

UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Branislav Z. Petrović

Funkcionisanje i uticaj epikarsta na režim, bilans i
kvalitet podzemnih voda istočnog dela karstnog
sistema Suve planine

doktorska disertacija

Beograd, 2020.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Branislav Z. Petrović

The Functioning and Impact of Epikarst on the
Regime, Balance and Groundwater Quality of the
Eastern Part of the Suva Planina Mountain Karst
System

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2020

- Mentori:

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

Dr Saša Milanović, docent, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet
uža naučna oblast: Hidrogeologija

- Članovi komisije:

Dr Vladimir Živanović, docent, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet
uža naučna oblast: Hidrogeologija

Dr Milan Radulović, vanredni profesor, Univerzitet u Crnoj Gori, Građevinski fakultet
uža naučna oblast: Hidrogeologija

- Datum odbrane: _____.2020. godine

Ovaj rad posvećujem ocu Zoranu i seni majke Zorke

ZAHVALNOST

Doktorska disertacija „Funkcionisanje i uticaj epikarsta na režim, bilans i kvalitet podzemnih voda istočnog dela karstnog sistema Suve planine“ urađena je pod mentorstvom dr Zorana Stevanovića, redovnog profesora, i docenta dr Saše Milanovića, sa Rudarsko-geološkog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, kojima se zahvaljujem na stručnoj pomoći, savetima i sugestijama tokom rada na izradi disertacije. Takođe, sam zahvalan članovima komisije na savetima i podršci u radu.

Zahvalan sam dr Ljiljani Vasić, naučnom saradniku, na velikoj pomoći pri terenskim, laboratorijskim i kabinetskim radovima, kao i na savetima i usmeravanjima u radu na disertaciji. Zahvalnost dugujem docentu dr Vladimiru Živanoviću i dr Igoru Jemcovu, redovnom profesoru, na konstruktivnim kritikama i savetima tokom mog naučnog sazrevanja na polju hidrogeologije karsta. Posebnu zahvalnost dugujem Veljku Marinoviću, master inženjeru geologije na pomoći prilikom terenskih istraživanja i analizi rezultata.

Nemerljivu pomoć i podršku prilikom izrade doktorske disertacije pružila mi je docent dr Snežana Ignjatović. Posebno sam joj zahvalan na neiscrpnom optimizmu, pažnji i spremnosti da mi izađe u susret. Zahvalio bih Jasmini Todorović na pruženoj pomoći pri uređivanju teksta.

Zahvalio bih se i Živojinu Smiljkoviću, dipl. hem. i dr Kseniji Stojanović, redovnom profesoru, sa Hemijskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, na izradi hemijskih analiza zemljišta i vode. Dr Violeti Gajić, redovnom profesoru, Rudarsko-geološkog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, na izradi makro- i mikroskopskih analiza uzoraka stena, kao i Zdravku Mrkonji, dipl. hem. iz „Hidroelektrana na Trebišnjici“, Republika Srpska, na izradi hemijskih analiza vode.

Nesebičnu pomoć tokom terenskih istraživanja pružili su mi: Petar Petrović, Ivan Veličković, Dejan Nikolić, Randel Jeremijev, Stefan Jovanović, Goran Aleksić, Miloš Grujić, pa im se ovim putem neizmerno zahvaljujem. Zahvalio bih se Ivanu Simiću i Aleksandru Simiću na pomoći prilikom izrade fizičkog modela epikarsta.

Imao sam zadovoljstvo da saradujem sa većinom profesora i kolega istraživača sa Departmana za hidrogeologiju. Posebno sam zahvalan: Savi, Stanku, Nebojši, Jakovu, Đorđu i Nenadu na zajedničkom vremenu provedenom na terenu i u kancelariji.

Istraživanja izvedena u okviru doktorske disertacije sprovedena su kroz Projekat Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Projekat OI 176022), u periodu 2011-2020. Veliku zahvalnost dugujem menadžmentu, inženjerima i operativcima JKP „Naissus“ iz Niša, na pristupu vodovodnom sistemu „Ljuberađa-Niš“ i njihovoj fondovskoj dokumentaciji.

Ne mogu, a da ne spomenem koliko sam zahvalan svojoj supruzi Ljiljani Jeremijev Petrović, koja je sa ogromnim strpljenjem i razumevanjem podnela moju zauzetost i okupiranost ovim radom, a naročito na ohrabrenju onda kada mi je to bilo najpotrebnije.

Hvala mojim Zorki, Zoranu, Vladi, Ani, Emi, Joci, Irmi, Draganu, Maci, Bobanu, Caci, Milki, Dragani, Mikiju na svim rečima ljubavi i razumevanja i podršci da ispunim svoje dečake snove.

Na konstantnoj podršci i ljubavi koju su mi pružali svih ovih godina i bez kojih ne bih ostvario mnogo toga, zahvaljujem se: Pavlu, Zorici, Milošu, Tanji, Marini, Marku, Kseniji, Svetlani, Jeleni, Sanji, Dejanu, Danijeli, Miroslavu, Mariji, Nataši, Milici, Aleksandru, Ljubici, Miloradu, Ivani, Milici, Branku, Bojani, Petru...

