izrade ove disertacije, generalno ih možemo podeliti na 1. pripovršinsku cirkulaciju, cirkulaciju u okviru gravitacionog tipa isticanja, 2. dublju cirkulaciju, u okviru slabije ispucale stenske mase, ispod dominantnih kanala gravitacionog isticanja, 3. duboku sifonalnu cirkulaciju (ascendentni tip isticanja), 4. cirkulaciju subtermalnih voda u okviru slabije ispucalih stenskih masa ispod glavnih kanala sifonalne (ascendentne) cirkulacije i 5. veoma duboku cirkulaciju termalnih podzemnih voda.

Za Malo Vrelo i Veliko Vrelo utvrđeno je da se radi o gravitacionim vrelima i da dubine zaleganja glavnih kanala ne prelazi više od 10 m. Sa druge strane je kroz različite analize utvrđeno i da dubina karstifikacije zaleže znatno dublje od položaja glavnih kanala kod nekih karstnih vrela, do sada definisanih kao tipična gravitaciona vrela, kao vrelo Grze, vrelo Crnice i vrelo Crnog Timoka. Sa druge strane, dosadašnjim istraživanjima se jasno dokazalo da je intenzitet i stepen karstifikacije na severnom i severozapadnom bloku Kučajsko-beljaničkog masiva, pored pomenutih vrela Mlave i Krupajskog vrela, razvijen znatno dublje od primarnih zona isticanja. Kao dokaz da u sistemima hladnih voda postoji dublja i usporenija cirkulacija podzemnih voda, od one koja je definisana optima obeležavanja, daje se dijagram starosti podzemnih voda, urađen na osnovu izotopskih analiza $^3\text{H}/^3\text{He}$, pri čemu se potvrđuje da pored tipične gravitacione cirkulacije podzemnih voda kod vrela Crnice, Crnog Timoka i Grze postoji i znatno dublja cirkulaciju podzemnih voda, odnosno karstifikacija ispod zona isticanja gotovo svih karstnih vrela na jugozapadnom, zapadnom i severnom delu Kučajsko-beljaničkog masiva (slika 8.1.).



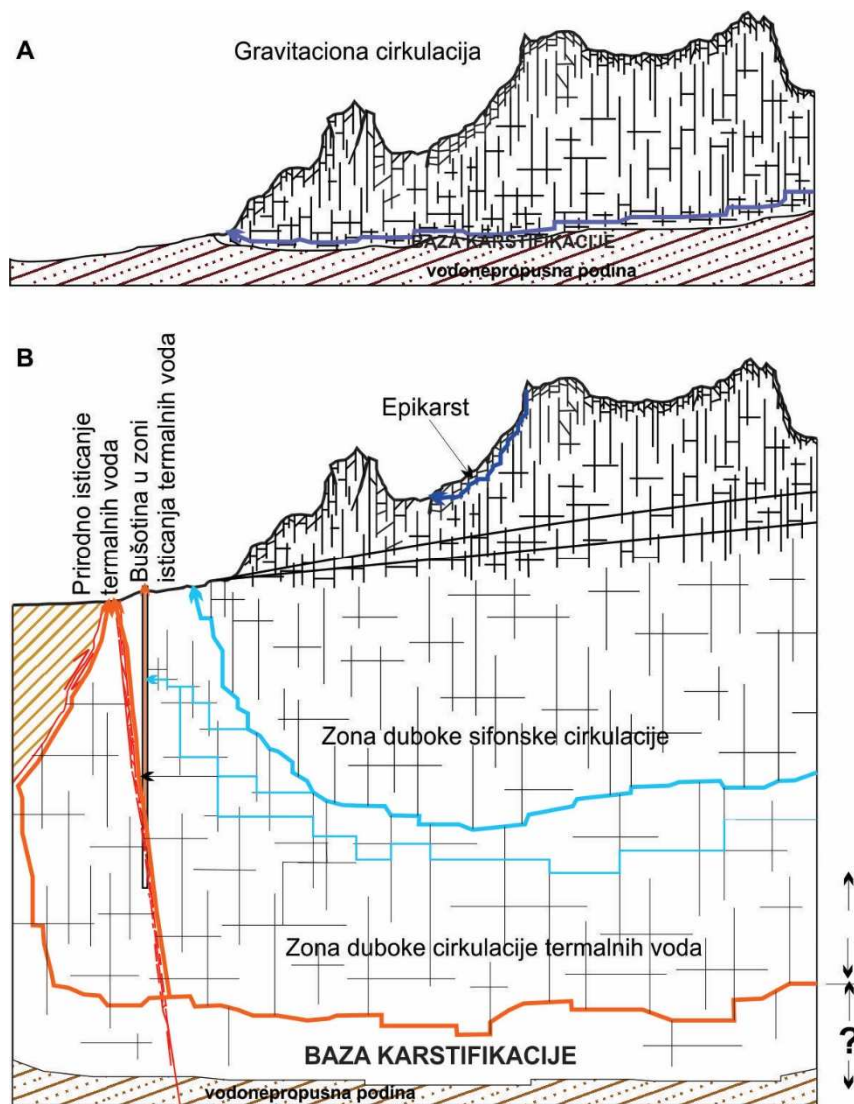
Slika 8.1. Starosti „mladih“ voda glavnih karstnih vrelo (južna-severna-zapadna strana) definisana kroz analizu $^3\text{H}/^3\text{He}$

Pored gore navedenih ispitivanja u okviru „mladih“ hladnih voda, posebna pažnja je poklonjena i istraživanjima termalnih i subtermalnih „starijih“ voda Kučajsko-beljaničkog masiva, u smislu definisanja dubine karstifikacije. Starosti tih voda se kreću od 432 godina, kod Krivovirske Banjice, do 5979 godine za termalni izvor u Suvom Dolu, što sve ukazuje na veoma duboku i usporenu cirkulaciju, odnosno na veliku dubinu baze karstifikacije (slika 8.2.).



Slika 8.2. Starosti „starih“ voda glavnih termalnih pojava (južna-severna-zapadna strana) definisana kroz analizu ^{14}C

Na osnovu svega gore prikazanog, daje se shematski prikaz tipa cirkulacije, i razvića karstifikacije u okviru različitih karstnih sistema Kučajsko-beljaničkog masiva (slika 8.3.).



Slika 8.3. Shematski profil različitih tipova karstnih sistema na osnovu cirkulacije i intenziteta karstifikacije, u odnosu na bazu karstifikacije. A – Gravitacioni tip isticanja sa plitkim zaleganjem karstnih kanala (uslovljeno nepropusnim sedimentima), B – sistem duboke cirkulacije

8.3. Geneza i starost toplih i hladnih podzemnih voda Kučajsko-beljaničkog masiva

Kako na formiranje fizičko-hemijskih, jonskih i izotopskih karakteristika podzemnih voda Kučajsko-beljaničkog masiva veliki uticaj imaju fizičko-hemijske, jonske i izotopske karakteristike padavina i ponorske voda, u ovom poglavlju će se dati sveobuhvatna analiza, kako atmosferskih, tako i površinskih i podzemnih voda.

Ponorske vode, obzirom da veliki deo nastaje od atmosferskih padavina, imaju nisku elektroprovodljivost i sadržaj rastvorenog kiseonika, što je posledica brze površinske cirkulacije vode. Temperaturu vode karakteriše sezonski, ali i planinski karakter. Vrednost pH je uglavnom iznad 8, što ukazuje da se vode formiraju na slivnom području pretežno izgrađenom od stena paleozojske starosti. Izuzetak su vode ponora Suvog Dola, čija pH vrednost od oko 7, ukazuje na ulivanje karstnih voda vrela Buk. Mutnoća vode varira, a povišene vrednosti se javljaju u kišnim periodima i kao posledica spiranja površinskih slojeva deluvijalno-proluvijalnih naslaga uvala kojima voda teče.

Prolaskom vode kroz sistem, voda poprima fizičko-hemijske karakteristike voda karbonatnih struktura, što se odražava na elektroprovodljivost i pH vrednost vode. Ove vrednosti variraju i zavise od vrste stene sa kojom su vode u kontaktu. Najveća elektroprovodljivost vode zabeležena je u termalnoj vodi Milanovačke banjice (802 $\mu\text{s/cm}$), a koja je rezultat kontakta voda sa stenama koje nisu karbonatnog porekla. Pored ove termalne pojave, i hladne vode Suvog Dola i vrela Crnog Timoka imaju povišene vrednosti elektroprovodljivosti, koja se kreće do 620 $\mu\text{s/cm}$. Vode sa brzom cirkulacijom imaju elektroprovodljivost koja se kreće 200-500 $\mu\text{s/cm}$, a što zavisi od vremena boravka vode u podzemlju, pa tako vrednosti variraju u periodu velikih i malih voda. Subtermalne i termalne vode imaju često postojanu vrednost elektroprovodljivosti, koja se kreće u rasponu 500 do 600 $\mu\text{s/cm}$. Vrednost pH se kreće od 7 do 8 jedinica, na gotovo svim pojavama, a nešto niže vrednosti se uočavaju kod voda Milanovačke banjice (7.1, 7.2). Povišene vrednosti, odnosno vrednosti pH preko 8, javljaju se kod voda sa veoma brzom cirkulacijom, gde voda usled kratkog kontakta sa krečnjakom ne uspe da poprimi potpuno CaCO_3 karakter, pa su tako ove vrednosti zabeležene u pećini Živkove reke, Velikom i Malom vrelu, izvoru Zlota ispod pećine i vrelima Beljevine.

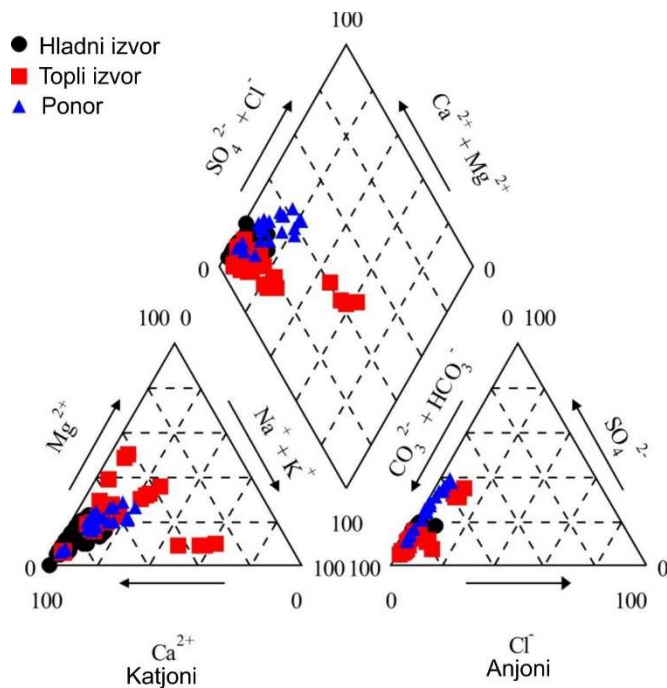
Temperature vode, kao i sadržaj rastvorenog kiseonika u vodi, menjaju se sa dubinom cirkulacije voda, kao i vremenom koje voda provede u podzemlju. Temperatura vode sa

dubinom i vremenom boravka u podzemlju raste, a vrednost se kreće od najhladnijih 6 °C na Radovanskom vrelu, do čak 36 °C u termalnoj bušotini u Sisevcu. Iako temperatura vode sa vremenom boravka u podzemlju raste, najviša temperatura ne reflektuje i najveću starost voda. Kiseonik sa vremenom boravka vode u podzemlju postepeno opada, pa tako u hladnim vodama sa gravitacionom cirkulacijom voda iznosi do 12.6 mg/l (Malo vrelo), u vodi sifonalne cirkulacije do 10 mg/l (Krupajsko vrelo), dok u vodama subtermalnog i termalnog karaktera iznosi svega 1.5 mg/l (termalni izvor na Krupaji).

Mutnoća voda varira i izražava sezonski karakter, odnosno uglavnom je povišena u periodu velikih voda. Subtermalne i termalne vode koje imaju duboku sifonalnu cirkulaciju imaju niske vrednosti mutnoće i veoma su bistre, a što je posledica autopurifikacione moći karstne sredine i dužeg vremena boravka vode u podzemlju.

Za interpretaciju jonskog sastava i grafički prikaz korišćen je Pajperov dijagram. Na njega su naneseni svi podaci voda Kučajsko-beljaničkog masiva (hladne, tople i ponorske vode). Na osnovu dijagrama (slika 8.4.) i jonskog sastava, zaključuje se da sve hladne vode pripadaju Ca – HCO₃ grupi voda, sa oko 80% sadržaja Ca²⁺ i HCO₃⁻ u jonskom sastavu, što je upravo slučaj i sa vodama ponora, s tim što se u izvorskim vodama javlja i nešto veći sadržaj sulfata SO₄²⁻.

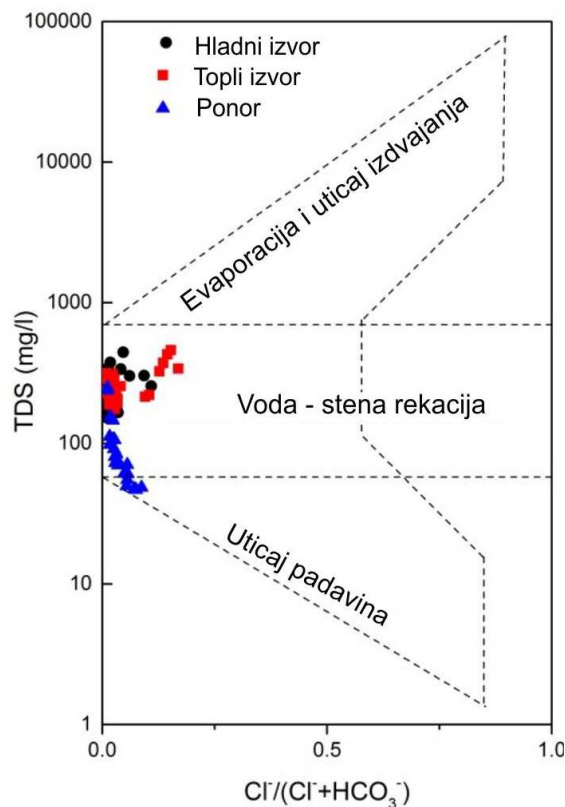
Termalne vode pokazuju nešto drugačiji hidrohemijski sastav voda, pa tako subtermalne i termalne vode pripadaju Ca-Mg – HCO₃ grupi, izuzev Milanovačke banjice, koja po svojim hidrohemijskim karakteristikama pripada Na-K – HCO₃-SO₄, a što potvrđuje da su ove vode formirane u drugačijim hidrogeohemijskim uslovima.



Slika 8.4. Pajperov dijagram voda Kučajsko-beljaničkog masiva

Na hidrohemijski sastav voda veliki uticaj ima interakcija vode i stene, što je izraženo u hladnim, subtermalnim i termalnim vodama, ali se takođe uočava reakcija voda-stena i u ponorskim vodama. Na slici 8.5. prikazan je hidrohemijski sastav svih voda, koji je uslovljen reakcijom vode i stene.

Hemijski sastav većeg broja ponora uslovljen je reakcijom voda-stena. Ukupne rastvorene materije (TDS) vode na ponorima Velike Brezovice i Vojala iznose manje od 90 mg/l, što ukazuje na veći priliv voda od padavina na ponoru ili kraće vreme reakcije voda-stena.



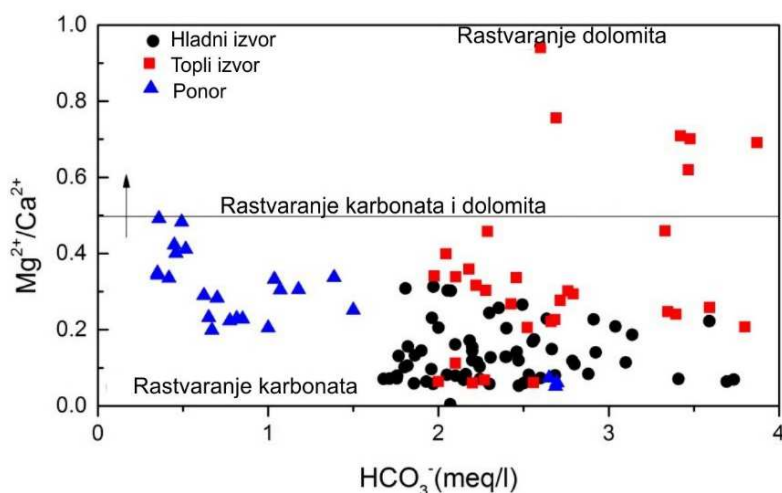
Slika 8.5. Gibbs dijagram

Jonski sastav voda na ponoru ukazuje na delimični kontakt sa karbonatima i delimično dolomitima, dok sastav hladnih voda ukazuje na uglavnom kontakt sa karbonatima (slika 8.6.).

Jonski sastav subtermalnih i termalnih voda takođe uglavnom ukazuje na poreklo rastvaranjem karbonata, ali termalna voda u Sisevcu, Krupaji i vode Krivovirske banjice u periodu minimuma, ukazuju na poreklo jonskog sastava nastalog delimično od rastvaranja dolomita (slika 8.6.). Dolomiti, odnosno dolomitični krečnjaci su u okviru masiva rasprostranjeni u ovoj zoni (zapad, jugozapad), a pripadaju srednjoj i gornjoj juri, o čemu je bilo reči u poglavlju 4.5, a njihova ukupna debljina (srednje i gornje jure zajedno) se procenjuje na oko 800 metara dubine. Upravo cirkulacija voda kroz ovako debele tvorevine dolomita i dolomitičnih krečnjaka, mogla bi da uslovi starost i jonski sastav termalnih voda. Međutim, poreklo Mg^{2+} u termalnim vodama mogu biti i posledica oslobađanja ovog jona iz biotita i hornblende, minerala koji su zastupljeni u vulkanitima (daciti, dacito-andeziti).

Termalni izvor na Krupaji ima povišen sadržaj Mg^{2+} , Na^+ i SO_4^{2-} , ali bušotina, koja pliće zaleže u podzemlje (400 m), ima niži sadržaj Mg^{2+} , Na^+ i SO_4^{2-} , što ukazuje da koncentracije ovih jona rastu sa dubinom i kontaktom vode sa stenom. Krivovirska banjica, pored magnezijuma, sadrži i povišen sadržaj hlorida, što je takođe čini veoma karakterističnom i značajnom sa aspekta daljih istraživanja.

Milanovačka banjica je veoma karakteristična pojava i u potpunosti se izdvaja na osnovu svojih, fizičko-hemijskih, jonskih i izotopskih karakteristika voda. U vodi se javljaju jako povišene vrednosti Na^+ , Cl^- i SO_4^{2-} , a pored ovih i povišene vrednosti K^+ i F^- . Pećina Živkova reka, iako nema povišenu temperaturu, u vodi sadrži veoma visok sadržaj Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- i SO_4^{2-} , što može da ukaže na poreklo ili dug kontakt sa mladim vulkanitima.

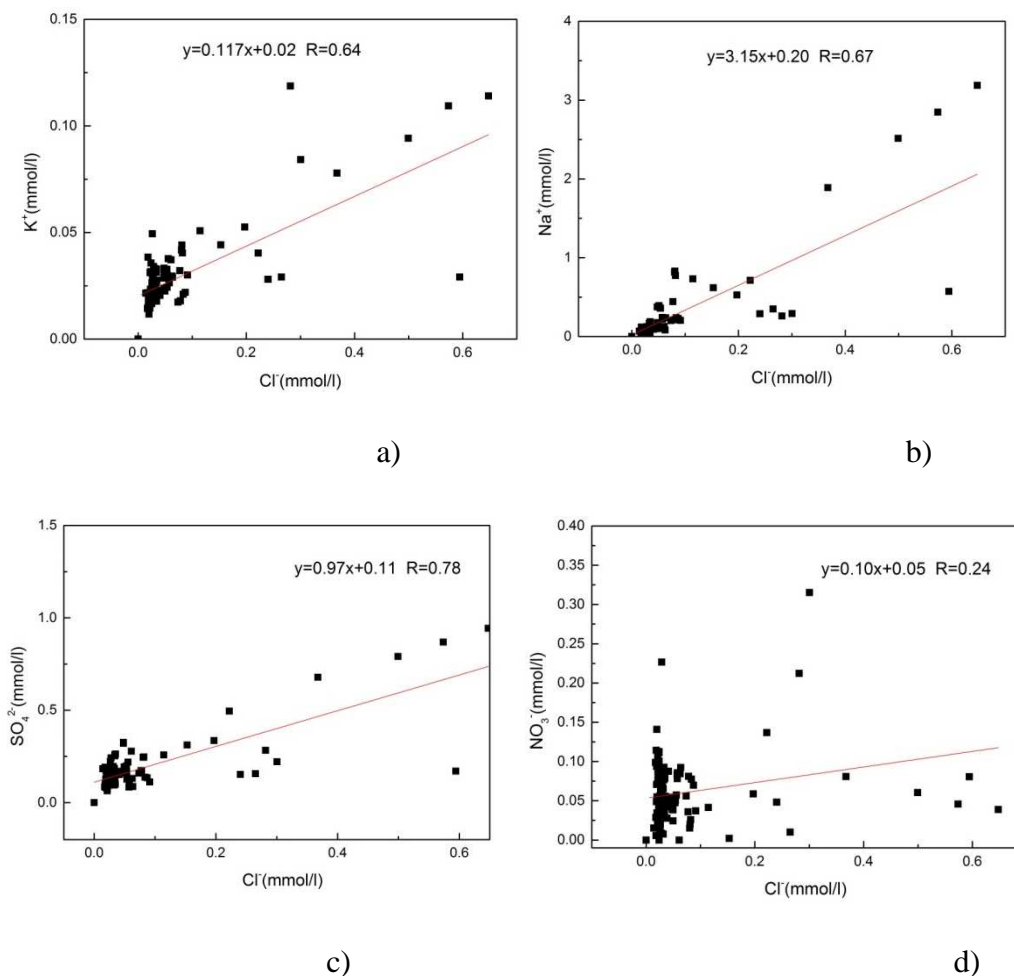


Slika 8.6. Poreklo jonskog sastava

Obzirom da istražno područje predstavlja nezagađenu sredinu, izvodi se zaključak da poreklo Cl^- u vodi delom potiče iz padavina, kada se javlja u vodama na ponorima i hladnim vodama na istočnoj strani masiva, dok u ostalim pojavama, naročito u pojavama sa značajno povišenim koncentracijama, sadržaj hlorida ukazuje na hidrogeohemijsko poreklo.

Značajna korelacija postoji između jona K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} i jona Cl^- (slika 8.7. a, b i c), koja može da ukaže da ove tri vrste jona potiču od istog izvora od kojih potiče i anjon Cl^- . Joni NO_3^- i Cl^- nemaju značajnu korelaciju (slika 8.7. d), što potvrđuje da sadržaj hlorida nije posledica antropogenog zagađenja, ali se koncentracije NO_3^- često nalaze u podzemnim

vodama, što može biti posledica efekta proceđivanja površinske vode kroz zemljište, neposredno u zoni isticanja.

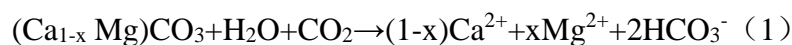


Slika 8.7. Veza između jona K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} i NO_3^- sa jonima Cl^-

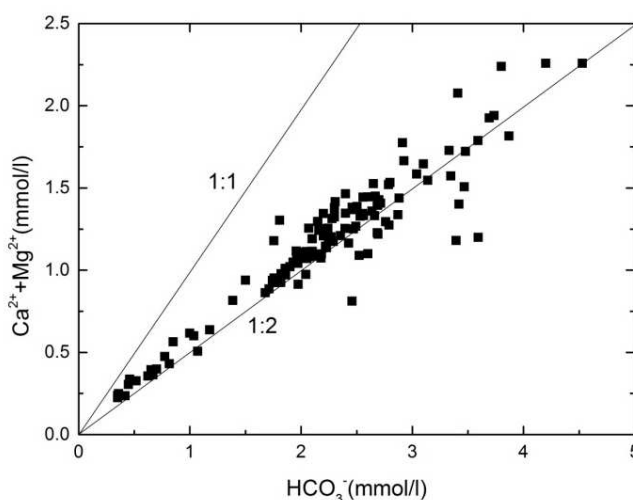
Poreklo rastvorenog neorganskog ugljenika (DIC) u vodi nije u potpunosti nastalo kao posledica rastvaranja karbonatnih stena ugljenom kiselinom. Azotna i sumporna kiselina, koje vode poreklo od ljudskih aktivnosti, takođe mogu rastvarati karbonatne stene, a ovo rastvaranje ne uzima CO_2 iz zemljišta ili vazduha, ali može povećati stepen karbonatnog rastvaranja i količinu DIC sadržaja u vodi.

Kako bi se utvrdilo poreklo rastvaranja karbonata, kao i postojanje eventualnih zagađenja u okviru Kučajsko-beljaničkog masiva, izvršeno je poređenje pripadanja vrednosti odnosa $(Ca^{2+} + Mg^{2+})/HCO_3^-$ jednačinama prikazanim pomoću krivih (slika 8.8.). Generalno, u otvorenom karstnom sistemu, ukoliko postoji samo rastvaranje karbonata

ugljenom kiselinom, reakcija je predstavljena jednačinom (1), a odnos molova $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ iznosi 1:2 (slika 8.8.).



U slučaju rastvaranja karbonata azotnom ili sumpornom kiselinom, važe jednačine (2) i (3), a kada odnos molova $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ u oba slučaja iznosi 1:1. Kako na se na slici 221 vidi da najveći broj tačaka Kučajsko-beljaničkog masiva leži na liniji 1:2, a takođe se uočava i njihovo značajno udaljenje od linije 1:1, izvodi se zaključak da se na području Kučajsko-beljaničkog masiva rastvaranje karbonata vrši uglavnom od strane ugljene kiseline, što takođe potvrđuje tvrdnju da istražno područje nije kontaminirano antropogenim faktorom.



Slika 8.8. Molski odnos između jona $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$

U vodi subtermalnog i termalnog karaktera, kao i hladnim vodama koje se nalaze u neposrednoj zoni toplih voda, konstatovan je mali sadržaj Fe, Mn, Sr, Li, Zn, As, P i Si, dok u uzorcima nisu konvencionalnim metodama detektovani sadržaji Cr, Cu i Ni. Ovakav sadržaj mikroelemenata, posledica je interakcije vode sa različitim stenskim masama.

Zajednički mikroelement, koji prati sve pojave, je stroncijum, koji se vezuje za kalcijum, a samim tim i sedimentne stene. Koncentracije rastu sa porastom temperature, što ukazuje na bogaćenje voda ovim elementom tokom prolongiranog kontakta vode sa stenom. Međutim, najviše vrednosti se ne beleže i u vodama najviše temperature.

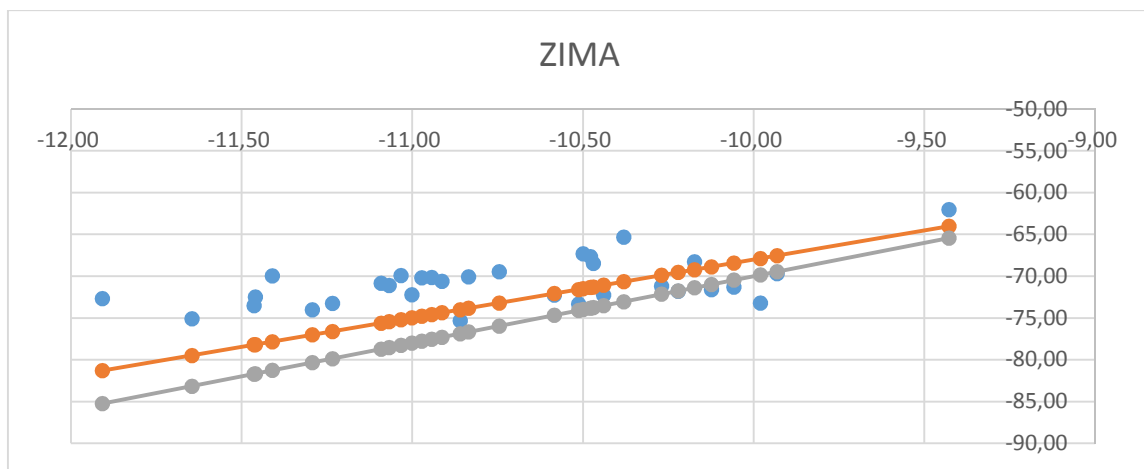
Vrednosti gvožđa javljaju se na vrelu Crnice (137.5 µg/l), Krivovirskoj banjici (66.5 µg/l) i na Milanovačkoj banjici (18.5 µg/l). Obzirom da se ovaj element nalazi u vodama koje nisu povezane lokacijski, izvodi se zaključak da je njegovo prisustvo posledica konkretnog kontakta vode sa odgovarajućom stenom. Mikroelement Zn se javlja samo u sistemu Sisevac, a pokazuje da sadržaj ovog elementa u vodi raste sa dubinom, kao i sa porastom temperature. Ovako povišene vrednosti mogu biti posledica nekog od akcesornih minerala koji se javljaju u stenama određenog područje.

Sadržaj arsena se javlja u hladnim i toplim vodama, a visoke vrednosti se vezuju za bušotine SIS-1 (14.1 µg/l) i B-1 (14.7 µg/l), a najviša vrednost od čak 22.7 µg/l, zabeležena je na termalnom izvoru u Krupaji. Forsfor je povišen u svim analiziranim uzorcima i vrednosti se kreću uglavnom preko 20 µg/l, sa izuzetkom Milanovačke banjice, čiji sadržaj fosfora iznosi 12 µg/l. Vrednosti od 34 i 35 µg/l, konstatovane su u vodama vrela Crnice i Krivovirskoj banjici.

Prolongirani kontakt vode sa vulkanitima uočava se kod Milanovačke banjice i termalnog izvora u Krupaji. Da na hidrogeohemijske uslove formiranja sadržaja voda Milanovačke banjice ima prolongirani kontakt vode sa vulkanitima (dacitima), ukazuje jako povišen sadržaj Li u vrednosti od 33 µg/l. Generalno, sadržaj Li u podzemnoj vodi Milanovačke banjice bi se mogao vezati za vulkanizam, međutim, kao što je navedeno, jako povišene koncentracije natrijuma i hlorida, koje se takođe javljaju u vodama i prate sadržaj Li, mogu da ukažu na priliv podzemnih voda sa znatno veće dubine. Pored ovog, Milanovačka banjica ima i povišene vrednosti silicijuma od 21 mg/l. Takođe, povišen sadržaj silicijuma se detektuje na termalnom izvoru Krupajskog vrela, a nešto niži i na ostalim vodama subtermalnog i termalnog karaktera, kao i kod hladnih voda u manjim koncentracijama, što može biti posledica oslobađanja silicijuma iz sedimenata, ali i iz prolongiranog kontakta sa vulkanitima.

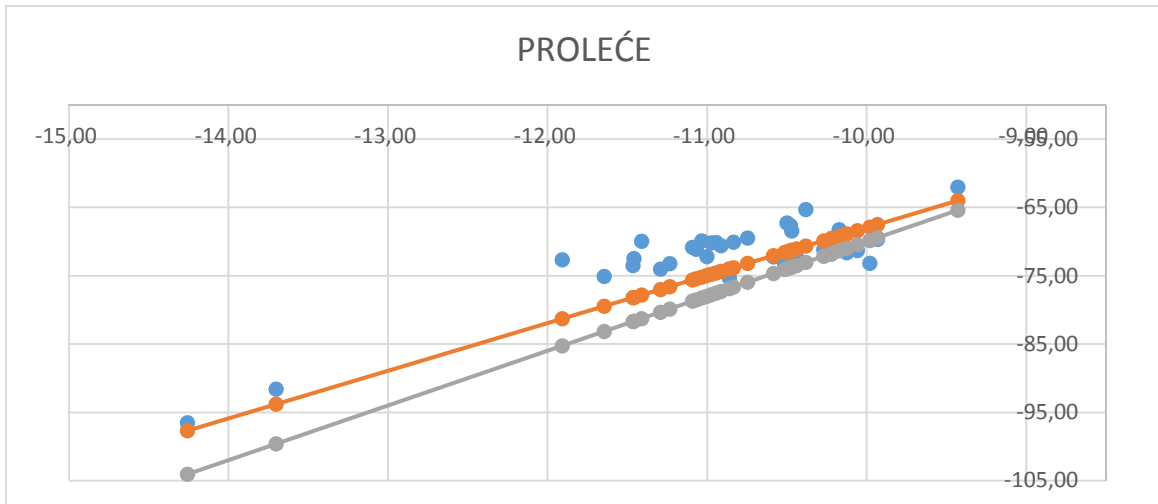
Veza podzemnih voda sa zonom prihranjivanja, utvrđena je analizom sadržaja stabilnih izotopa u padavinama, površinskim vodama koje poniru i izvorskim vodama. Na osnovu

dijagrama zavisnosti LIML i GIML i sadržaja stabilnih izotopa u okviru četiri sezone (zima, proleće, leto i jesen), uočava se jaka zavisnost rezultata sa LIML. LIML leži iznad GIML, reflektujući izotopski sastav lokalnih padavina u kojima dominira isparavanje, odnosno koje su podlegle primarnoj izotopskoj frakcionaciji. Sadržaji izotopa u vodama masiva tokom zimskog perioda, leže blizu lokalne meteorske linije (slika 8.9.), a najveći deo uzoraka leži na sredini dijagrama, reflektujući sadržaj padavina u vodi i brzu cirkulaciju kroz podzemlje, dok određeni deo padavina leži na levoj strani dijagrama i ukazuje na izotopski lakši sastav u uzorcima, što može biti posledica uticaja snežnog pokrivača.