FUNKCIONISANJE I UTICAJ EPIKARSTA NA REŽIM, BILANS I KVALITET PODZEMNIH VODA ISTOČNOG DELA KARSTNOG SISTEMA SUVE PLANINE

Sažetak

Epikarst je deo karstne izdani koji se nalazi u okviru nadizdanske zone i predstavlja kompleksnu tačku dodira i mešanja nekonsolidovanog materijala sa površine terena, ostataka karbonatnih stena izmenjenih korozivnim delovanjem vode, živog sveta i njihovih ostataka, koja je delimično zasićena podzemnom vodom. Kompletan sud o stepenu razvoja i prisustva epikarsta na nekom krečnjačkom terenu moguće je doneti uz multidisciplinarna i obavezna detaljna hidrogeološka istraživanja.

Poligon za sprovedena istraživanja je bio karstni masiv Suve planine, koja u geološkom i geografskom smislu pripada Karpato-balkanskom lancu planina.

Rezultati prikazani u doktorskoj disertaciji su pokazali da je kvalitet podzemnih voda karstne izdani Suve planine veoma dobar. Osim povoljnih prirodnih uslova na dobar kvalitet voda imaju uticaj i procesi samoprečišćavanja, koji se odigravaju u podzemlju.

Opitom trasiranja pomoću Na-fluoresceina određena je brzina kretanja „nadizdanskog“ toka, dok je opit sa kontaminantom, definisao brzinu kretanja zagađujuće supstance i proces njenog menjanja usled fizičko-hemijskih procesa uz pridruženo delovanje prisutnih mikroorganizama. Eksperimenti u sintetičkom modelu epikarsta pokazali su da je moguće simulirati proceđivanje vode kroz epikarst u uslovima sličnim onima na lokaciji pećine Peč.

Heterogenost i anizotropija epikarsta utiču na živi svet, pre svega na bakterije, koje tu dospevaju sa površine terena i iz tla. S obzirom na postojanje živog sveta u ovom potpovršinskom sloju, mogući su biohemijski procesi delimične ili potpune razgradnje kontaminanta ili umanjivanja štetnosti po krajnje korisnike podzemne vode. Proces u epikarstu mogu povećati ukupni samoprečišćavajući potencijal karstne izdani, poboljšati kvalitet podzemne vode i prirodnu zaštitu karstne izdani.

Rezultati istraživanja ukazuju na važnost postojanja epikarsta u sistemu karstne izdani, pa uklanjanje ovog privremeno akumulacionog elementa karstnog izdanskog sistema može direktno uticati na kvalitet i količinu podzemnih voda karstne izdani.

Ključne reči: epikarst, karstni sistem, podzemne vode, procesi samoprečišćavanja, hidrohemijski i mikrobiološki procesi u podzemnoj vodi

Naučna oblast: Geološko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Hidrogeologija

UDK: 556.31:551.435.8(497.11)(043.2)

THE FUNCTIONING AND IMPACT OF EPIKARST ON THE REGIME, BALANCE AND
GROUNDWATER QUALITY OF THE EASTERN PART OF THE SUVA PLANINA MOUNTAIN
KARST SYSTEM

Abstract

The epikarst is a part of the karst outcrop that is located within the unsaturated zone and represents a complex point of contact and mixing of unconsolidated material from the terrain surface, remains of carbonate rocks altered by corrosive water, flora and fauna, and their remains, which is partially saturated with groundwater. The correct and complete perception of epikarst, its degree of development and the presence on the limestone terrain can be made with a multidisciplinary approach, with primary detailed hydrogeological research.

The study area for the applied multidisciplinary research was the karst massif of Suva Planina Mountain, that is the part of the Carpathian-Balkan mountain range.

The results presented in the doctoral dissertation indicate that the groundwater quality of the karst aquifer system of Suva planina Mt. is very good. In addition to favourable natural conditions, the good water quality is also affected by the processes of autopurification, which take place in the underground.

The Na-fluorescein dye tracing test determined the velocity of the subsurface flow, while the experiment with contaminant defined the velocity of the pollutant migration and its transformation due to physical and chemical processes with the associated microbiological activity. Experiments in the synthetic model of epikarst have shown that it is possible to simulate the groundwater seepage through epikarst in conditions as natural one at the Peč cave site.

The heterogeneity and anisotropy of the epikarst affects flora and fauna, primarily bacteria, which originate from the ground surface and from the soil. The existence of living world in this subsurface layer creates environment in which biochemical processes degrade the contaminant or at least reduce its danger level, also, increasing the overall autopurification potential and the natural protection of the karst aquifer.

The results of the research indicate the importance of the epikarst layer in the karst aquifer system, so the removal of this temporal groundwater storage element can directly affect the quality and quantity of groundwater of the karst groundwater.

Key words: epikarst, karst system, groundwater, autopurification processes, hydrochemical and microbiological processes in groundwater

Scientific field: Geological engineering

Scientific subfield: Hydrogeology

UDC number: 556.31:551.435.8(497.11)(043.2)