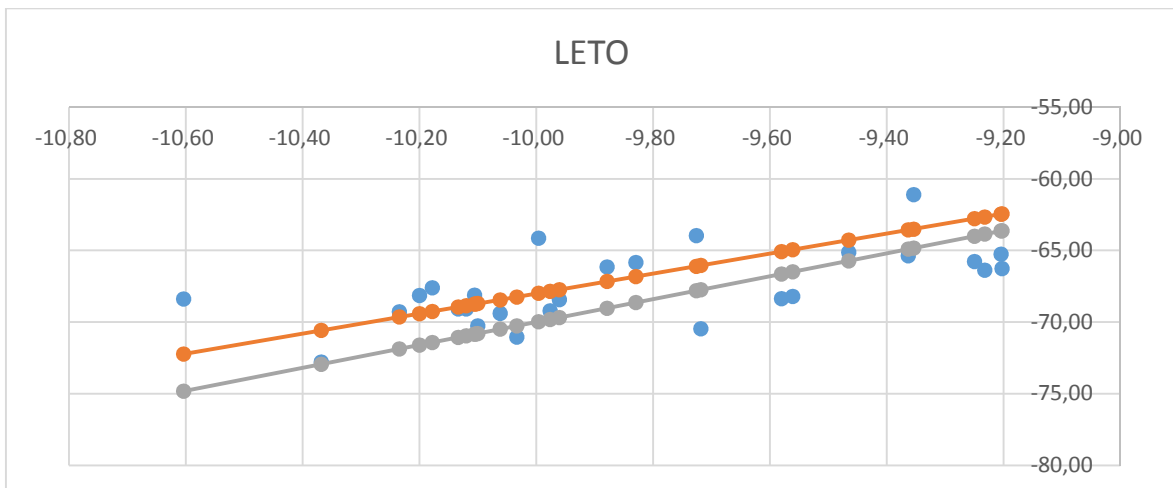
Slika 8.9. Odnos sadržaja stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H u uzorcima zimskog perioda sa LIML i GIML

Uzorci prolećnog perioda koncentrično leže u desnom delu dijagrama, odražavajući izotopski sastav u vodi formiran od težih izotopa, a koji su posledica jakih padavina u prolećnom periodu (slika 8.10.). Upravo ovakvo oslikavanje izotopskog sastava koji reflektuje izotopski sastav padavina, ukazuje na veoma brzu cirkulaciju podzemnih voda u periodu velikih voda.



Slika 8.10. Odnos sadržaja stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H u uzorcima prolećnog perioda sa LIML i GIML

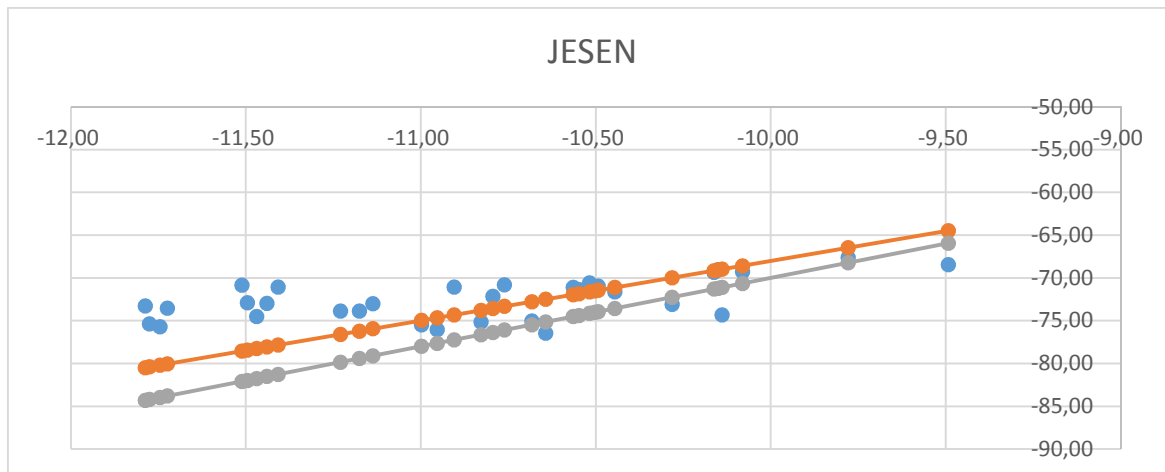
Plotovanjem rezultata sadržaja izotopa u vodi u letnjem periodu, uočava se najveća disperzija tačaka na dijagramu (slika 8.11.). Takav položaj tačaka, odnosno većinski broj tačaka ispod LIML, ukazuje na dreniranje voda koje nisu u direktnoj vezi sa padavinama i ukazuju na duži period boravka vode u podzemlju.



Slika 8.11. Odnos sadržaja stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H u uzorcima letnjeg perioda sa LIML i GIML

Položaj tačaka sadržaja izotopa u vodi u jesenjem periodu, koncentrisan je većim delom u levoj polovini dijagrama, ukazujući na uticaj voda koje su prihranjene od padavina koje su podlegle ponovnom isparenju (što može da ukaže na infiltraciju u letnjem periodu). Takođe, jedan broj tačaka se nalazi ispod LIML, ukazujući na prolongirani boravak u

podzemlju, što je slučaj sa subtermalnim i termalnim vodama. Tačke koje leže u krajnjem levom delu dijagrama, ukazuju na brzu cirkulaciju i uticaj površinskih voda nastalih od snežnih padavina (slika 8.12.).



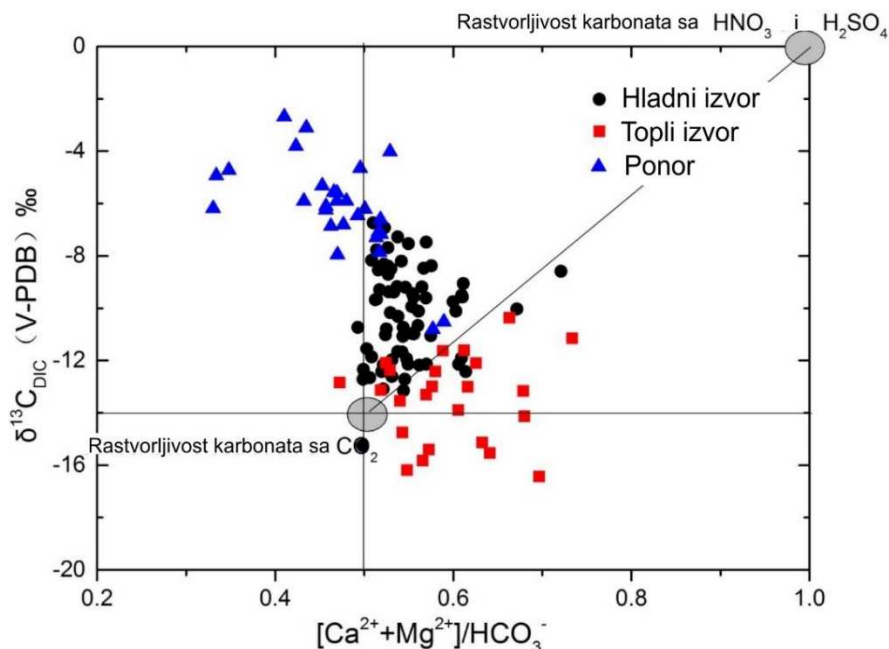
Slika 8.12. Odnos sadržaja stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H u uzorcima jesenjeg perioda sa LIML i GIML

Generalno, na osnovu sadržaja stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H u podzemnim vodama potvrđeno je da su podzemne vode Kučajsko-beljaničkog masiva u jakoj vezi sa padavinama i površinskim vodama, što govori o njihovoj obnovljivosti u vremenu. Izuzetak su subtermalne i termalne vode, kao i određene pojave hladnih voda sa dubokom cirkulacijom (Krupajsko vrelo, Crnica), koje u letnjem periodu, kada je mešanje sa svežim atmosferskim vodama svedeno na minimum ili pak isključeno, pokazuju izotopski sadržaj nezavisan od atmosferskih padavina.

Sadržaj stabilnog izotopa ugljenika $\delta^{13}\text{C}$ u vodi varira i najveći je u površinskim vodama, gde iznosi čak -16 ‰ (ponor Velike Brezovice), čime odražava uticaj $\delta^{13}\text{C}$ iz zemljišnog sloja na ponorske vode. Kada izotop $\delta^{13}\text{C}$ uđe u podzemlje, njegova vrednost raste sa vremenom boravka vode u podzemlju, pa tako hladne vode imaju sadržaj $\delta^{13}\text{C}$ od -8 do -12 ‰, dok subtermalne i termalne vode imaju znatno manji sadržaj $\delta^{13}\text{C}$, koji na termalnom izvoru na Krupaji doseže čak -2.69 ‰, reflektujući tako jaku i prolongiranu izotopsku frakcionaciju sa matičnom stenom.

Na slici 8.13., prikazane su vrednosti $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ u kombinaciji sa odnosom molova $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$, na osnovu kojeg može da se definiše izvor neorganskog ugljenika u

vodi. Sadržaj $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ u toplim vodama je povišen sa nižim vrednostima odnosa $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$, što ukazuje da više temperature toplih izvora izazivaju CO_2 degazaciju i vode do blagog otpuštanja ugljenika. Visoke vrednosti koncentracija HCO_3^- , mogu ukazati na efekte izvora CO_2 sa velikih dubina.



Slika 8.13. Odnos izotopa $\delta^{13}\text{C}$ i jona $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ različitog tipa voda

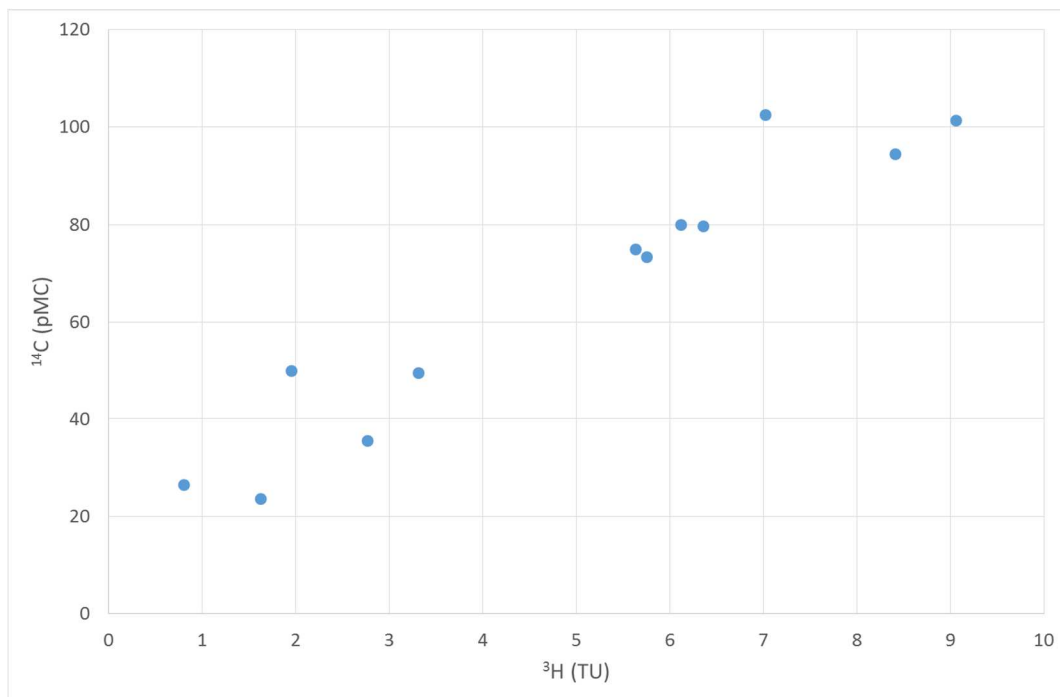
Za potrebe sagledavanja starosti i dubine cirkulacije podzemnih voda, sagledani su rezultati izotopskih analiza ^3H , $^3\text{H}+^3\text{He}$ i ^{14}C . Vode koje se ulivaju u ponor Busovate su sveže površinske vode, odnosno vode čije poreklo potiče od padavina, obzirom da sadrže najviše koncentracije tricijuma i ugljenika u vodi (9 TJ i 101 pMC). Takođe i ponori Velika Brezovica i ponor Nekudova imaju dosta visoke vrednosti tricijuma i ugljenika, ali su ove vrednosti u vodi ponora Velike Brezovice niže u odnosu na vrednosti u vodi ponora Busovate. Nakon proračuna starosti ponorskih voda, konstatovano je da se na ponorima Velike Brezovice i Busovate, vode nastale od padavina, mešaju sa vodama koje se proceduju iz pripovršinske pukotinske izdani paleozojskih škriljaca, u kojima se delimično zadržavaju i stiču određenu starost (starost voda na Buosvati je 87 godina, dok je na Velikoj Brezovici čak 536 godina).

Izotopskim analizama tricijuma i ugljenika u hladnim izvorskim vodama, potvrđeno je da se u vodama Kučajsko-beljaničkog masiva istovremeno nalaze koncentracije tricijuma i ugljenika, čak i ako je sadržaj ugljenika niži nego što su skorašnje vrednosti (~100 pMC).

Takođe, i tople pojave, kao što su subtermalni izvori u Suvom Dolu, Krepoljinskoj banjici, Krivom Viru, čak i termalne pojave Milanovačke banjice, Krupaje i Sisevca, sadrže tricijum u vodi, što se dešava kada se unutar karstnog sistema javlja mešanje starije i mlađe vode.

Generalno, ukoliko se cirkulacija podzemnih voda odvija bez mešanja voda unutar sistema, uzorci vode sa sniženim vrednostima ^{14}C neće sadržati tricijum. Karstni sistem, zbog značajne karstifikacije stenske mase, kao i zbog povezanosti karstnih kanala u podzemlju, često pokazuju prisustvo tricijuma i u starim vodama, što može biti posledica mešanja mlade vode, u plićoj zoni sistema, sa vodama dubokih karstnih kanala. Upravo zbog ove veze podzemnih voda i izraženog mešanja vode u okviru karstnih sistema, prilikom tumačenja starosti se u toploj vodi utvrđivao sadržaj najstarije komponente u vodi izotopom ^{14}C , dok se u mlađim vodama detektovala najveća starost mlade komponente metodom $^3\text{H}/^3\text{He}$.

Na slici 8.14. je prikazana veza sadržaja ugljenika i tricijuma u vodi, na osnovu koje se uočava veza gde niži sadržaj ugljenika, prati i niži sadržaj tricijuma. Međutim, u slučaju karstnih izdani, kada se definiše prisustvo i ugljenika i tricijuma, odnosno starije i mlađe komponente, za proračun starosti vode se uvek uzima starija komponenta, jer ona ukazuje na pravu starost vode, dok mlađa komponenta ukazuje na starost mlade vode koja se starijoj vodi pridružila prilikom njene cirkulacije ka zoni dreniranja.



Slika 8.14. Dijagram tricijuma i ugljenika u uzorcima podzemnih voda

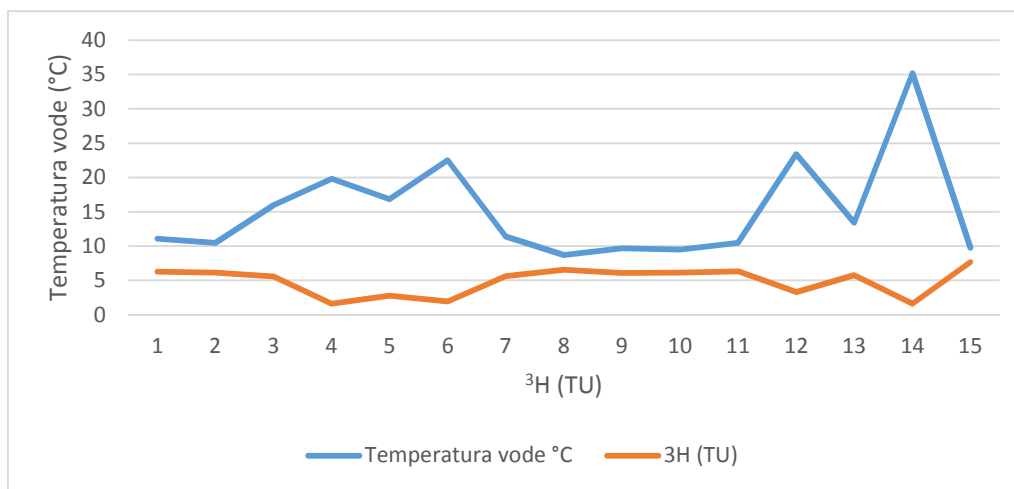
Metodom tricijuma izvršena je procena starosti mlađih voda. Vrednosti tricijuma u vodi opadaju sa dubinom cirkulacije vode (tabela 176), kao i sa povećanjem temperature vode.