Sadržaj

I UVOD I TEORIJSKE POSTAVKE	1
1. Uvod.....	3
2. Cilj i svrha izrade doktorske disertacije	5
3. Dosadašnja saznanja iz predmetne problematike	7
4. Karst i epikarst	10
4.1. Osnovne karakteristike karsta	10
4.2. Osnovne karakteristike epikarsta	13
4.2.1. Osnovne strukturne odlike epikarsta	15
4.2.2. Nastanak i položaj epikarsta u prostoru	17
4.2.3. Evolucija epikarsta	20
4.3. Funkcionisanje epikarsta.....	22
4.3.1. Hidrogeološka funkcija epikarsta u karstnom sistemu.....	26
4.3.2. Živi svet u epikarstu.....	31
4.3.3. Epikarst i promene prirodnih uslova.....	32
4.4. Ciklus kruženja ugljenika i ugljen-dioksida u (epi)karstu.....	34
4.5. Ciklus kruženja azota u (epi)karstu	38
II KONCEPCIJA I METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA	41
5. Konceptija i metodologija istraživanja	43
5.1. Geološke metode.....	46
5.1.1. Metode daljinska detekcije i strukturno-geološke metode	46
5.1.2. Petrološke metode.....	48
5.1.3. Geomorfološke i speleološke metode	48
5.1.4. Geofizičke metode	48
5.1.5. Hidrogeološke metode istraživanja	49
5.1.6. Hidrogeološki eksperimenti na terenu i u laboratorijskim uslovima	51
5.1.7. Izrada karte ranjivosti i definisanje zona sanitarne zaštite	52
5.2. Negeološke metode.....	54
5.2.1. Hidrometeorološke i hidrološke metode.....	54
5.2.2. Pedološke metode.....	54
5.2.3. Hemijske, izotopske i mikrobiološke metode	55
III PODRUČJE ISTRAŽIVANJA	57
6. Opšte karakteristike istražnog područja.....	59
6.1. Geografski položaj	59
6.2. Klimatske karakteristike	63
6.3. Hidrološke karakteristike	68
6.4. Geomorfološke karakteristike	70

6.4.1.	Površinski karstni oblici.....	72
6.4.2.	Podzemni karstni oblici.....	74
6.5.	Geološke karakteristike	75
6.5.1.	Pregled ranijih geoloških istraživanja	75
6.5.2.	Geološka građa terena	76
6.6.	Hidrogeološke karakteristike	81
6.6.1.	Pregled ranijih hidrogeoloških istraživanja	81
6.6.2.	Hidrogeološke karakteristike terena	83
IV	REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA.....	115
7.	Rezultati istraživanja	117
7.1.	Rezultati daljinske detekcije i strukturno-geoloških istraživanja	118
7.2.	Rezultati geomorfoloških i speleoloških istraživanja.....	122
7.3.	Rezultati geofizičkih istraživanja	129
7.4.	Rezultati petroloških i pedoloških istraživanja	135
7.5.	Rezultati hidrogeoloških istraživanja.....	146
7.5.1.	Kartiranje epikarsta.....	147
7.5.2.	Monitoring kvantitativnih karakteristika karstnih voda.....	152
7.5.3.	Model isticanja karstnih izdanskih voda vrela Mokra i Divljana.....	157
7.5.4.	Monitoring kvalitativnih karakteristika karstnih voda.....	162
7.6.	Rezultati izotopskih metoda.....	182
7.6.1.	Povezanost padavina i podzemnih voda i srednje vreme zadržavanja podzemnih voda u podzemlju	187
7.7.	Rezultati sprovedenih eksperimenata	191
7.7.1.	Rezultati terenskih eksperimenata	192
7.7.1.1.	Opit trasiranja.....	192
7.7.1.2.	Eksperiment sa kontaminantom	207
7.7.2.	Rezultati laboratorijskog eksperimenata	219
8.	Analiza i interpretacija rezultata	230
8.1.	Procesi i reakcije koje se odvijaju u sistemu voda-zemljište-stena u nadizdanskoj zoni karstne izdani	230
8.2.	Izmena sastava podzemnih voda od ulaza do izlaza iz sistema karstne izdani „Bežište-Gornja Koritnica-Divljana-Mokra“	236
8.3.	Uloga i funkcija epikarsta u delu karstnog sistema Suve planine.....	240
8.4.	Samoprečišćavajući potencijal dela karstnog sistema Suve planine.....	250
8.5.	Predlog mera zaštite izvorišta „Mokra“ i „Divljana“	258
9.	Osvrt na dobijene rezultate i predlog daljih istraživanja.....	265
9.1.	Prikaz primenjenih metoda, prednosti i ograničenja u odnosu na dobijene rezultate 265	
9.2.	Predlog daljih istraživanja	270

10. Zaključak	274
11. Literatura	278
V GRAFIČKI PRILOZI	291

I UVOD I TEORIJSKE POSTAVKE

1. Uvod

Podzemne vode predstavljaju izuzetno značajan prirodni resurs, prisutan u svim procesima značajnim za eko-sisteme. Sa druge strane obnovljivost ovog prirodnog resursa se odvija u vremenski, za čovečanstvo merljivim okvirima. Kada je u pitanju vodosnabdevanje, podzemne vode odlikuje značajno bolji kvalitet od površinskih voda, usled odsustva fizičko-hemijskih i biohemijskih procesa kojima su površinske vode konstantno izložene. Zbog prirodnog položaja u unutrašnjosti zemlje su delimično ili potpuno zaštićene od zagađenja, a mogućnosti za samoprečišćavanje su mnogo veće. Međutim, proces istraživanja podzemnih voda je često neizvesniji i duži u odnosu na površinske vode. Upravo iz tog razloga je nastao veliki broj hidrogeoloških i drugih metoda kojima se istražuju podzemne vode u smislu definisanja: uslova formiranja, kretanja, dužine boravka u podzemlju, kontakta sa stenskim masama, procesa koji se prilikom filtracije dešavaju (samoprečišćavanja), isticanja i sl.

Ujedinjene Nacije (UN) su proglasile vodu strateškim resursom 21. veka. Evropska unija (EU) je, takođe, usvojila zajednički osnov upravljanja vodama kroz dokument „Okvirna direktiva o vodama EU“. Ključni princip tog dokumenta izražen je stavom da „*voda nije komercijalni proizvod kao neki drugi, nego nasleđe koje treba čuvati, zaštititi i shodno tome postupati.*“ (Direktiva 2000/60/EC¹ Evropskog parlamenta (EP) i Saveta Evrope (SE)).

U Srbiji oko 75% vode koja se koristi u svrhe vodosnabdevanja potiče iz različitih tipova izdani. Najveće rezerve podzemnih voda u Srbiji (Polomčić et al., 2012) se nalaze u okviru intergranularne sredine (aluvijalne naslage, osnovni vodonosni kompleks – OVK i neogeni sedimenti 81,7%), a zatim u karstnim terenima (18,1%), dok se pukotinski tip izdani ne karakteriše značajnim rezervama podzemnih voda. Sumarne količine voda koje se eksploatišu u Srbiji iznose oko 23 m³/s, pri čemu se najveće količine zahvataju iz aluvijalne izdani.

Na osnovu analize i kompilacije statističkih podataka UN, različitih literaturnih izvora i razmene podataka sa lokalnim ekspertima iz oblasti upravljanja podzemnim vodnim resursima Stevanović (2018 i 2019) dolazi do zaključka da „samo“ 9,16% svetske populacije koristi podzemnu vodu koja je poreklom iz karstnih izdani. Prema nekim ranijim procenama i izveštajima taj broj je bio procenjen na 20-25% svetske populacije (Ford & Williams, 1989; Stevanović et al., 2011). U Srbiji se tokom poslednjih 30 godina, skoro ¼ stanovništva snabdeva podzemnom vodom koja je akumulirana u okviru karstne izdani. Nažalost, i pored značajne eksploatacije, pojedina karstna ležišta podzemnih voda u Srbiji su nedovoljno ispitana, što je često dovodilo do mišljenja da podzemnih voda nema u dovoljnim količinama (Stevanović, 1991), a što je često izazivalo neracionalno korišćenje podzemnih voda ili usmeravanje ka većem korišćenju površinskih voda. Vode iz karbonatnih stena imaju dobre fizičko-hemijske karakteristike, a u karstu se mogu akumulirati velike količine podzemne vode.

Značaj podzemnih voda je odavno poznat, ali se na mogućnost da one budu ugrožene, a samim tim i ranjive na površinsko zagađenje usled ljudske aktivnosti, pažnja obratila tek sredinom XX veka (Margat 1968, prema Vrba & Zaporožec, 1994). Ranjivost podzemnih voda je počela da se intenzivnije izučava od polovine XX veka, a prikazuje na odgovarajućim kartama tek od 90-tih godina XX veka. Potencijal prirodne zaštite karsta je limitiran i veoma promenljiv. Različiti delovi fizičke sredine imaju različiti potencijal da zadrže ili razgrade (oslabi) zagađujuću supstancu. Izrada karata ranjivosti tj. osetljivosti fizičke sredine, omogućava da odredimo područja koja su ranjiva. Danas je poznato da zemljište i stene ispod tla imaju retardacione osobine, ali da u mnogim slučajevima nisu dovoljne da spreče zagađivanje podzemnih voda

¹ Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council

(Živanović, 2011). Upravo zato se održivim upravljanjem podzemnim vodama mora sprečiti da zagađujuće supstance uopšte dođu u dodir sa podzemnim vodama. Utvrđivanje zona sanitarne zaštite (ZSZ) predstavlja jedan od osnovnih preduslova za dugotrajno korišćenje podzemnog vodnog resursa. Današnja praksa određivanja zona sanitarne zaštite uglavnom je zasnovana na primeni metoda za ocenu ranjivosti podzemnih voda, koje su razvijene kako bi se obezbedile neophodne podloge za sprovođenje preventivnih mera. Primena metoda se uglavnom zasniva na korišćenju već postojećih podloga, takođe, ocenjivanje ranjivosti izdani uglavnom kao podlogu koristi horizontalnu komponentu kretanja podzemne vode, tj. vreme potrebno vodi da od tačke infiltriranja dospe do vodozahvatnog objekta. U poslednjih nekoliko godina pažnja je usmerena i na određivanje vertikalne komponente kretanja podzemnih voda, kojom se ocenjuje brzina vertikalnog transporta kontaminanta kroz nezasićenu zonu. Ova komponenta kretanja vode je naročito važna u izdanima gde postoje ponorske zone koje su u direktnom kontaktu sa nivoom podzemne vode, uz odsustvo zaštitnog sedimenta u povlati (Živanović, 2016).

Istraživanja prikazana u doktorskoj disertaciji pružaju određena pojašnjenja uticaja koji epikarst i zemljišni sloj, zajedno sa vegetacionim pokrivačem imaju na prirodnu zaštitu izdani. Na taj način će se, u sličnim uslovima, vertikalna komponenta kretanja podzemne vode, u kojoj epikarst ima značajnu ulogu, bolje definisati. Uloga nadizdanskog sloja -epikarsta- u izmeni kvalitativnih karakteristika podzemne vode, kao i u zaštiti karstne izdani od zagađivanja je analizirana, a na kraju je data procena koliko epikarst ima uticaja na procese samoprečišćavanja karstnog izdanskog sistema.

Na osnovu konsultacija sa dr Zoranom Stevanovićem, redovnim profesorom Rudarsko-geološkog fakulteta, opredelio sam se za hidrogeološka istraživanja južnog dela Karpatobalkanida, regiona hidrogeološki najviše istraženog u Srbiji. Preliminarna istraživanja su izvedena na Svrljiškim planinama i na Suvoj planini, ali je nakon analize tih rezultata odlučeno da se istraživanja odvijaju samo na Suvoj planini. Naslov disertacije: „Funkcionisanje i uticaj epikarsta na režim, bilans i kvalitet podzemnih voda istočnog dela karstnog sistema Suve planine“ formiran je kao rezultat Projekta izrade doktorske disertacije i njegove odbrane pred komisijom koju je formirala Katedra za hidrogeologiju, Rudarsko-geološkog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.