Tabela 176. Vrednosti tricijuma u površinskim i podzemnim vodama Kučajsko-beljaničkog masiva

	Naziv lokacije	Temperatura vode °C	^3H (TJ)	(+/-) 1 sigma
1	Ponor Busovate	7.7	9.06	0.36
2	Mlava	11.1	6.28	0.18
3	Belosavac-1	10.5	6.14	0.19
4	Belosavac-2	16	5.60	0.18
5	Suvi Do - Ribare	19.8	1.63	0.05
6	Krepoljinska Banjica	16.8	2.77	0.13
7	Milanovačka Banjica	22.5	1.95	0.12
8	Krupajsko vrelo	11.4	5.64	0.17
9	Veliko Vrelo	8.7	6.56	0.20
10	Malo Vrelo	9.7	6.09	0.18
11	Grza	9.5	6.12	0.18
12	Vrelo Crnog Timoka	10.5	6.35	0.24
13	Krivovirska banjica	23.4	3.31	0.17
14	Vrelo Crnice	13.4	5.75	0.23

15	Sisevac bušotina	35.2	1.63	0.85
16	Zivkova Reka	9.8	7.70	0.53
17	Velika Brezovica	7.9	8.41	0.26
18	Nekudovo Ponor	8	7.02	0.22

Posmatrajući temperature voda sa izvora i bušotina, sa vrednostima TJ, odnosno starosti voda, uočava se jasna zavisnost (slika 8.15.), odnosno zapaža se da se sa povećanjem temperature, smanjuje vrednost tricijuma, što potvrđuje da su vode sa najvišim temperaturama zapravo i najstarije vode.



Slika 8.15. Dijagram zavisnosti temperature i starosti voda

Tricijumove vrednosti voda na termalnoj bušotini u Sisevcu, čija je temperatura najveća u odnosu na druge izvore (36°C), kao i prirodnog termalnog izvora na Krupajskom vrelu, su najniže i imaju vrednosti ispod 2 TJ. Na osnovu tabele 16, vidi se da ove vode spadaju u grupu vrednosti od 0.8-2TJ, što govori da se radi o mešavini submodernih (starijih) voda i skorije infiltriranih, odnosno modernih voda starih između 5 i 10 godina.

Subtermalni izvori imaju temperaturu do 20°C i vrednost tricijuma do 4 TJ, izuzetak je Belosavac 2, sa 5.6 TJ. Ove vode imaju sadržaj tricijuma, između 2-8 TJ, na osnovu čega spadaju u moderne vode stare između 5 i 10 godina. Međutim, obzirom da su njihove vrednosti u nižem opsegu, odnosno ispod 5 TU, ukazuju na procentualno učešće starijih voda, ali znatno veće učešće hladnih – modernih voda, što pokazuju i njihove znatno niže temperature voda u odnosu na starije i toplije vode.

Na kraju, hladne vode imaju najviše vrednosti tricijuma (5.7 TJ, 6.2 TJ i 7 TJ). Na osnovu vrednosti koje se nalaze u gornjoj polovini granice između 2-8 TJ, izvodi se zaključak da se radi o mladim vodama. Veza između starosti u TJ i tipa cirkulacije podzemnih voda, prikazana je tabeli 177.

Tabela 177. Tip cirkulacije podzemnih voda i njihova starost

Tip cirkulacije voda	Vrednost T (TJ)	Starost voda
Malo vrelo – gravitaciono vrelo	6.09	mlade vode
Vrelo Crnice – kvazisifonalno vrelo	5.75	polu mlade vode
Krupajsko vrelo – sifonalno vrelo	5.64	polu mlade vode
Krivovirska banjica – duboka cirkulacija	3.31	starije vode
Krepoljinska banjica – duboka cirkulacija	2.77	starije vode
Suvi Do subtermalna – veoma duboka cirkulacija	1.63	najstarije vode

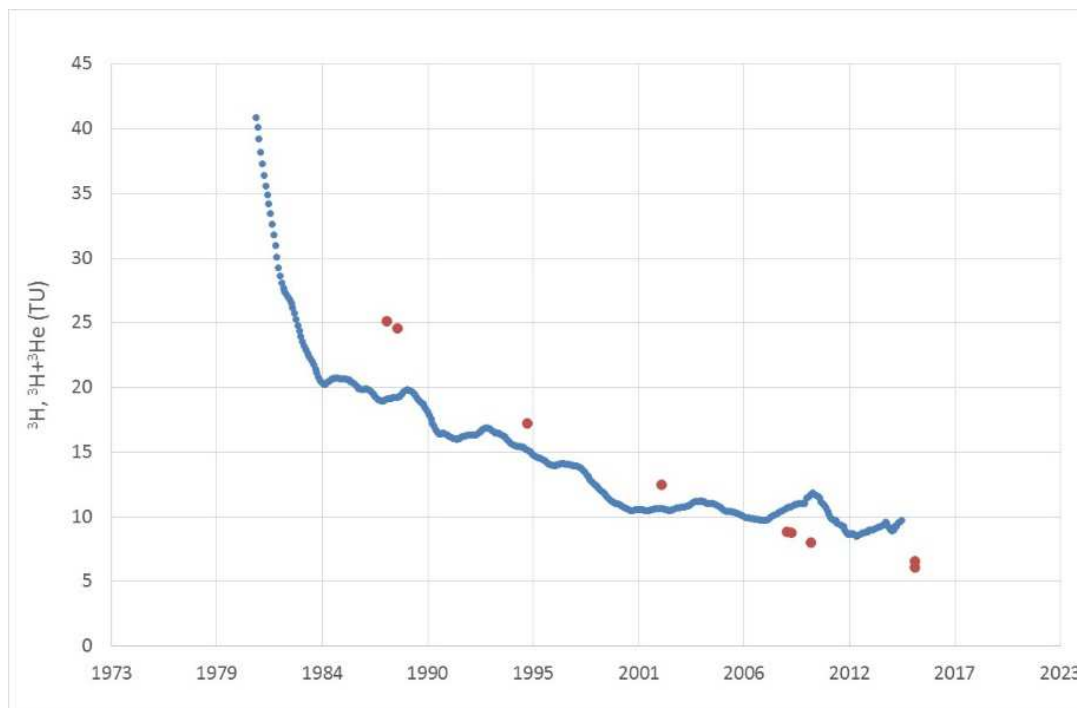
Starost hladnih voda dobijena je metodom $^3\text{H}/^3\text{He}$, a rezultati su pokazali da se starosti hladnih voda kreću od 0 do 26.6 godina (tabela 178).

Tabela 178. Starost vode dobijene metodom $^3\text{H}/^3\text{He}$

	$^3\text{H}/^3\text{He}$ starost (godine)	Neposredna starost (godine)
Mlava	6,0	1,2
Belosavac-1	12,5	0,9
Belosavac-2	26,6	0,7
Krupajsko vrelo	26,1	0,7
Veliko Vrelo	0,0	1,4
Vrelo Crnog Timoka	5,7	1,1
Vrelo Crnice	19,5	0,8
Malo Vrelo	0,0	1,5
Grza	4,7	1,2

Proveravanje verodostojnosti rezultata izvršeno je plotovanjem dobijenih vrednosti (slika 8.16.) na dijagram sadržaja tricijuma u površinskim vodama u Evropi, odnosno sadržaj padavina u Beču. Rezultati padaju veoma blizu liniji tricijuma u Evropi, ali se takođe

uočavaju i određene razlike. Naime, mlade vode starosti 0-5 godina, imaju niže početne koncentracije tricijuma, dok vode starosti preko 10 godina imaju više početne vrednosti tricijuma. Ovaj efekat može biti posledica mešanja voda ili degazacije, odnosno gubitka određene količine ^3He prilikom uzimanja uzorka u vodi koja teče.



Slika 8.16. Sadržaj tricijuma u padavinama u Austriji, Beču (plava boja) i početne vrednosti tricijuma ($^3\text{H}_{\text{izmeren}}+^3\text{He}_{\text{tritiogenic}}$) u uzorcima vode u karstu Kučajsko-beljaničkog masiva (crvene tačke)

Rezultati starosti voda ukazuju da se najmlađe vode dreniraju na Velikom i Malom vrelu, što potvrđuje prethodnu teoriju o gravitacionom tipu cirkulacije ovih voda (Stevanović, 1991, Milanović, 2010). U sledeću grupu starosti spadaju vrelo Mlave, Crnog Timoka i Grza, čija starost se kreće od 4.7 godina do 6 godina, što ukazuje na njihovu pliću sifonalnu cirkulaciju.

Vrelo Belosavac ima starost od 12.5 godina i predstavlja sifonalno vrelo, vode duže vremena provedu u podzemlju, što ide u prilog postojanim kvalitativnim fizičko-hemijskim karakteristikama voda. Vrelo Belosavac-2, ima znatno veću starost voda, a što dokazuje i blago povišena temperatura vode na ovom vrelu, koja na površinu terena izbija uz oslobađanje gasova.

Krupajsko vrelo i vrelo Crnice imaju veću starost vode, što ukazuje na razviće kanala koji zaležu dosta dublje. Pored toga što je metodom $^3\text{H}+^3\text{He}$ dobijena njihova starost od 19.5 godina za vrelo Crnice i 26.1 godina za Krupajsko vrelo, ova dva vrela u vodi imaju sadržaj i ugljenika i tricijuma, što potvrđuje njihovu starost. Takođe, pored sadržaja ugljenika i tricijuma, drugi pokazatelj njihove starosti predstavlja i povišen sadržaj radiogenetskog helijuma iz stene, što predstavlja dokaz da je voda bila duži period u kontaktu sa stenskom masom.

Uporedo sa merenjem sadržaja plemenitog gasa ^3He , vršeno je i merenje ostalih plemenitih gasova, na osnovu kojih su proračunati temperaturni uslovi, odnosno temperature vazduha, koji su vladali na istražnom prostoru u vreme infiltriranja vode u podzemlje. Dobijene temperature se kreću od 8.17 (Mrljiš) do 11.78 °C, čime se dokazuje da se najveće količine voda koje prihranjuju karstnu izdan, infiltriraju upravo u prolećnom periodu, odnosno kada su najveće vode. Pored prihranjivanja karstnih kanala koji se dreniraju brzom cirkulacijom, upravo tada, zbog jakih pritisaka u sistemu i kanalima, prihranjuju se i dublje zone, odnosno kanali sa dubokom cirkulacijom podzemnih voda.

Rezultati sadržaja izotopa ^{14}C u uzorcima (tabela ^{14}C) pokazuju da se najniža vrednost procenta modernog ugljenika (pMC) nalazi u termalnom izvoru na Krupajskom vrelu (16.89 pMC), zatim u subtermalnom izvoru u Suvom dolu (23.65 pMC) i u termalnoj bušotini u Sisevcu (26.57 pMC). Narednu grupu čine nešto više vrednosti Krepoljinske banjice (35.61 pMC), zatim Krivovirska banjica (49.51 pMC), Milanovačka banjica (49.92 pMC) i na kraju bušotina na Krupajskom vrelu (52.05 pMC). Dalje, po visini sadržaja procenta modernog ugljenika, sledeću grupu čine izvori hladne vode Krupajsko vrelo (74.95 pMC), Vrelo Crnice (73.41 pMC), Crni Timok (79.75 pMC), a najveću vrednost od svih ispitivanih pojava ima vrelo Grze (80.07 pMC).

Najniže vrednosti procenta modernog ugljenika bi trebalo da ukažu na najdužu cirkulaciju podzemnih voda, srednje na pliće zaleganje karstnih kanala i kraći boravak vode u podzemlju, dok najviše vrednosti ukazuju na mlade vode, koje zbog svoje, takođe niže vrednosti u odnosu na sveže, ponorske vode, ukazuju na dublju cirkulaciju vode, ali pliću u odnosu na prethodnu grupu.

Međutim, definisanje starosti voda, odnosno vremena koje je voda provela u podzemlju, zavisi od niza drugih faktora, koje je bilo neophodno uzeti u obzir prilikom proračuna

starosti voda metodom ugljenika ^{14}C . Sadržaj ugljenika (izražen u pMC) zavisi od stene zastupljene u izdani, odnosno od količine rastvorenog karbonata u vodi (sadržaja $\delta^{13}\text{C}$ iz vode i sadržaja $\delta^{13}\text{C}$ iz stene), kao i od početnog sadržaja ugljenika (inicijalnog ugljenika), stoga su ove vrednosti terenskim i laboratorijskim istraživanjima utvrđene, na osnovu kojih su dobijeni rezultati prikazani u tabeli 179.

Tabela 179. Koncentracije ugljenika i godine

	^{14}C (pMC)	Vrednost $\delta^{13}\text{C}$ u uzorku vode ‰	^{14}C starost (godine) ($^{14}\text{C}_{\text{inic}}=100$ pMC) ($\delta^{13}\text{C}$ u vodi i steni je uzet u obzir)
Ponor Busovate	101.43	-15.41	Moderna voda
Suvi Do subtermalna	23.65	-6.61	5.979
Krepoljinska Banjica	35.61	-6.21	2.171
Milanovačka Banjica	49.92	-4.72	-2431
Krupajsko vrelo	74.95	-8.71	Moderna voda
Krupajsko termalno vrelo	16.89	-3.11	3.990
Bušotina B-1	52.05	-5.91	Moderna voda
Grza	80.07	-7.69	Moderna voda
Vrelo Crnog Timoka	79.75	-6.81	Moderna voda
Krivovirska banjica	49.51	-7.17	432
Vrelo Crnice	73.41	-9.5	Moderna voda
Bušotina SIS-1	26.57	-4.65	2.687
Ponor Velike Brezovice	94.52	-15.14	536
Ponor Nekudovo	102.46	-12.1	moderne

Na kraju, na osnovu svih prikazanih rezultata starosti voda, može se zaključiti da se na Kučajsko-beljaničkom masivu nalaze vode starosti od najmlađih do veoma starih voda.

Pored ovih relativno starih voda, na istražnom prostoru su zastupljene i vode čija starost iznosi i do šest hiljada godina, pa se tako izvodi zaključak da se najdublja cirkulacija odvija po severozapadnom, zapadnom i jugozapadnom delu masiva, što se odražava na njihov temperaturni režim, kao i na hidrogeohemijske karakteristike voda.

8.4. Osvrt na potencijal i održivo korišćenje hladnih podzemnih voda Kučajsko-beljaničkog maisva

Na osnovu podataka potrošnje vode u svetu, konstatovano je da se trenutno troši oko 50% od ukupnih raspoloživih rezervi vode, dok se u naredne 2 decenije očekuje povećanje potrošnje vode do 80% ukupnih rezervi (Majkić-Dursun, 2011). Ovakav porast potrošnje vode izazvao bi mnoge socijalno-ekonomske posledice po stanovništvo naše planete.

U mnogim evropskim zemljama se za vodosnabdevanje upravo zahvataju vode iz podzemlja, pa tako u Srbiji čak 75% vode koja se koristi u ove svrhe potiče iz različitih tipova izdani. Najveće rezerve se nalaze u okviru intergranularne sredine uglavnom neogene i kvartarne starosti, kao i u karstnim terenima (Polomčić *et al*, 2012), dok se pukotinski tip izdani ne karakteriše značajnim rezervama podzemnih voda. Količine podzemnih voda, izraženih u m³/s, koje se eksploatišu u Srbiji u zavisnosti u kom tipu izdani su zastupljene, prikazane su u tabeli 180.

Tabela 180: Prikaz eksploatacije podzemnih voda (m³/s) prema tipovima izdani (Dimkić *et al*, 2007, Polomčić *et al*, 2012); Podaci Vodoprivredne osnove Srbije

HG jedinica	Aluvijalne izdani	OVK, Osnovni vodonosni kompleks	Neogen	Karst	Pukotinske izdani	Ukupno
Banat i Bačka	1.45	3.57	0.43	0	-	5.45
Srem, Mačva, Sava/Tamnava	6.97	0.34	0.5	0.03	-	7.84
Centralna Srbija	2.58	-	0.84	0.43	-	3.85
Istočna Srbija	0.62	-	0.06	1.71	-	2.39
Jugozapadna Srbija	0.24	-	0.14	1.61	-	1.99
Zapadna Srbija	1.05	-	0.06	0.40	0.02	1.53
UKUPNO	12.91	3.91	2.03	4.18	0.02	23.08

Iz tabele se vidi da sumarne količine voda koje se eksploatišu u Srbiji iznose oko 23 m³/s, pri čemu se najveće količine zahvataju iz aluvijalne izdani. Znatno manje količine u odnosu na aluvijalne naslage, zahvataju se iz karstnih izdani, zatim iz OVK i neogena,

dok su količine voda koje se zahvataju iz pukotinske izdani praktično zanemarljive u odnosu na aluvijalnu izdan.

Nažalost, i pored velike eksploatisanosti, pojedina izvorišta u Srbiji su nedovoljno ispitana, što može dovesti do mišljenja da podzemnih voda nema u dovoljnim količinama (Stevanović, 1991), ili pak da utiče na njihovo neracionalno korišćenje. Iako se najveće količine zahvataju iz aluvijalne sredine, eksploatisanje ovih voda prate i određeni problemi, kao što su starenje bunara i često nepovoljan hemijski sastav voda, što je povezano sa dubinom zaleganja izdani. Zato se poseban akcenat stavlja na podzemne vode iz karsta.