Osnovna hidrogeološka istraživanja su obavljena u podnožju Suve planine, dok su detaljni hidrogeološki i drugi istražni radovi i eksperimenti obavljeni na istočnim padinama planine, u oblasti karstnog izdanskog sistema, koji se prema dosadašnjim saznanjima drenira na karstnim vrelima Mokra, Divljana, Gornja Koritnica i Bežište.

Naučno-istraživačke aktivnosti, u okviru izrade disertacije, sprovedene su u skladu sa savremenom metodologijom, primereno predmetnoj problematici. Terenska istraživanja i laboratorijske analize vršene su primenom standardnih metoda i aparature, visokog nivoa preciznosti i u odgovarajućim laboratorijama. Prilikom sistematizacije i obrade prikupljenih podataka korišćeni su savremeni softverski paketi, uz primenu saznanja iz velikog broja literaturnih izvora, od udžbenika, fondovskih materijala, fundamentalnih monografija, do najaktuelnijih naučnih radova i internet portala.

2. Cilj i svrha izrade doktorske disertacije

Cilj izrade doktorske disertacije je definisanje uticaja epikarsta na funkcionisanje karstnog izdanskog sistema u pogledu režima kvantiteta i kvaliteta vode, kao i određivanje sposobnosti epikarsta da prečisti podzemne vode. Stoga su primenjene različite metode istraživanja na definisanom istražnom prostoru istočnih padina Suve planine, radi utvrđivanja prisustva i prostornog rasporeda epikarsta, njegove uloge u procesu filtracije vode od zone prihranjivanja do mesta isticanja, uticaja na količine voda koje se infiltriraju, uticaja na cirkulaciju i vreme boravka vode u podzemlju, uticaja na izmenu kvaliteta infiltrirane vode i na procese samoprečišćavanja.

Poseban cilj istraživanja bio je definisanje postojanja, prostiranja, debljine i odlika sloja epikarsta, zatim određivanje stepena uticaja epikarsta na režim kvantiteta i kvaliteta karstne izdani formirane u istočnom delu masiva Suve planine, koji se drenira na karstnim vrelima Mokra, Divljana, Gornja Koritnica i Bežište. Akcenat istraživanja je bio na terenskoj prospekcionoj epikarsta, u okviru zona koje su bile definisane prilikom kabinetskih istraživanja uz upotrebu: daljinske detekcije (satelitski snimci, topografske karte), strukturno-geološke analize rupturnog sklopa, geomorfoloških karata i sl. Tokom terenskih istraživanja definisane su na repnim profilima površine na kojima je epikarst prisutan na istražnom prostoru (tj. u okviru zona prihranjivanja osmatranih vrela), debljina epikarsta, vrsta „podine“ epikarsta (ispucala stena, karstifikovana stena i sl.), procenjen je sastav sloja epikarsta (odnos između zastupljenih frakcija materijala), prisustvo i vrsta vegetacionog pokrivača, i uzeti uzorci za dalje analize. Prikupljeni su podaci o količinama i kvalitetu istekle i zahvaćene vode sa karstnih vrela Mokra i Divljana i izvršena je analiza režima kvantiteta (analiza hidrograma), u cilju definisanja stepena uticaja koji epikarst (u zonama prihranjivanja ovih vrela) ima na količinu istekle vode, a delimično je definisan uticaj epikarsta na promene kvaliteta. Izvršena je kategorizacija epikarsta na istražnom prostoru u skladu sa prikupljenim podacima. Takođe, prikupljeni podaci su iskorišćeni prilikom izrade karte ranjivosti i definisanja zona sanitarne zaštite.

Jedan od ciljeva disertacije bio je i određivanje izmene hemijskog sastava vode od ulaska u sistem (infiltracija padavina i otopljenog snega) do njenog ponovnog javljanja na površini u vidu isticanja na vrelima u podnožju Suve planine. Tokom istraživanja izvršena je analiza mikroelemenata zastupljenih u vodi tokom njene cirkulacije u okviru posmatrane karstne izdani i definisan je mikrobiološki sastav podzemne vode.

U cilju definisanja sposobnosti epikarsta i karsta da „prečiste“ podzemnu vodu bilo je potrebno odrediti prisustvo i debljinu zemljišnog sloja, prisustvo i vrstu vegetacije i debljinu sloja epikarsta, kao i dužinu boravka vode u epikarstu i karstu. Radi definisanja srednjeg vremena zadržavanja vode u karstnoj izdani, izvršeno je određivanje sadržaja stabilnih izotopa u vodi i uspostavljanje veze između površinskih (atmosferskih) i podzemnih voda. Dok su terenska istraživanja, kao i eksperimenti na lokaciji pećine Peč, sprovedena su radi definisanja parametara elemenata epikarsta, uslova filtracije u prirodnim uslovima i funkcionisanja procesa samoprečišćavanja. U sklopu istraživanja izvršen je i eksperiment u laboratorijskim ulovima na fizičkom modelu epikarsta. Modelom su simulirani prirodni uslovi koji vladaju na lokaciji pećine Peč i simulirana dešavanja u situaciji eksczesnog hemijskog zagađenja.