Kučajsko-beljanički masiv raspolaže značajnim rezervama hladne vode u okviru karstne izdani, izuzetno povoljnih kvalitativnih karakteristika voda. Deo voda sa velikih vrela uveliko se kaptira za vodosnabdevanje sela i gradova. Istraživanja su dokazala postojanje rezervi hladnih voda, koje se nalaze znatno dublje u karstnom sistemu, a koje su ipak obnovljive u vremenu i prostoru. Do sada su rezerve podzemnih voda Kučajsko-beljaničkog masiva bile predmet više naučnih istraživanja, kao i projekata finansiranih od republičkih i međunarodnih institucija. Kao što je već navedeno, određivanje rezervi podzemnih voda ovog masiva su se uglavnom odnosile na hladne vode, pri tome ne uzimajući u obzir rezerve podzemnih voda formiranih u okviru znatno dubljih delova masiva.

Na osnovu dosadašnjih istraživanja (Stevanović, 1981, 1986, 1991, Ristić 2007, Milanović 2010, Stevanović *et al*, 2012b), generalno se mogu dati podaci o rezervama podzemnih vodnih resursa za određene delove Kučajsko-beljaničkog masiva (strateški projekat „Monitoring podzemnih vodnih resursa Srbije“), kao što su severni i južni deo Beljanice i deo u okviru Kučajskog masiva, koji se drenira preko Crnice i Grze. Pa tako vrednosti raspoloživih rezervi za severni deo Beljanice na srednje godišnjem nivou iznosi $Q_{\text{rasp}}=3.8 \text{ m}^3/\text{s}$, za južni deo iznosi $Q_{\text{rasp}}= 0.82 \text{ m}^3/\text{s}$, dok za vrelo Crnice i Grzu iznosi na srednje godišnjem nivou $Q_{\text{rasp}}= 0.87 \text{ m}^3/\text{s}$ (Stevanović *et al*, 2012b).

Najznačajnija vrela, koja još uvek nisu kaptirana za potrebe vodosnabdevanja, su svakako vrelo Mlave, Krupajsko vrelo, Veliko vrelo, Grza i vrelo Crnog Timoka. Ova vrela predstavljaju jaka karstna vrela, a za većinu je potvrđena starost vode od nekoliko (4

godine) do nekoliko desetina godina (26 godina), što ukazuje na njihovo dublje zaleganje u podzemlje i raspolaganje znatno većim količinama zdravih, podzemnih voda.

Zahvatanje ovih rezervi, sa ciljem njihovog održivog korišćenja, moguće je postići regulacijom karstne izdani. Stevanović (1981, 1986 i 1991) razmatra mogućnosti zahvatanja podzemnih voda ovog masiva za regionalno vodosnabdevanje, kao i mogućnost izgradnje trase regionalnog vodovoda do Beograda, čime bi se, kao alternativno rešenje, obezbedile količine voda koje bi obezbedile 30 % potreba grada. Pored krajnjeg korisnika (Beograda), izgradnjom ovakve trase regionalnog vodovoda, obezbedilo bi se i vodosnabdevanje naselja i gradova, koji se nalaze duž trase.

Milanović (2010) navodi da se za potrebe zahvatanja podzemnih voda Beljaničkog masiva, mogu primeniti sva klasična rešenja zahvatanja podzemnih voda, koja obuhvataju direktno zahvatanje voda iz karstnog kanala potapajućom pumpom, izradu bušenih bunara, kao i izgradnju kaptažnih galerija sa bunarskim zahvatom.

Iako je potencijal ovog masiva u pogledu vodosnabdevanja kvalitetnom pijaćom vodom izuzetan i može da zadovolji čak regionalne potrebe, brojna su sela koja se nalaze na samom masivu, a nemaju rešeno pitanje vodosnabdevanja. Iz tog razloga, prvenstveno bi se morala usmeriti pažnja na rešavanje pitanja lokalnog vodosnabdevanja, a zatim i mogućnosti iskorišćavanja podzemnih voda na širem nivou.

8.5. Predlog korišćenja termalnog potencijala karstnih voda

Razvoj turizma u Srbiji je u porastu, pa se sve više veći gradovi, planine, reke i jezera pretvaraju u atraktivne turističke destinacije. Pored ovog, u velikoj ekspanziji je razvoj seoskog turizma, gde se stavlja akcenat na seoski turizam u okviru brdsko-planinskih područja, koji u ponudi ima ekološku domaću hranu, zdravu sredinu, aktivan odmor u prirodi itd. Istočna Srbija predstavlja veliki potencijal u pogledu razvoja turizma, jer je veoma bogata prirodnim lepotama. Međutim, iako je zbog svojih brdsko-planinskih predela veoma atraktivna oblast za razvoj turizma, turizam u istočnoj Srbiji nedovoljno je razvijen.

Kako je u okolnim zemljama (Mađarska, Slovenija, Italija, Bugarska, Rumunija itd.) zavladao trend razvoja wellness turizma, upravo se poseban značaj razvoju ovog tipa turizma daje i u Srbiji, zbog velikog broja perspektivnih lokacija u pogledu dobijanja

geotermalne vode. Vode u oblasti Kučajsko-beljaničkog masiva se ne svrstavaju u banjske vode, ali zbog svoje povišene temperature predstavljaju značajan potencijal za razvijanje wellness centara, koji privlači veći broj turista.

Tople vode na Krupajskom vrelu i Sisevcu se već koriste u rekreativne svrhe (bazeni), dok su ostali subtermalni i termalni resursi u potpunosti neiskorišćeni. Na lokaciji termalnog izvora u Suvom dolu, postoji bazen, koji je do pre 10 godina bio u funkciji, ali je zapušten i više se ne koristi. Vode Milanovačke i Krivovirske banjice, takođe se ne koriste. Bušotina na Krupajskom vrelu, iako ima konstantnu temperaturu od 18 °C, ne koristi se kao subtermalni resurs, već je kaptirana od 2016. godina za potrebe vodosnabdevanje tri sela u opštini Žagubica (Milanovac, Sige i Krupaja). Krepoljinska banjica je, zbog pouzdanih kvalitativno-kvantitativnih karakteristika, ušla u plan budućeg vodosnabdevanja naselja Krepoljin. Njeno zahvatanje i iskorišćavanje kao izvora subtermalnog potencijala za sada nije razmatrano.

Vranješ (2012) navodi da je najniža neophodna temperatura vode za grejanje u niskotemperaturnim sistemima grejanja (panelni sistem) – min. 30°C. Što ukazuje da se za sada samo vode u Sisevcu (36 °C) mogu koristiti u ove svrhe. Svaki hidrotermalni resurs koji ima temperaturu nižu od pomenute, mora da prolazi kroz sistem za zagrevanje, odnosno toplotne pumpe. Uz primenu toplotnih pumpi, moguće je značajno podići termalni gradijent i koristiti subtermalne i termalne vode Kučajsko-beljaničkog masiva (termalni izvor u Suvom Dolu, Milanovačka banjica, Krupaja termalna i Krivovirska banjica), kao jedan od zelenih vidova energije (Stevanović, 2011).

Milenić & Vranješ (2015) predlažu mogućnosti korišćenja geotermalnih resursa, a koje bi se mogle uvrstiti i u mogućnosti korišćenja subtermalnih voda Kučajsko-beljaničkog masiva (termalni izvor u Suvom Dolu, Milanovačka banjica, Krupaja termalna i Krivovirska banjica), uz korišćenje toplotnih pumpi:

- Grejanje zatvorenih i otvorenih prostora
- Toplifikacija plastenika i staklenika
- Sportsko-rekreativne i turističke svrhe
- Sušenje povrća i druge potrebe u poljoprivredi
- Industrijske potrebe

Kako mineralni sastav subtermalnih i termalnih voda nije povišen, isključuje se mogućnost zahvatanja voda u balneološke svrhe.

8.6. Lokacije i ocena dubine zahvatanja toplih voda u okviru pojedinih sistema

Sveobuhvatnim sagledavanjem rezultata istraživanja uslova formiranja podzemnih voda i njihove dubine cirkulacije po odabranim sistemima, izdvajaju se tri sistema, kao najperspektivnija za zahvatanje voda povišene temperature.

Kao najbolja lokacija, na kojoj je već i dobijena povišena temperatura, izdvaja se sistem Sisevac. Naime, istražnom bušotinom od svega 216 metara, dobijena je temperatura vode od 36 °C. Kako termalne vode bušotine SIS-1 ne predstavljaju najstarije vode u okviru masiva, može se pretpostaviti da se na većim dubinama, mogu dobiti više temperature vode u odnosu na temperaturu vode sa 216 metra. Uzimajući, sa rezervom, u obzir geotermalni gradijent (1°C na 33 m) nakon 216 metra, može se zaključiti da se na ~ 513 metru može očekivati temperatura vode od 45 °C. Ukoliko se u obzir uzme postojanje i uticaj grejnog tela (daciti) na temperaturu vode, na lokaciji Sisevca se mogu očekivati i više temperature od pomenutih.

Sledeći sistem koji se izdvaja po mogućnostima dobijanja povišene temperature vode je sistem Krupajskih pojava. Iako bušotinom od 400 metara nije dobijena temperatura vode viša od temperature na prirodnom izvoru 26 °C, na 400-om metru dubine, konstatovana je voda temperature od 25 °C, a koja se usled jakih mešanja u pripovršinskom delu sa hladnom vodom spušta, pa na bušotini ističe 18 °C. Generalno, uzimajući sa rezervom geotermalni gradijent, moguće je očekivati temperaturu vode od 35 °C (idealnu za korišćenje u različite svrhe), na dubini ~ 697 metara. Ukoliko se uzme u obzir da grejno telo (daciti) postoji u dubljim zonama izdani koja se drenira na lokaciji Krupajskog vrela, može se očekivati da se u zoni Krupajskih vrela, ipak mogu nabušiti vode veće temperature od pomenutih. U cilju detektovanja rasednih zona i preciznijeg lociranja bušotine, neophodno je sprovesti detaljna geofizička istraživanja, s tim što, generalno, istraživanja treba pomeriti severno od javljanja Krupajskih pojava, odnosno približiti zoni proboja tercijarnih vulkanita.

Treći sistem, koji se na izgled čini najmanje perspektivnim, je sistem Krivi Vir. Najviše temperature vode koje su zabeležene na Krivovirskoj banjici iznosile su 23.4 °C, a

zabeležene su u minimumu. Jaka variranja temperature i hidrohemijskih parametara ukazuju na intenzivno mešanje voda u sistemu. Međutim, period minimuma jasno ukazuje na isticanje vode termalnog karaktera i starosti od 432 godine, što je čini najmlađom termalnom vodom u okviru masiva. Istražna bušotina u Krivom Viru TKV-1, dubine od 254 metara i temperature vode od 20.5 °C ukazuje neophodnost povećanja dubine bušenja. Uzimanjem u obzir geotermalni gradijent, može se zaključiti da se na dubini od ~ 732 metara, može očekivati temperatura vode od 35 °C. Kako se geotermalni gradijent ne može univerzalno primeniti na celu planetu Zemlju, odnosno svaka geološka sredina ima svoj određeni geotermalni gradijent (Vranješ, 2012), definisane dubine se ne mogu smatrati konačnim i preciznim.

Generalno, termalne vode u okviru masiva zaležu veoma duboko, te je na odabranim lokacijama neophodno izvesti bušenje preko 500 metara, kako bi se dobile više temperature voda.

Pored ovih, najperspektivnijih sistema, i lokacije na severnom i severozapadnom delu masiva mogu da daju dobre rezultate u pitanju dobijanja voda povišene temperature. Akcenat se stavlja na severozapadni deo, u kom je površinski detektovan najveći broj proboja vulkanita, pa se smatra da se u ovoj zoni na većim dubinama mogu naći vode značajno povišene temperature. Ono što je problem kod zona severnih sistema, je veoma velika starost podzemnih voda, sa generalno nižim temperaturama (subtermalnog karaktera), što može da ukaže na veoma duboku cirkulaciju vode, bez direktnog kontakta sa grejnim telom, na osnovu čega rezultat mogu da budu vode nabušene na izuzetno velikim dubinama (i do 1000 metara), sa malo povišenim temperaturama u odnosu na prirodne subtermalne izvore.

8.7. Predlog mera zaštite hladnih i toplih voda Kučajsko-beljaničkog masiva

Sa aspekta zaštite podzemnih voda, karstni tereni predstavljaju nepovoljnu sredinu, odnosno kompleksnu sredinu sa cirkulacijom vode kroz kanalske sisteme i matričnu poroznost. Ono što predstavlja olakšicu u pogledu zaštite podzemnih voda, je činjenica da je najveći deo karstnih terena u zonama prihranjivanja nenaseljen, pa se tako smanjuje pritisak na potencijalno zagađenje podzemnih voda karsta (Stevanović *et al*, 2011).

Zagađenja koja se javljaju u karstnim terenima fizičkog, hemijskog, bakteriološkog porekla i radioaktivnog. Bakteriološko zagađenje može dospeti u podzemne vode na mnogo načina, ali najčešće je to infiltracijom površinskih voda, gde padavine gravitirajući ka ponorskoj zoni spiraju sa površine zemlje zagađujuće supstance nastale dejstvom poljoprivrede ili stočarstvom, raspadanjem suspendovanog materijala, ali i procurivanjem iz cisterni ili nekih fabrika ili farmi (Kelly *et al*, 2009, Davraz & Varol 2012, Sinreich *et al*, 2014).

Istraživanja u karstu sa osvrtom na zaštitu podzemnih voda, veliku pažnju su imala još početkom dvadesetog veka. Kako karstne podzemne vode poprimaju sve veći značaj, to je i istraživanje u tu svrhu krajem dvadesetog veka postalo detaljnije i intenzivnije. Opitima obeležavanja podzemnih voda u karstu, lako se može utvrditi veza ponor-izvor i na taj način uspostaviti stroga zona zaštite u okolini ponorske zone.

Sa druge strane, prihranjivanje karstne izdani se vrši preko niza vrtača, pukotina manjih i većih dimenzija, rasprostranjenih po karstnom terenu, pa se zaštita podzemnih voda ne zasniva samo na strogoj zaštiti direktnog, koncentričnog poniranja voda u sistem, već na zaštiti cele površine prihranjivanja, kao i epikarst zone. Pri uspostavljanju zona sanitarne zaštite u karstnim terenima, neophodno je sagledati veliki broj geoloških i hidrogeoloških parametara. Samo sa takvim pristupom je moguće u potpunosti sačuvati karstnu izdan za lokalna, pa čak i regionalna vodosnabdevanja.

Definisanje zona zaštite u karstnim sredinama značajno se razlikuju u pogledu vremenskog kriterijuma koji se koriste u nekarstnim terenima, naročito kada je u pitanju veliki karstni masiv, koji se drenira preko nekoliko koncentrisanih punktova. Milanović & Vasić (2011) navode da: „jedan od osnovnih preduslova za kvalitetnu strategiju zaštite jednog karstnog masiva, odnosno karstne izdani, je određivanje zona sanitarne zaštite, i to kroz izradu modela i karte ugroženosti podzemnih voda karstne izdani. Samo takvim “strogim” principima i merama zaštite karstnih izdaničkih voda moguće je sačuvati ove izdani za buduća lokalna, pa i regionalna vodosnabdevanja“.

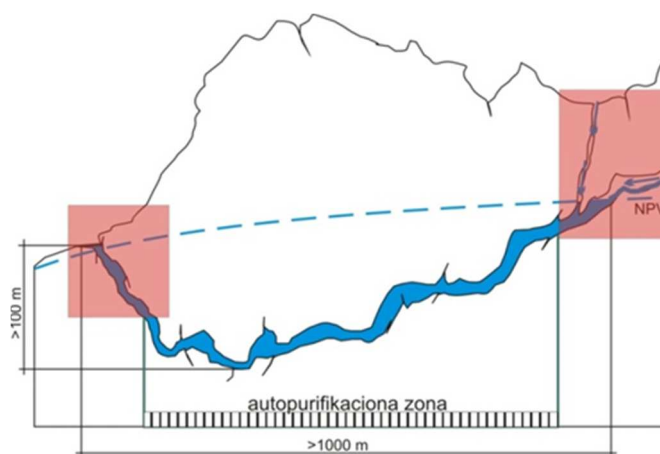
Samoprečišćavanje vode predstavlja skup prirodnih procesa koji dovode do eliminacije određenih nepoželjnih organskih, pa i neorganskih biološki razgradljivih, supstanci iz površinskih i podzemnih voda (Dragišić i Polomčić, 2009).

Autopurifikaciona svojstva karstne izdani predstavljaju njenu sposobnost da se zagađena voda dospela u podzemlje u toku njene cirkulacije više ili manje prečisti određenim fizičko-hemijskim ili biološkim procesima, koji nastaju u kontaktu vode sa karbonatnom sredinom. Fizički (razblaživanje i taloženje) i hemijski (oksidacija, redukcija i hidroliza) procesi, zajedno sa biološkim procesima, znatno utiču na kvalitet infiltrirane vode i u zavisnosti od vremena zadržavanja vode u podzemlju, mogu delimično ili u potpunosti otkloniti zagađujuću supstancu (Milanović S. & Vasić, 2011).

Zavisnost samoprečišćavajuće sposobnosti karstne izdani prvenstveno zavisi od veličine karstnih kanala i tipa cirkulacije koji je zastupljen u okviru te izdani, pa se, obzirom na brz režim tečenja vode u gravitacionim sistemima, voda nedovoljno pročisti, što je posledica kratkog vremena zadržavanja u podzemlju.

U principu, sposobnost samoprečišćavanja karstne izdani javlja se samo u sistemima sa dubokom sifonalnom cirkulacijom, gde usled anaerobnih uslova, bakteriološko zagađenje može biti delimično ili potpuno otklonjeno iz podzemnih voda (Vasić, 2016).

Kada je karst u pitanju, izdvajaju se dve zone (slika 8.17.), koje su jako osetljive na zagađenje, a koje ne poseduju mogućnost prečišćavanja podzemnih voda. Prva zona se odnosi na zonu prihranjivanja podzemnih voda, odnosno na ponorsku zonu, odakle vode koncentrično poniru u podzemlje, dok se druga zona odnosi na pripovršinsku zonu, odnosno zonu gde se podzemne vode mešaju sa pripovršinskim vodama (Milanović S, 2004).



Slika 8.17. Shematski prikaz zona uticaja površinskog faktora kod duboke sifonske cirkulacije (preuzeto: Milanović S, 2004, Milanović S. & Vasić, 2011).

Kao što se uočava na slici, zona prihranjivanja i zona isticanja predstavljaju najveći rizik za unošenje zagađujućih komponenata u karstne vode. Milanović S. & Vasić (2011) izdvajaju faktore, koje je neophodno razmotriti kada je u pitanju zaštita podzemnih voda i definisanje zona zaštite:

- tipovi i lokacije koncentrisanih mesta i difuznih zona poniranja površinskih voda
- vreme koje voda provede u podzemlju (mean residence time)
- rastojanje koje podzemna voda treba pređe od mesta infiltracije do vodozahvatnog objekta

Pored ovih, za definisanje zona zaštite potrebno je poznavati i morfologiju kanala i geološku strukturu terena i druge elemente karstnog sistema. U cilju definisanja prethodno navedenih faktora, ranije je bilo neophodno sprovesti niz metodoloških postupaka, međutim usavršavanjem primene izotopskih metoda u karstu, povećanjem broja raspoloživih izotopa u te svrhe, ova istraživanja su pojednostavljena i postala jedinstveni metodski postupak u rešavanju problema u karstu, kao i hidrogeologiji uopšte (Vasić, 2016).

Utvrđivanjem zona sanitarne zaštite u karstu bavio se veliki broj istraživača i naučnika, pa tako Stevanović (1991) izdvaja:

- Zonu neposredne zaštite, odnosno zonu neposrednog zaleđa sa zonom isticanja
- Zonu celog slivnog područja

Milanović P. (1999) pak izdvaja četiri zone zaštite, koje se odnose na holokarst, pretežno hercegovački (Milanović S. & Vasić, 2011):

I ZONA - Područje neposredne zaštite, koja obuhvata izvorište i granica mora biti udaljena minimalno 50 metara od vodozahvata u smeru dotoka vode.

II ZONA - Zona veoma stroge zaštite i strogih ograničenja, koja obuhvata delove sliva koji se nalaze u neposrednom zaleđu izvorišta i ponorske zone. Područje u krugu 20 - 30 m oko otvora ponora treba da bude zaštićeno ogradom.

III ZONA - Zona stroge zaštite, koja obuhvata ponore koji pripadaju slivu i imaju vezu sa objektima vodozahvata.

IV ZONA - Spoljašnja zona zaštite, koja predstavlja najširi pojas zaštite i nalazi se između spoljnih granica III zone i vododelnica prema susednim slivovima.

Na osnovu dobijenih rezultata izotopskih analiza i utvrđenog vremena trajanja cirkulacije od zona infiltracija do zona isticanja, može se pretpostaviti koje su autopurifikacione sposobnosti istraživane karstne sredine. Sa dužim periodom zadržavanja vode u sistemu kanala, što važi za periode minimuma na hladnim vrelima i za sve termalne i subtermalne pojave, povećavaju se autopurifikaciona svojstva izdani. Ukoliko dođe do zagađenja podzemnih voda na ulazu u sistem, koncentracija zagađujuće supstance će se smanjiti tokom tečenja kroz podzemlje, odnosno biće znatno niža u zoni dreniranja (Milanović S. & Vasić, 2011).

Kod voda sa tipičnom gravitacionom cirkulacijom, kao što je slučaj vrela na istočnoj strani masiva i Velikog i Malog Vrela, čija starost iznosi od nekoliko dana u periodu velikih voda do nekoliko meseci u periodu recesije, autopurifikaciona moć izdani je veoma mala i ne može imati značajan uticaj na smanjenje zagađenja, ukoliko do njega dođe. Iz tog razloga je na pojavama sa brzom, čak rapidnom cirkulacijom voda kroz podzemlje, neophodno pravilno uspostaviti zone sanitarne zaštite, čime bi se mogućnost unošenja zagađujuće materije u podzemne vode smanjila na minimum. Uspostavljanje 4 zone zaštite predložene od P. Milanovića (1999) u potpunosti bi zaštitile kvalitet podzemnih voda brze, gravitacione cirkulacije.

Karstna vrela kod kojih je izotopskim analizama i opitima obeležavanja potvrđeno postojanje više nivoa karstnih kanala, gde kanali koji plitko zaležu odražavaju veoma brzu cirkulaciju podzemnih voda, sa vremenom zadržavanja vode u podzemlju od svega nekoliko dana, dok dublji kanali koji se dreniraju u periodu recesije odražavaju usporenu cirkulaciju voda (4.7-26.6 godina), takođe zahtevaju uspostavljanje pomenute 4 zone zaštite, kako bi se sačuvao kvalitet voda kroz sve hidrološke cikluse.

Podzemne vode velike starost (preko 1000 godina), koje duboko zaležu u podzemlje, ne zahtevaju postavljanje 4 zona sanitarne zaštite. Najveći pritisak na kvalitet ovih voda javlja se u samoj zoni isticanja, pa je pored uže izvorišne zone, neophodno uspostaviti i širu zonu zaštite koja obuhvata zaleđe zone isticanja.

Karst Kučajsko-beljaničkog masiva je veoma dobro zaštićen i za sada nema zagađenja antropogenog porekla. Ipak, za pravilno utvrđivanje zona sanitarne zaštite u karstu najbolje je primeniti više metodoloških postupaka.

8.8. Osvrt na značaj i upotrebljivost korišćenih metoda za postavljene ciljeve istraživanja

U cilju definisanja geneze i uslova cirkulacije voda kompleksnih karstnih sistema Kučajsko-beljaničkog masiva, korićeno je više metodoloških postupaka. U uvodnom delu dat je osvrt na postavljene ciljeve i dobijene rezultate istraživanja odabranim metodološkim postupcima. Odabir metoda za rešavanje postavljenih zadataka pokazao se kao zadovoljavajući, međutim, određeni metodološki postupci nisu dali adekvatne rezultate za postizanje postavljenih ciljeva u istraživanjima Kučajsko-beljaničkog masiva.

Izotopski metod istraživanja dao je najznačajnije rezultate za definisanje geneze, vremena boravka vode u podzemlju i dubine cirkulacije podzemnih voda. Sadržaj stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H utvrđen je u padavinama, površinskim i podzemnim vodama sa ciljem da se definiše njihova međusobna veza i na taj način utvrdi obnovljivost hladnih i toplih voda u vremenu i prostoru. Rezultati su pokazali da su hladne vode u jakoj vezi sa padavinama i površinskim vodama, što govori o njihovoj obnovljivosti u vremenu, dok subtermalne i termalne vode, kao i hladne vode sa dubokom sifonalnom cirkulacijom u periodu minimuma pokazuju izotopski sadržaj nezavisan od atmosferskih padavina. Dobijeni rezultati su zadovoljavajući, a primena stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H u ove svrhe u potpunosti zadovoljava postavljeni cilj.

Utvrđivanje sadržaja radioaktivnih izotopa ^3H , $^3\text{H}-^3\text{He}$ i ^{14}C u hladnim i toplim vodama, kao i stabilnog izotopa ^{13}C u vodi i steni, pomoglo je u definisanju starosti voda, čiji je rezultat doprineo proceni dubine zaleganja karstnih kanala i dubini cirkulacije određenih vrela. Pa se tako utvrdilo da vrela za koja se do sada smatralo da imaju tipično gravitacionu cirkulaciju, zapravo imaju i dublju zonu cirkulacije, iz koje se dreniraju vode u periodu minimuma. Takođe, rezultati su pokazali i da vode povišene temperature imaju znatno veće starosti (do 6.000 godina), što govori o dužini boravka vode i dubini zaleganja karstnih kanala u podzemlju, a samim tim i o karstifikaciji stene. Na osnovu svega navedenog, izvodi se zaključak da izotopski metod istraživanja predstavlja veoma dobar

metodološki postupak za definisanje geneze, vremena boravka vode u podzemlju i dubine cirkulacije podzemnih voda, stoga se može oceniti kao veoma pouzdan za istraživanja u karstu. Nedostaci ovog metodološkog postupka su svakako neophodnost velikog broja analiza i njihova veoma visoka cena, kao i nedovoljan broj laboratorija u zemlji koji radi izotopske analize.

Hidrogeohemijske metode istraživanja korišćene su sa ciljem da se utvrdi geneza podzemnih voda i postojanje grejnog tela koje utiče na temperaturu vode. Rezultati fizičko-hemijskih i jonskih karakteristika voda, kao i sadržaj plemenitih gasova i mikroelemenata u vodi, doprineli su boljem definisanju geneze podzemnih voda. Međutim, njihova primena sa ciljem da se utvrdi postojanje i uticaj grejnog tela na podzemne vode, nije dala dovoljno dobre rezultate. Na osnovu sastava vode, može se zaključiti da daci imaju uticaja na podzemne vode, ali se ne može pouzdano tvrditi da su oni jedini razlog povišene temperature u vodama subtermalnog i termalnog karaktera, obzirom da veliku starost podzemnih voda i njihovu dubinu zaleganja u podzemlje. Prednost ovog postupka se ogleda u preciznijem definisanju geneze podzemnih voda, dok je najveći nedostatak neophodnost velikog broja uzoraka, što značajno povećava materijalna sredstva istraživanja.

Osmatranje stepena rastvorljivosti karbonatnih pločica, jedan je od metodoloških postupaka koji je sproveden u okviru geohemijskih istraživanja. Ovaj metodološki postupak dao je određene podatke vezane za stepen rastvorljivosti karbonata u određenim uslovima (hladna, topla voda, površina terena, pećina i zemljište), međutim, vremenski okvir koji je poslužio za potrebe sprovođenja ovog metodološkog postupka (11 – 18 meseci), nije bio dovoljan za precizno i konačno iznošenje zaključaka o stepenu rastvaranja karbonata. Ovakav istraživački poduhvat zahteva znatno duži vremenski period istraživanja (> 3-5 godina), što je i najveći nedostatak ovog metodološkog postupka.

Meteorološki i hidrološki metodološki postupci veoma su značajni za utvrđivanje režima i bilansa podzemnih voda. Međutim za potrebe doktorske disertacije najviše su primenjeni sa ciljem da se utvrde temperaturni uslovi vazduha u zoni prihranjivanja, neophodni za tumačenje sadržaja plemenitih gasova u vodi i definisanje perioda kada su se vode infiltrirale u podzemlje, kao i da se utvrdi veličina atmosferskog taloga i njegov

uticaj na proticaje površinskih i podzemnih voda, samim tim i za utvrđivnije izmene kvalitativnih karakteristika u odnosu na kvantitativne karakteristike voda. Istraživanja su dala zadovoljavajuće rezultate, koji su bili od velikog značaja za definisanje geneze podzemnih voda. Prednosti ovog metodološkog postupka su mnogobrojne, dok se kao nedostatak izdvaja neophodnost dugotrajnog osmatranja parametara na dosta frekventnom nivou (dnevna).

Multivarijatnom statističkom analizom izvršeno je grupisanje podataka na osnovu njihove sličnosti, odnosno različitosti određenih osobina, što je doprinelo donošenju zaključaka iz velikih baza podataka. Iako je ova analiza dala dobre rezultate za određene grupacije podataka (vrela sa brzom cirkulacijom, termalne vode), opravdavajući odabir i izdvajanje sistema u okviru masiva, kao i ukazujući na hidrogeohemijske veze voda unutar odabranih sistema, metoda je ipak pokazala i veće nedostatke, kao što je neophodnost eliminisanja određenih pojava iz matrice i odstranjivanje nelogično izdvojenih veza.

Video-endoskopija i reinterpetacija podataka karotažnih merenja na određenim lokacijama vršena je sa ciljem da se utvrdi intenzitet, dubina i baza karstifikacije. Međutim, zbog nedovoljnog broja bušotina na kojima bi se mogla sprovesti video-endoskopija, ovaj metodološki postupak je dao rezultate samo na jednoj lokaciji, odnosno stečen je uvid u karstifikaciju stene, dok je reinterpetacijom karotažnih merenja definisana zona karstifikacije na kojoj cirkulišu subtermalne i termalne vode na određenim lokacijama. Na osnovu ovih podataka može se dati samo gruba procena dubine zaleganja karstnih kanala. Za preciznije definisanje baze karstifikacije, intenziteta i dubine zaleganja karstnih kanala, neophodno je video-endoskopijom osmatrati veći broj bušotina, znatno veće dubine od maksimalno postojećih 400 m na istražnom prostoru. Stoga se, kao nedostatak ovog metodološkog postupka, može izdvojiti nemogućnost njegove primene u slučaju nedovoljnog broja objekata velike dubine, u kojima bi se mogla izvršiti video-endoskopija, dok u slučaju postojanja većeg broja dubokih bušotina, video-endoskopija predstavlja idealan metodološki postupak za definisanje intenziteta, dubine i baze karstifikacije (primer istraživanja na HE Višegrad i Grančarevo), što nije bio slučaj Kučajsko-beljaničkog masiva.

Na osnovu svega iznetog, može se zaključiti da se izotopske metode istraživanja ističu kao odličan metod istraživanja za potrebe definisanja geneze i uslova cirkulacije voda kompleksnih karstnih sistema. Za njima slede, po stepenu pouzdanosti, hidrogeohemijske metode istraživanja, nakon kojih sledi značaj meteoroloških, hidroloških i statističkih metoda istraživanja. Najmanji doprinos u analizi geneze i uslova cirkulacije voda pružile su video-endoskopske analize, kao i reinterpretacija postojećih karotažnih merenja, što je posledica nedovoljnog broja bušotina veće dubine na istražnom prostoru. Analiza rastvaranja karbonatnih pločica je dala određene rezultate, ali nedovoljne za precizno definisanje stepena rastvaranja karbonata u različitim uslovima, stoga je imala najmanji značaj za potrebe izrade disertacije.

8.9. Predlog daljih istraživanja

Istraživanja sprovedena u okviru disertacije rezultirala su velikim brojem podataka koji su služili za definisanje geneze i uslova cirkulacije podzemnih voda. Ipak, kako se starosti voda ne mogu smatrati apsolutnim, obzirom na dinamiku funkcionisanja karstnih sistema, istraživanja je neophodno nastaviti, u cilju upotpunjavanja informacija i tačnijeg definisanja karakteristika jednog masiva.

Sprovođenje kvalitativnog i kvantitativnog monitoringa potrebno je nastaviti, pri čemu je, već postavljenim osmatračkim mrežama Beljaničkog masiva, neophodno dodati istraživanje većih karstnih vrela Kučajskog masiva, koja nisu kaptirana za potrebe vodosnabdevanja. Kvantitativni monitoring je potrebno sprovesti na dnevnom nivou (očitanje sa letve), dok je u pogledu kvalitativnog monitoringa od velikog značaja na kvartalnom nivou izvršiti analizu fizičko-hemijskih i jonskih karakteristika voda.

Kako su izotopske metode dale odgovore na pitanja starosti, odnosno vremena boravka podzemne vode u podzemlju, u periodu minimuma, utvrđivanje starosti voda radioaktivnim izotopima neophodno je sprovesti i u drugim hidrološkim periodima (maksimum, srednje vode), kako bi se dobila preciznija slika o vodama koje se mešaju u podzemlju. Pored već primenjenih izotopskih radioaktivnih metoda, na istražnom prostoru bi trebalo sprovesti metode datiranja voda ^{39}Ar , čime bi se potvrdila, i poređenjem sa prethodnim rezultatima ^{14}C bolje definisala starost starih voda, i ^{85}Kr , koji bi zajedno sa rezultatima ^3H i $^3\text{H}/^3\text{He}$, dao precizniju starost mladih voda.

Uzorkovanje kišnice i snega za utvrđivanje sadržaja stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H u padavinama, potrebno je uzorkovati duži vremenski period, sa ciljem da se „učvrsti“ LIML i kao takva posluži za formiranje regionalne lokalne izotopske meteorske linije. U cilju definisanja srednjeg vremena zadržavanja podzemnih voda u podzemlju, potrebno je uzorkovati izvorsku vodu na mesečnom nivou minimum godinu dana (optimalno tri godine), na vrelima perspektivnim sa aspekta vodosnabdevanja stanovništva na regionalnom nivou. Poznavanje srednjeg vremena zadržavanja hladnih voda u podzemlju od velike je važnosti za pravilno korišćenje i upravljanje podzemnim vodnim resursom, a takođe i za potrebe definisanja uslova zaštite podzemnih voda.