Pored naučnog, definisanje uticaja epikarsta na režim kvantiteta i kvaliteta podzemne vode i na ukupne samoprečišćavajuće osobine karstne izdani ima i ekonomski značaj, jer omogućava da određene preventivne mere za zaštitu karstnih izvorišta budu bolje definisane (zone sanitarne zaštite-ZSZ), čime bi se opravdala ulaganja u zaštitu izvorišta u određenim oblastima, a sa druge strane omogućila upotreba „zaštićenog“ prostora i za druge svrhe, osim za senokos. Takođe,

značaj „zaštitnog sloja“ koji se sastoji od zemljišta i vegetacionog pokrivača, može biti umanjen prisustvom epikarsta koji je na visokom stepenu razvića, pa poznavanje osobina ovih nadizdanskih slojeva može pomoći u planiranju sanacionih mera u slučaju ekscesnih zagađenja.

3. Dosadašnja saznanja iz predmetne problematike

Izučavanjem karstnih izdanskih sistema bavili su se mnogi naučnici, koristeći u svojim istraživanjima različite metode: geološke, geomorfološke, petrološke, hidrološke, hidrometeorološke, geofizičke, speleološke, traserske, hidrohemijske i izotopske metode. Međutim, zbog svoje kompleksnosti u odnosu na druge geološke formacije, istraživači u karstu najčešće primenjuju multidisciplinarni pristup istraživanju, odnosno koriste više odgovarajućih metoda istraživanja u zavisnosti od svrhe istraživanja. U cilju sagledavanja uticaja epikarstne zone na proces prihranjivanja i cirkulacije vode u okviru karstne izdani, neophodno je navesti neke od osnovnih činjenica vezanih za ovu nezasićenu zonu, koje su do danas iznete u naučnoj i stručnoj literaturi.

Epikarst je među prvima „uočio“ i pokušao da objasni *Mangin* (1973. i 1975.) kada je proučavanjem hidrograma karstnih vrela, i bilansa indicirao postojanje sloja, iznad slobodnog nivoa karstne izdani, u kome je moguće zadržavanje (akumulacija) određenih količina podzemne vode, a kasnije postepeno ispuštanje te zadržane vode u karstnu izdan. Određena istraživanja dovela su do zaključka, nakon hidrohemijskih i izotopskih ispitivanja, da postoji mešanje infiltriranih površinskih voda i kišnice sa podzemnom vodom (*Bakalowicz et al*, 1974). *Bakalowicz & Jusserand* (1987) ukazuju na mogućnost da prirodni izotopi, kao što je $\delta^{18}\text{O}$, mogu poslužiti za proučavanje procesa koji se odigravaju u epikarstu. U pećinama su sprovedena i istraživanja vode koja procuruje (prokapna voda) sa tavanice, u pokušaju da se odredi količina vode koja procuruje sa tavanice, odredi njen kvalitet i pravac (smer) toka (test obeležavanja pomoću fluorescentnih obeleživača) i poreklo. Istraživanja su vršena u Velikoj Britaniji *Friederich & Smart* (1981) i *Bottrell & Atkinson*, (1992), kao i u Sloveniji u nekoliko istraživačkih kampanja *Kogovšek* (1997, 2010) i *Kogovšek & Šebela* (2004). Kasnije se razvijaju konceptualni modeli koje su predložili *Williams* (1983 i 1985), *Ford & Williams*, (1989, 2007) i *Klimchouk* (1987, 1995, 2000, 2004), a koji se tiču nastanka epikarsta i njegovog uticaja na dalji razvoj karstifikacije. *Gunn* je (1985) izneo stav da modeli karstne izdani nisu dovoljno detaljni, oslonivši se i na nalaze *Williams* (1983). Smatra da modeli pridaju mali značaj koncentričnom autohtonom prihranjivanju i akumuliranju vode i njenom filtriranju kroz zemljište i kroz gornji sloj raspadnute matične stene (subkutane zone, tj. zone epikarsta), dok je sa druge strane prenaplašen značaj difuznog toka i akumuliranja vode u zasićenim stenama i kanalima i šupljinama koji se u njoj nalaze.

Bottrell & Atkinson (1992), su na osnovu sprovedenih istraživanja u Peninskom karstu, Engleska, izdvojili tri komponente toka infiltrirane vode-podzemne vode. *Barbel-Perineau et al.* (2015) donose zaključke o distribuciji različitih komponenti toka infiltrirane vode u vadoznoj zoni i povezanošću brzine toka sa dubinom. *Kiraly* (2003) smatra da više od 50% infiltrirane vode dospeva u izdan u vidu „koncentrisanog“ toka, direktno kroz visoko provodne kanale – „drenove“ u okviru epikarsta. Istraživanja *Bakalowicz*-a (1995) dovode do zaključka da postoje: usmerena i direktna infiltracija i difuzna infiltracija kroz epikarst. Određenim geotehničkim i hidrogeološkim istraživanjima *Huntoon* (1997) dolazi do zaključka da se procurivanje oko i ispod tela brane dešava kroz „epikarstni sloj“, pre nego kroz sistem kanala i kaverni u karstifikovanoj steni. *Bakalowicz* (2003) takođe, zaključuje da zona prihranjivanja zajedno sa epikarstom daje sasvim drugačije značenje pojmu karstna izdan, kao i određena svojstva koje druge izdani ne poseduju.

Kiraly et al. (1995) i *Kiraly* (2003) u svojim matematičkim 3D modelima konačnih elemenata, sugerišu da će se infiltrirana površinska voda prvo zadržati u epikarstnoj zoni, a onda biti horizontalno-bočno usmerena. Slično su pokazali i *Loop & White* (2001) u radu posvećenom zaštiti od zagađenja karstnih izvorišta.