Radi definisanja stepena rastvorljivosti karbonatnih tvorevina, neophodno je nastaviti eksperiment sa ispitivanjem rastvaranja karbonatnih pločica u hladnim i toplim vodama, u zemlji i na površini terena, kao i u pećini (voda i vazduh). Pločice je potrebno držati na terenu minimum 10 godina, a provere težina vršiti na godišnjem nivou. Ovakav istraživački poduhvat doprineo bi naučnim saznanjima o stepenu rastvorljivosti karbonata.

Na istražnom prostoru je, za potrebe određivanja lokacija za izradu istražnih bušotina sa ciljem zahvatanja termalnih voda, neophodno sprovesti detaljna geofizička ispitivanja. Izrada istražnih bušotina na odabranim lokacijama do dubina od preko 500 metara, dale bi značajne informacije o stepenu karstifikacije i postojanju voda znatno viših temperatura. Video-endoskopijom bušotina utvrdile bi se dimenzije i pravci pružanja kaverni i kanala na velikim dubinama, što bi doprinelo definisanju baze karstifikacije i stepenu ispucalosti stene na velikim dubinama. Takođe, izrada istražnih bušotina omogućila bi uzorkovanje vode iz bušotina na različitim dubinama, odnosno iz različitih vodonosnih slojeva, radi utvrđivanja sadržaja izotopa, jona i sadržaja mikroelemenata u vodi na različitim dubinama u različitim hidrološkim periodima. Rezultati ovih istraživanja umnogome bi doprineli saznanju o postojanju grejnog tela i njegovom uticaju na temperaturni režim podzemnih voda.

Ovakvim sveobuhvatnim i dugotrajnim istraživanjem jednog masiva, mogu se dobiti značajni rezultati, kako sa naučne strane, tako i sa praktične i ekonomske strane.

9. ZAKLJUČAK

Predmet doktorske disertacije bio je utvrđivanje uslova formiranja i definisanje tipova i dubine cirkulacije podzemnih voda kompleksnih karstnih sistema Kučajsko-beljaničkog masiva. Poznavanje veze podzemnih voda sa površinskim vodama, vremena boravka vode u podzemlju i dubine zaleganja karstnih kanala, kao i hidrohemijskih karakteristika voda, od velike je važnosti za racionalno i održivo upravljanje podzemnim vodnim resursom.

Cilj rada je bio da se kroz multidisciplinarni pristup istraživanja, definišu veze površinskih i podzemnih voda, starost voda i dubine zaleganja karstnih provodnika tople i hladne vode, daju prognoze pružanja glavnih kanala, proceni dubina baze karstifikacije, utvrdi promena jonskog sastava vode tokom boravka u podzemlju i poreklo povišenih temperatura voda.

Istraživanja su sprovedena na odabranim lokacijama raspoređenim po celoj površini Kučajsko-beljaničkog masiva, a poseban akcenat stavljen je na lokacije severnog, severozapadnog, zapadnoj i južnog oboda masiva, gde su konstatovane pojave subtermalnih i termalnih voda.

U okviru masiva površine 1076 km², izvršeno je izdvajanje kompleksnih karstnih sistema na osnovu dva kriterijuma, prvi kriterijum predstavljala je geologija terena, koja uslovljava tip i dubinu cirkulacije podzemnih voda, dok je drugi kriterijum bio vezan za izdvajanje sistema na osnovu temperature i hidrohemijskih karakteristika voda.

U okviru masiva izdvojeno je 15 kompleksnih sistema sa 33 pojave: 8 sistema sa tipičnom gravitacionom cirkulacijom podzemnih voda, 3 sistema sa ascendentnim tipom cirkulacije i 4 kombinovana sistema: ascendentno-gravitacioni i gravitaciono-ascendentni.

U cilju rešavanja predmetne problematike, primenjen je multidisciplinarni pristup istraživanja, sa više metodoloških postupaka u okviru negeoloških, geoloških, izotopskih, hidrohemijskih i geohemijskih metoda istraživanja, svrstanih kroz tri grupe istraživanja: terenska, laboratorijska i kabinetska.

Veliki broj rezultata izotopskih analiza stabilnih izotopa ¹⁸O i ²H u padavinama rezultirao je formiranjem LIML, a koja je bila od velikog značaja u interpretaciji podataka stabilnih

izotopa ^{18}O i ^2H u izvorskim vodama. Ovim istraživanjima je potvrđena jaka veza atmosferskih padavina i ponorskih voda sa vodama sistema sa brzom cirkulacijom voda. Takođe, konstatovano je da i subtermalne i termalne vode imaju značajnog priliva voda, a što je od velikog značaja kada je u pitanju njihova obnovljivost u vremenu i prostoru.

Rezultati radioaktivnih izotopa dali su odgovor na pitanje starosti podzemnih voda i vremena koje one provedu u podzemlju. Naime, vode Kučajsko-beljaničkog masiva imaju starost voda koja se kreće od svega nekoliko dana, pa do nekoliko meseci u sistemima sa brzom, gravitacionom cirkulacijom, dok hladne vode, koje zaležu nešto dublje u podzemlje imaju starost od 4 do 26 godina. Najstarije vode cirkulišu dubokim karstnim kanalima (i preko 800 m) i imaju starost od oko 6.000 godina. Ono što je posebno značajno i interesantno, je da vode najviše temperature od $36\text{ }^{\circ}\text{C}$, zapravo ne predstavljaju i najstarije vode, što ukazuje na prisustvo grejnog tela u okviru karstnog masiva.

Sadržaj plemenitih gasova u vodi, pomogao je u rekonstrukciji temperaturnog režimima vazduha koji su vladali u periodu infiltracije vode u podzemlje, a na osnovu kojih je zaključeno da se najveće količine podzemnih voda formiraju u prolećnom periodu, što je direktna posledica topljenja snežnog pokrivača po celoj karstnoj površi, kao i jakih prolećnih padavina. U ovom periodu, usled velikih količina voda i jakih pritisaka na kanale u podzemlju, voda se infiltrira i u dublje pukotine i kanale, čime prihranjuje podzemne vode, koje znatno dublje zaležu u podzemlje.

Fizičko-hemijske karakteristike i jonski sastav podzemnih voda, ukazao je na izraženu interakciju voda-stena i porast ukupnih rastvorenih materija u vodi sa dubinom. Vode brze cirkulacije odražavaju sezonski karakter i menjaju svoje karakteristike u zavisnosti od količina voda koje prihranjuju izdan i koje se dreniraju iz podzemnog sistema, dok hladne vode dublje cirkulacije odražavaju dosta postojan režim podzemnih voda. Specifičan sadržaj mikroelemenata u podzemnim vodama definitivno potvrđuje vezu voda severozapadnog i zapadnog oboda sa stenama mladog vulkanizma (dacitima i dacito-andezitima), ali se i dalje ne može sa sigurnošću tvrditi da je povišena temperatura isključivo posledica kontakta vode sa grejnim telom. Velika starost vode i dubina cirkulacije svakako ima učešća u formiranju temperaturnog režima voda.

Multivarijantna statistička analiza voda potvrdila je izbor kriterijuma i odabira sistema, obzirom da je klasterka analiza grupisala pojave, kako lokacijski, tako i po sličnosti sa svojim hidrohemijским parametrima. Sve vode ukazuju na međusobnu korelaciju na osnovu sadržaja kalcijuma, ukupno rastvorenih materija i bikarbonata u vodi, što je i potvrda formiranja voda u okviru karstne izdani, sa izuzetkom Milanovačke banjice, koju i klasterka analiza svrstava u posebni sistem. U vodama se uočava i jaka zavisnost temperature i magnezijuma, što ukazuje na oslobađanje ovog jona u uslovima povišene temperature.

Naučni doprinos disertacije svodi se na kompleksna istraživanja primenjena na velikom broju hidrogeoloških pojava i objekata, koja su svakako doprinela boljem, i na drugačiji način, sagledavanju funkcionisanja karstnog masiva. Jedan od pokušaja ove doktorske disertacije svakako predstavlja unapređenje opšteg nivoa znanja o funkcionisanju karstne izdani, geneze voda u karstu i mogućnosti formiranja veoma dubokih voda, velike starosti.

Na kraju, može se zaključiti da bi disertacija, trebalo da ima i praktični značaj, koji se ogleda u proceni dubine zaleganja karstnih kanala toplih voda, što predstavlja nadogradnju prethodnih istraživanja na istražnom prostoru, na osnovu čega se može izvršiti projektovanje istražnih bušotina za zahvatanje toplih voda. Zahvatanje većih količina toplih voda doprinelo bi turističkom razvoju sredine i razvoju poljoprivrede kroz grejanje plastenika i staklenika, a takođe bi se mogle koristiti i za toplifikaciju objekata.

Autor:

U Beogradu,
28.03.2017.

Ljiljana Vasić, dipl. inž. geologije

LITERATURA:

1. Aeschbach-Hertig W., Peeters F., Beyerle U., and Kipfer R. (1999) Interpretation of dissolved atmospheric noble gases in natural waters, *Water resources research*, Vol. 35, No. 9, pp 2779–2792
2. Antonijević I., Veselinović M., Đorđević M., Kalenić M., Krstić B. i Karajičić Lj. (1970) Osnovna geološka karta 1:100 000, Tumač za list Žagubica L 34-140, Fond Saveznog geološkog zavoda, Beograd
3. Bakalowicz M., Blavoux B., and Mangin A. (1974) Apports du tracage isotopique naturel a la connaissance du fonctionnement d'un systeme karstique. Teneurs en oxygene 18 de trois systemes des Pyrenees, France: *Journal of Hydrology*, v. 23, 141-158.
4. Bleakney W. i Hipple, J. A. (1935) A study of oxygen isotopes. *J. Phys.* 47, 800.
5. Burgman J.O, Calles B and Westman F., 1987: Conclusions from a ten year study of oxygen-18 in precipitation and runoff in Sweden, In: *Isotope Techniques in Water Resources Development*, IAEA Symposium 299, Vienna, 579-590
6. Cheng H., Edwards L., Shen CC., Polyak V., Asmeromd Y., Woodhead J., Hellstrom J., Wang Y., Kong X., Spötl C., Wang X., Alexander C. Jr. (2013) Improvements in ^{230}Th dating, ^{230}Th and ^{234}U half-life values, and U–Th isotopic measurements by multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry, *Earth and Planetary Science Letters* No 371–372(2013), pp 82–91
7. Clark I., Fritz P., (1999) *Environmental isotopes in hydrogeology*, 2nd edition, Taylor & Francis Group
8. Cloutier V., Lefebvre R., Therrien R. and Savard M. M. (2008) “Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system.” *Journal of Hydrology* 353, pp. 294-313
9. Craig H. (1961a) Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen -18 in natural water, *Science*, 133(3465): pp. 1833–1834
10. Craig H. (1961b) Isotopic variations in meteoric waters, *Science* 133 (3465): pp. 1702–1703
11. Cattell R. B. (1966) “The scree test for the number of factors.” *Multivariate Behavioral Research* 1, pp. 245-276

12. Cvijić J. (1893) Das karstphanomen: Geographische Abhandlungen herausgegeben von A. Penck, v. 5, pt 3, p. 218-329
13. Cvijić J. (1895) Pećine i podzemna hidrografija u istočnoj Srbiji, glas SKA XLVI, Beograd
14. Cvijić J. (1896) Izvori, tresave i vodopadi u istočnoj Srbiji, Glas SKA, LI 18, Beograd
15. Cvijić J. (1918) Podzemna hidrologija i morfološka evolucija karsta, Posebno izdanje Srpskog geografskog društva, Sveska 35, Beograd 1957 (original 1918. godine)
16. Davraz A., Varol S. (2012) Microbiological risk assessment and sanitary inspection survey of Tefenni (Burdur/Turkey) region Envi. Earth Sci. doi: 10.1007/s12665-011-1332-1
17. Dimitrijević N. (1988) Hidrohemija, Univerzitetski udžbenik, RGF, Univerzitet u Beogradu
18. Dimkić M., Stevanović Z. i Đurić D. (2007) Utilization, Protection and Status of Groundwater in Serbia, Proceedings Groundwater management in the Danube river basin and other large river basins, Regional IWA Conference, Belgrade, 7-9 jun, p.83-103
19. Dragišić V. i Polomčić D. (2009) Hidrogeološki rečnik, RGF, Univerzitet u Beogradu, Beograd
20. Drever J.I., 1997. The Geochemistry of Natural Waters. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, 436pp.
21. Dragišić V, (1989) Hidrogeološke karakteristike šire okoline Bora, Mladi istraživači Srbije i Društvo istraživača „Edvard Kardelj“ Bor
22. Dragišić V. i Živanović V. (2014) Opšta hidrogeologija, Univerzitetski udžbenik, RGF, Univerzitet u Beogradu, Beograd
23. Dukić D. (1975) Hidrografske osobine Istočne Srbije, Geografski Institut „J. Cvijić“, knjiga 26, Beograd
24. Field A. (2005) Discovering statistics using SPSS. London: SAGE Publications Ltd.

25. Filipović B., Matić I., Milenković A. (1976) Rezultati „obeležavanja“ izdanskih tokova u oblasti Bogovinske pećine, Geološki anali Balkanskog poluostrva, XL, 333-343, Beograd
26. Filipović B. (1979) Studija – hidrogeoloških isstraživanja termalnih voda u selu Krivi Vir S.O. Boljevac I i II faza, RGF Beograd.
27. Filipović B., Dimitrijević N, Stevanović Z. (1982) Prilog poznavanju termalnih voda kod Krupajskog vrela, Zbornik radova 7 Jug. Simp. o hidrogeologiji i inž. Geologiji, Knjiga 1, Novi Sad
28. Filipović B. i Stevanović Z. (1984) Izveštaj o hidrogeološkim istraživanjima termalnih voda u zoni Krupajskog vrela (SO Žagubica) u 1983 god., Fond Rudarsko-geološkog fakulteta u Beogradu.
29. Filipović B. (1988) Izveštaj o rezultatima istraživanja termalnih voda u selu Krivi Vir, SO Boljevac (druga faza u 1987.), RGF Beograd.
30. Fleming G. (1975) Computer simulation techniques in hydrology Elsevier, Scientific Publishing Co., Amsterdam p.352
31. Ford D., Williams P. (1989) Karst geomorphology and hydrology, ISBN 0 412 44590 5, Caphman & Hall, London, UK
32. Fritz P., Fontes J. (1980) Handbook of environmental isotope geochemistry, Amsterdam-Oxford-New York
33. Giauque F.W., Johnston H.L. (1929a) An isotope of oxygen, mass 18. Interpretation of the atmospheric absorption bands. J. Am. Chem. Soc. 51, 1436–1445.
34. Giauque F.W., Johnston H.L. (1929b) Isotope of oxygen of mass 17, in Earth's atmosphere. J. Am. Chem. Soc. 51, 3528–3537
35. Güler C., Thyne G. D., McCray J. E. and Turner A. K. (2002) Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. Hydrogeology Journal 10, pp. 455-474
36. Đurović P. (1998) Speleološki atlas Srbije, Srpska akademija nauka i umetnosti, Geografski institut "Jovan Cvijić", Zavod za zaštitu prirode Srbije, Geografski fakultet i Biološki fakultet Univerziteta u Beogradu, posebna izdanja knjiga 52

37. Goldscheider N. (2015) Overview of methods applied in karst hydrogeology, Monograph: Karst aquifers – characterization and engineering, ed. Stevanović Z., Springer, pp.127-145
38. Gross A. (1922) An unknown radioactivity, J. Am. Chem. Soc. 56
39. Grund A. (1903) Die Karsthydrographie – Studien aus Westbosnien: Geographische Abhandlungen herausgegeben von A. Penck, v. 7. p. 103-200
40. Jaffey A.H., Flynn K.F., Glendenin L.E., Bentley W.C. and Essling A.M. (1971) Precision measurements of half-lives and specific activities of ²³⁵U and ²³⁸U, Physical Reviews, C 4: 1.889-1.906
41. Jemcov I. (2008) Bilans karstnih izdanskih voda i optimizacija rešenja njihovog zahvata na primerima iz Srbije, Doktorska disertacija, Rudarsko-Geološki fakultet, Beograd
42. Jović V., Jovanović L. (2004) Geohemijske osnove ekološkog menadžmenta, monografija, Društvo za širenje i primenu nauke i prakse u zaštiti životne sredine Srbije i Crne Gore, „Ecologica“, Beograd
43. Kaiser H. F. (1960) “The Application of electronic computers to factor analysis.” Educational and Psychological Measurement 20, pp. 141-151.
44. Kelly WR, Panno SV, Hackley KC (2009) Bacteria contamination of groundwater in a mixed land-use karst region water quality, Exposure and Health doi: 10.1007/s12403-009-0006-7
45. Kendall C., Sklash M. G., Bullen T. D. (1995) Isotope tracers of water and solute sources in catchments. In: Solute Modelling in Catchment Systems, J. Wiley & Sons, New York, pp. 261- 303.
46. Klimchouk A. (2000) The formation of epikarst and its role in vadoze speleogenesis. In. Klimchouk A., Ford C.D., Palmer A.N, Dreybrodt W., (eds). 385 Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers. National Speleological Society Inc. Huntsville. pp. 91-99
47. Kipfer R.W., Aeschbach-Hertig W., Peeters F., Stute M. (2002) Noble gases in lakes and groundwaters. In: Porcelly, D., Ballentine, D., Wieler, R. (Eds.), Noble Gases in Geochemistry and Cosmochemistry. Rev. Mineral. Geochem. 47, 615–700

48. Komatina M. (1984) Hidrogeološka istraživanja – metode istraživanja I, SOUR „Geozavod“, Beograd
49. Krunić O. (2012) Mineralne vode, Univerzitetski udžbenik, RGF, Univerzitet u Beogradu, Beograd
50. Langmuir D. 1984: Physical and chemical characteristics of carbonate water. In: LaMoreaux PE, Wilson BM, Memon BA (eds) Guide to the hydrology of carbonate rocks. IHP studies and reports in hydrology, vol 41. UNESCO. Paris, pp 264–265
51. Lehmann O. (1932) Die Hydrographie des Karstes: Enzyklopadie der Erdkunde, Leipzig and Vienna, Frantz Deuticke, pp. 212
52. Leis A. (2007) ppt: Isotopes und Tracers in Aquatic Systems - Part 1, Stable Isotopes in the Hydrological Cycle, Joanneum Research, Graz, Austria
53. Leko, T. M., Ščerbakov, A. i Joksimović E., (1926) Lekovite vode i klimatska mesta u Kraljevini SHS, Izdavač Ministarstvo narodnog zdravlja, Beograd
54. Letolle R., Olive Ph. (2004) A short hystory of isotopes in hydrology, Proceedings of the UNESCO/IAEA symposium in Rome, IAHS publ. 286
55. Libby P. (1952) Radiocarbon dating, Univ. Chicago Press, Chicago, USA
56. Lvovič M. I. (1974) Mirovie vodnie resursi i ih buduščje. Misl. Moskva, pp. 411
57. Majkić-Dursun B., (2011) Projekat izrade doktorske disertacije, fondovska dokumentacija, DHG-RGF, Beograd
58. Margat J., V. Der Gun, (2013) Groundwater around the world, A Geographic synopsis, ISBN 978-0-203-77214, CRC Tailor & Francis Group, London
59. Martinović M. (2009) Elaborat o rezervama podzemnih voda izvorišta „RM Stubica“ u Sisevcu, fondovski materijal, RGF, Beograd
60. Mazar E. (1991) Applied chemical and isotopic groundwater hydrology, British library Cataloguing in publication data
61. Mazar E. (2004) Chemical and isotopic groundwater hydrology, 3rd edition, New York
62. Milanović P. (1979) Hidrogeologija karsta i metode istraživanja, monografija, HE Trebišnjica, Trebinje
63. Milanović P. (1999) Geološko inženjerstvo u karstu, monografija, Energoprojekt, Beograd

64. Milanović S. (2004) Speleoronjenje, značajan metod istraživanja i zaštite podzemnih voda u karstu, *Vodoprivreda*, 36 211-212, str. 427-439
65. Milanović S. (2010) Formiranje fizičkog modela karstne izdani na primeru Beljanice (istočna Srbija), Doktorska disertacija, Departman za hidrogeologiju, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
66. Milanović S., Stevanović Z., Vasić Lj., (2010) Monitoring podzemnih voda Beljaničkog masiva u funkciji formiranja modela karstnog sistema, *Vodoprivreda* 0350-0519, 42 (2010) 246-248 p. 199-212
67. Milanović S., Vasić Lj. (2011) Hidrogeološka osnova zaštite podzemnih voda u karstu na primeru Beljanice, *Vodoprivreda* 0350-0519, 43 (2011), p.252-254
68. Milanović S., Vasić Lj., Stevanović Z., Ristić Vakanjac V. (2013) 3D Modeling and monitoring of karst system as a base for its evaluation and utilization – A case study from eastern Serbia, *Environmental Earth Science – Springer*, DOI 10.1007/512665-013-2591-9, pp. 525-532
69. Milanović S. (2014) Studija hidrogeoloških i specijalnih istraživanja za potrebe održivog korišćenja podzemnih voda u selima opštine Žagubica, sa autonomnim vodovodnim sistemima, Fondovski materijal, RGF, Beograd
70. Milenić D, Vasiljević P. i Vranješ A. (2010) Criteria for use of groundwater as renewable energy source in geothermal heat pump systems for building heating/cooling purposes, *Energy and Buildings*, Volume 42. Issue 5, pp. 649–657
71. Milenić D., Vranješ A., (2015) Istraživanje i valorizacija subgeotermalnih energetske resursa, monografija, RGF, Univerzitet u Beogradu, Beograd
72. Miljanić Š. (2008) Udžbenik nuklearne hemije, Univerzitetski udžbenik, Fakultet za fizičku hemiju, Univerzitet u Beogradu, Beograd
73. Mišić R. (2015) Dopuna speleoloških istraživanja Lazareve pećine – kanal školjki i veza sa vrelom, *Zbornik apstrakata i vodič stručne ekskurzije*, 8. Simpozijum o zaštiti karsta, ASAK, Pirot, pp. 19
74. Mook W. G. (2000) Environmental isotopes in the hydrological cycle, *Principles and applications*, Volume I, Introduction – Theory methods Review, Unesco/IAEA

75. Mook W. G. (2001) Environmental isotopes in the hydrological cycle, Principles and applications, Volume II, Introduction – Atmospheric water, Unesco/IAEA
76. Mook W. G. (2006) Introduction to isotope hydrology-stable and radioactive isotopes of hydrogen, oxygen and carbon, Taylor & Francis Group
77. Ovčnikov A.M. (1974) Mineralne vode, Gosgeoltehzdat, Moskva
78. Petrović D. (1954) Sliv Zlotkse reke, Geografski institut, SAN, knjiga 7, Beograd
79. Petrović D. (1970) Sliv Crnog Timoka, Posebno izdanje, Geografskog instituta „J. Cvijić“, knjiga 22, Beograd
80. Petrović J. (1974) Krš istočne Srbije, pos. Izdanje, SGFD, knjiga 40, Beograd
81. Petrović J. (1976) Jame i pećine Sr Srbije, Vojnoizdavački zavod, Beograd
82. Pinneker E. V. (1984) Underground hydrosphere, Nauka, Novosibirsk (in Russian) pp. 157
83. Pinneker E. V. (1985) Strategy for the management of groundwater quality, Hydrogeology in the service of man, Groundwater quality management, 3(154), IAHS publ (1-6), Cambridge
84. Polomčić D., Stevanović Z., Bajić D. i drugi, (2012) Vodosnabdevanje i održivo upravljanje podzemnim vodnim resursima u Srbiji, Vodoprivreda 2012, 0350-0519, 44, br. 4-6, str. 225-231
85. Ristić V. (2007) Razvoj simulacionog modela za proračun dnevnih isticanja iz karstnih vrela, Doktorska disertacija, Departman za hidrogeologiju, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
86. Rižikov D. V. (1954) Priroda karsta i osnovnije zakonomernosti ego razvitija, Moskva
87. Schlosser, P., Stute, M., Doërr H., Sonntag C., Muënich, K.O. (1988) Tritium/³He dating of shallow groundwater, Earth and Planetary Sci. Lett. 89,353–362
88. Sinreich M., Pronk M., Kozel R. (2014) Microbiological monitoring and classification of karst springs Envi. Earth Sci. doi: 10.1007/s12665-013-2508-7
89. Stevanović Z. (1981) Hidrogeološke karakteristike karsta Kučajsko-beljaničkog masiva sa aspekta mogućnosti korišćenja izdanskih voda za vodosnabdevanje, Magistarski rad, Departman za hidrogeologiju, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

90. Stevanović Z. (1986) Hidrogeološke karakteristike karstne izdani Kučajsko-beljaničkog masiva, Zbornik radova Odbora za kras i speleologiju, II SANU knjiga, DLXVIII, Beograd
91. Stevanović Z. (1991) Hidrogeologija karsta Karpato-balkanida istočne Srbije i mogućnosti vodosnabdevanja, monografija, DHG-RGF, Beograd
92. Stevanović Z., Papić P. (2008) The origin of groundwater. In: Dimkić M, Brauch HJ, Kavanaugh M. (eds) Groundwater management in large river basins. IWA Publishing, London, pp. 218–246
93. Stevanović Z. (2009) Utilization and regulation of springs, In: Groundwater hydrology of springs: Engineering, theory, management and sustainability (Kresic N. & Stevanovic Z. eds.), Elsevier Inc., BH, Burlington – Oxford, pp. 339-388
94. Stevanović Z. (2010) Regulacija karstne izdani u okviru regionalnog vodoprivrednog sistema „Bogovina“, Posebno izdanje Departmana za hidrogeologiju, RGF, Beograd
95. Stevanović Z et al. (2010b) Optimizacija energetskog iskorišćavanja subgeotermalnih vodnih resursa (18008), Projekat tehnološkog razvoja Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja, Beograd
96. Stevanović Z., (2011) Menadžment podzemnih vodnih resursa, Univerzitetski udžbenik, RGF, Univerzitet u Beogradu, Beograd
97. Stevanović Z., Ristić Vakanjac V., Milanović S., Vasić Lj. i Petrović B., (2011) Značaj monitoringa podzemnih voda u karstu Srbije, Zbornik radova sa 7. Simpozijuma o zaštiti karsta, Bela Palanka, pp. 35-42
98. Stevanović Z., Ristić-Vakanjac V. i Milanović S. (2012a) CCWaterS Climate changes and impact on water supply, monografija, RGF-DHG, Univerzitet u Beogradu
99. Stevanović Z, Dimkić M, Mandić M, Milanović S, Đurić D, Tibor D i dr. (2012b) Monitoring podzemnih vodnih resursa Srbije, strateški projekat, RGF, IJČ i GIS, Beograd
100. Stevanović Z., (2015) Characterization of karst aquifer, Monograph: Karst aquifers – characterization and engineering, ed. Stevanović Z., Springer, pp. 47-125

101. Stevanović Z., Milanović S., Benderev A. (2015) O specifičnom mehanizmu isticanja nekih karstnih vrela u Karpato-balkanidima/ Specific Discharge Mechanism of Some Karstic Springs in Carpathian – Balkanides, Zbornik Odbora za kras i speleologiju, SANU, Odeljenje za mat.fiz. i geonauke, Beograd, pp. 163-186
102. Stichler W, (1980) Modell zur Berechnung der Verweilzeit des infiltrierten Niederschlags, GSF Bericht R 240, Munich
103. Stojković J. (2013) Hidrogeohemijska valorizacija esencijalnih mikroelemenata mineralnih voda Srbije, Doktorska disertacija, Departman za hidrogeologiju, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
104. Stute M., Schlosser P. (1993) Principles and applications of the noble gas paleothermometer. In: Swart, P.K., Lohmann, K.C., McKenzie, J., Savin, S. (Eds.), *Climate Change in Continental Isotopic Records*, Geophysical Monograph Series, vol. 78, pp. 89–100.
105. Tolstikhin I. N. i Kamensky I. L. (1969) Determination of groundwater age by the T-3He method, *Geochem. Int.*, 6, 810-811.
106. Tóth J. (1963) A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. – *Journal of Geophysical Research*, 68/10, pp. 4795–4812.
107. Tóth J. (2015) Geothermal phenomena in the context of gravity-driven basinal flow of groundwater, *Central European Geology*, DOI: 10.1556/24.58.2015.1–2.1; Vol. 58/1–2, pp. 1–27
108. Trček B., Zojer H. (2010) Recharge of springs, *Groundwater hydrology of springs* (eds. N.Kresic & Z.Stevanovic), Elsevier, Blumington & Oxford, pp. 87-127
109. Urey H., Brickwedde, F. G., Murphy, G. M. (1932) An isotope of hydrogen of mass 2 and its concentration. *Phys. Rev.* 39, 864, and 40, 1.
110. Vasić Lj., (2015) Primena izotopskih metoda u hidrogeologiji, seminarski rad, fondovska dokumentacija, DHG-RGF, Beograd
111. Vasić Lj, (2016) Primena izotopskih metoda u hidrogeologiji sa aspekta zaštite podzemnih voda u karstu, seminarski rad, fondovska dokumentacija, DHG-RGF, Beograd

112. Veselinović M., Antonljević I., Milošaković R., Mičić I., Krstić B., Čičulić M., Divljan M. i Maslarević Lj. (1970) Osnovna geološka karta 1:100 000, Tumač za list Boljevac K 34-8, Fond Saveznog geološkog zavoda, Beograd
113. Vranješ A, (2012) Hidrogeotermalni resursi teritorije grada Beograda, Doktorska disertacija, Departman za hidrogeologiju, RGF, Univerzitet u Beogradu, Beograd
114. Younger P. (2007) Groundwater in the environment: an introduction. Blackwell Publishing, Malden, MA
115. Yurtsever Y. i Araguas Araguas L. (1993) Environmental isotope applications in hydrology: an overview of the iaea's activities, experiences, and prospects, In: Peters NE, Hoehn E, Leibundgut C, Tase N, Walling De (eds), Tracers in hydrology, International Association of Hydrological Science (IAHS) publication 215, IAHS Press, Wallingford, pp. 3-20
116. Varsányi I., Palcsu L., Kovács L. (2011) Groundwater flow system as an archive of palaeotemperature: Noble gas, radiocarbon, stable isotope and geochemical study in the Pannonian Basin, Hungary, Applied Geochemistry, Journal of the International Assosiation of Geochemistry, Elsevier 26 (2011) pp. 91–104
117. Živojinović D. (2013) Razvoj i primena hemometrijskih metoda za klasifikaciju i procenu kvaliteta vode, Doktorska disertacija, Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd
118. Žujović J. (1931) Snabdevanje sela vodom. Izvori i bunari. Srpska kraljevska akademija. Poučna biblioteka 5, Beograd, 1-119

BIOGRAFIJA AUTORA

Ljiljana M. Vasić, rođena je 2. septembra 1981. godine u Beogradu. Srednju mašinsko-tehničku školu „Petar Drapšin“ završila je u Beogradu 2000 godine. Diplomirala je na Rudarsko-Geološkom fakultetu u Beogradu, na Departmanu za hidrogeologiju, u julu 2007. godine, sa prosečnom ocenom 8.46. Oktobra 2008. godine upisala je doktorske studije na Rudarsko-geološkom fakultetu u Beogradu, naučna oblast Hidrogeologija, i kao užu specijalnost opredelila se za izučavanje hidrogeologije karsta.

Učestvovala je na domaćim i međunarodnim naučnim skupovima, na kojima je objavila radove i apstrakte iz oblasti geologije i hidrogeologije. Koautor je na dva rada u svetski vodećim časopisima sa SCI liste, kao i autor i koautor četiri poglavlja objavljena u istaknutim monografijama međunarodnog značaja.

Stručno i naučno usavršavanje sprovodila je u okviru kurseva: 1. *Geochemija; Izotopska hidrogeologija; Daljinska detekcija*, Grac, Austrija (2009); 2. *Vodosnabdevanje kao deo ciklusa vode; Antropogeni uticaj na vodosnabdevanje; Analiza rizika i upravljanja vodosnabdevanjem*, Solun, Grčka (2011); 3. *Problems and Solutions in Numeric Modeling of Karst Aquifers*, Trebinje, Bosna i Hercegovina (2013); *Karstni ekosistem i geomikrobiologija*, Guilin, Kina (2014).

Svoje istraživačke aktivnosti dokotrand ostvaruje kao član Centra za hidrogeologiju karsta (CKH). Pored toga, član je Srpskog geološkog društva (SGD) i Internacionalne asocijacije hidrogeologa (IAH).

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора _____ Љиљана М. Васић _____

Број индекса _____ Г806/08 _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

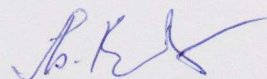
Генеза и услови циркулације вода комплексних карстних система

_____ Кучајско-бељаничког масива _____

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 28.03.2017. године



Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора _____ Љиљана М. Васић _____

Број индекса _____ Г806/08 _____

Студијски програм _____ Хидрогеологија _____

Наслов рада _____ Генеза и услови циркулације вода комплексних карстних система
_____ Кучајско-бељаничког масива _____

Ментор _____ Проф. др Зоран Стевановић _____

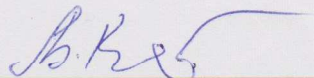
Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 28.03.2017. године



Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Генеза и услови циркулације вода комплексних карстних система

Кучајско-бељаничког масива

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

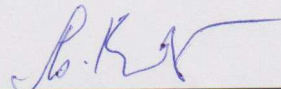
Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 28.03.2017. године



1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.