Usled oksidaciono-redukcionih procesa u tlu i epikarstu voda je obogaćena ugljen-dioksidom, pa predstavlja prirodni „traser“, pomoću koga se može razlikovati od vode koja je poreklom iz otvorene karstne izdani (Batiot et al, 2000). Fauna u pećinama i karstnim kanalima, zavisi od koncentracije rastvorenog organskog ugljenika (engl. *Dissolved Organic Carbon – DOC*) i limitirana je koncentracijom DOC, a ne sadržajem nutrijenata (Simon & Benfield, 2002; Simon et al, 2007, 2010; Pipan & Culver, 2013), a takođe, ustanovljeno da je značajno poreklo, tip i kvalitet DOC u okviru epikarsta. Elementi u tragovima su korišćeni kao prirodni traseri u istraživanju epikarsta sprovedenom u zapadnoj Irskoj (Tooth & Fairchild, 2003). Herman (2003) izdvaja dva aspekta geohemijskih svojstava vode iz tla i podzemne vode u krečnjacima, koji mogu uticati na shvatanje epikarsta:

- 1) Hemijski karakter vode iz tla je faktor koji interakciju voda-stena čini mogućom,
- 2) Transport hemikalija sa površine zemljišta kroz epikarst može zagaditi podzemnu vodu u karstnoj izdani.

Williams & Fowler (2002) uvode pojam „pulsni pritisak“ koji izaziva brzi prolazak vode kroz lebdeću epikarstnu izdan tokom olujnih kiša (ili brzog otapanja snega) usled rasta hidrauličkog pritiska u sloju. Efekat prilikom kojeg „stara“ voda iz vadozne zone (sloja epikarsta) biva potisnuta „novom“ vodom koja vrši vertikalni pritisak na celu zasićenu površinu, pa stoga dolazi do vertikalno usmerenog kretanja vode i ispiranja cele zone, što na kraju dovodi do vodozamene. Veći broj istraživača (Kirchner, 2003; Trček, 2003; Trček & Kroth, 2004; Fernandez-Cortes & Sánchez-Martos, 2008; Hunkeler & Mudry, 2007; Charlier et al, 2010) objašnjava ovu pojavu kao „efekat klipa“ (engl. *piston effect*).

Geofizičkim metodama novijeg datuma dokazano je postojanje potpovršinskog sloja drugačijih osobina od tla i od karsta (Al-Fares et al, 2002, Vouillamoz et al, 2003).

Jednu od definicija epikarsta daju Jones et al. (2004): *Epikarst je lociran u okviru zone aeracije i predstavlja heterogenu tačku dodira i mešanja nekonsolidovanog materijala, koji uključuje zemljište, regolit, ostatke osnovnog sedimenta, ostatke biljaka, i karbonatne stene koja je izmenjena rastvaranjem, i koja je delimično zasićena podzemnom vodom, a sposoban je da preusmeri vertikalnu infiltraciju vode ka dubljoj regionalnoj zoni zasićene karstne izdani, koja leži ispod.*

Bakalowicz (2003, 2005) zaključuje da epikarst deluje kao svojevrsna polupropusna membrana između spoljašnosti i biosfere sa jedne strane i „prave“ karstne izdani sa druge strane. Ford & Williams (2007) posmatraju epikarst i karstnu izdan kao jedan sistem, ali i kao potpuno odvojene sisteme, koji koegzistiraju jedan pored drugog.

Sa hidrogeološkog aspekta, veoma je značajna razlika epikarst zone od ostatka karstne izdani, koja se ogleda u visokom stepenu ispucalosti i difuznoj karstifikaciji (Jemcov, 2009). Postojanje relativne homogenosti u pogledu ispucalosti epikarst zone, svakako utiče i na stepen poroznosti ove zone. Glavne karakteristike epikarsta (Živanović, 2011) su akumuliranje podzemne vode i formiranje koncentrisanih tokova. Prva karakteristika povećava prirodnu zaštitu podzemnih voda, dok druga povećava ranjivost podzemnih voda. Stevanović (2015a, 2015b), ističe da se mora uzeti u obzir da na izuzetno karstifikovanim terenima epikarst može izostajati i dolazi do brzog dreniranja vode od padavina ili ponornica, stoga pukotine, kaverne i fosilni pećinski kanali u zoni aeracije ostaju ubrzo nakon padavina suvi. Šušterčić (1999) posmatra epikarst samo kao zonu u kojoj dolazi do devastiranja karsta, pa ga u skladu sa time i naziva speleotanatični prostor. Određeni istraživači (Krešić, 2013; Krešić & Mikszewski, 2013) su mišljenja da je postojanje epikarsta moguće samo u nekim, a ne u svim slučajevima razvića karsta.

Upotreba prirodnih izotopa, kao što je $\delta^{18}\text{O}$, ali i elemenata u tragovima može poslužiti za proučavanje procesa koji se odigravaju u epikarstu (Williams, 2008). Stabilni izotopi ^{18}O i ^2H se najčešće koriste u karstnim terenima radi definisanja srednjeg vremena boravka vode u podzemlju, utvrđivanja zona prihranjivanja, kao i veze između podzemnih i površinskih voda (Vasić, 2017; Vasić et al, 2019, 2020).

4. Karst i epikarst

4.1. Osnovne karakteristike karsta

Termin „karst“ predstavlja *kompleksan geološki pojam vezan za teren sa specifičnim hidrogeološkim, geomorfološkim i hidrološkim karakteristikama i predstavlja terene koji su izgrađeni od krečnjaka, dolomita, gipsa, halita i ostalih rastvorljivih stena* (Milanović P, 1979). Isti autor ističe da kao posledica rastvorljivosti u karstnim terenima nastaju morfološke, hidrološke i hidrogeološke pojave i oblici (vrtače, uvale, polja, pećine, kaverne, karstna vrela, ponori, ponornice, itd.), koji im daju specifičan izgled i karakteristike i vezani su za procese koji u njima se odvijaju. U daljem tekstu, uglavnom će se govoriti o karstnim procesima i pojavama u karbonatnim stenama (krečnjak i dolomit). Karbonatne sedimentne stene mogu nastati hemijskim i organskim putem. Krečnjaci uglavnom nastaju taloženjem u morima, jezerima i rekama, a najintenzivnije stvaranje je na dnu mora i to uglavnom na dubinama manjim od nekoliko stotina metara, u tzv. neritskoj i sub-pelaškoj zoni.

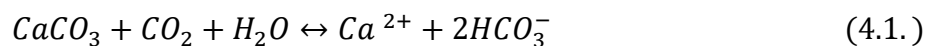
Karstifikacija podrazumeva kompleks geoloških procesa koji razaraju rastvorljive stene (Bögli, 1980; Bonacci, 1987; Krešić, 1988, 2010; Milanović P, 1979, 1981, 1999; Milojević, 1968; Stevanović, 1991, 2015), formirajući specifičnu morfologiju na površini terena, a specifične hidrogeološke uslove, tj. specifičan tip poroznosti u podzemlju. Različita geološka građa terena (drugačiji sastav rastvorljivih stena) uslovljava raznolikost karstnih terena (Slika 4.1.). Rasprostranjenje karstnih terena nije vezano za određeno geografsko područje (Milanović P., 1981), mada najveće prostranstvo zauzimaju u širokom pojasu između meridijana 20° i 60° (Mijatović, 1990). Posebno je karakterističan prostor Mediteranskog basena, kako po rasprostranjenju karsta tako i kada je u pitanju značaj vodnih resursa u formiranih u karstu. Ujedno, deo ovog prostora - oblast Dinarida smatra se „klasičnim karstom“ (Cvijić, 1893).

Poroznost u karstu sastoji se od pukotina, sistema pukotina, kaverni i kanala najrazličitijih veličina i oblika, kao i različitog stepa zapunjenosti sekundarnim materijalom. U genetskom smislu karstna poroznost se deli na primarnu – matičnu (unutar stene između minerala) i sekundarnu (pukotine i sistemi pukotina), mada mnogi stručnjaci izdvajaju i tercijarnu – kaverno-znu poroznost (Stevanović, 2015b). Sa stanovišta akumuliranja i kretanja podzemnih voda u karstu poroznost se može posmatrati kao apsolutna (ukupna) i efektivna poroznost. Ukoliko su ove nehomogene pukotine, kaverne i kanali međusobno povezani i ispunjeni vodom nastaje svojevrsna podzemna akumulacija - karstna izdan. Prema *Milanović P.* (1979), definicija ovog tipa izdani: „*Karstna izdan je nehomogena podzemna akumulacija u kojoj se voda sakuplja u mreži međusobno spojenih pukotina, kaverni i kanala.*“ Slične definicije možemo naći i kod drugih stručnjaka u našoj zemlji (Milojević, 1968; Dragišić 1997; Dragišić & Polomčić, 2009; Dragišić & Živanović, 2014; Stevanović, 1991, 2015b). Sveobuhvatna i često citirana je i definicija karstne izdani (Huntoon, 1995): *Karstna izdan sadrži rastvorljive stene sa takvom strukturom propusnosti gde dominiraju međusobno povezani kanali, koji su nastali rastvaranjem matične stene i koji su organizovani tako da omogućuje cirkulaciju podzemne vode u pravcu smanjenja gradijenta, pri čemu se osnovna struktura propusnosti razvija kao posledica korozivnog dejstva vode koja kroz kanale cirkuliše.*



Slika 4.1. Pojave i oblici u karstu – Klasični karst: (a) Prerast Vratna (Srbija), (b) vrelo Bune (BiH), (d) Dabarsko polje (BiH), (f) vodopad Kravica, reka Trebižat (BiH); Tropski karst: (c) cenota na Jukatanu (Meksiko) (foto: Milanović S), (e) karst tornjeva² (Kina) i (g) vodopad Detian³ (Kina, Vijetnam)

Ključnu ulogu u procesu karstifikacije ima brzina cirkulacije podzemne vode, s obzirom na činjenicu da hemijska reakcija kojom se vrši rastvaranje kalcita nije trenutna (formula 4.1.). Ukoliko je brzina cirkulacije vode suviše velika, neće biti dovoljno vremena da bi se proces rastvaranja odigrao, a ako je brzina cirkulacije vode mala, voda postaje (pre)zasićena i reakcija se zaustavlja, tako da je "optimalna" brzina cirkulacije u karstu neophodna da bi se proces karstifikacije ostvario (Mangin, 1994).



² tower karst

³ Detian Great Fall = Ban Gioc Waterfall, na granici Kine i Vijetnama

Bakalowicz (2005) navodi da su za razvoj karstnog procesa neophodni sledeći preduslovi:

1. mogućnost rastvaranja karbonatnih stena, tj. postojanje rastvarača;
2. cirkulacija podzemne vode, determinisana hidrauličkim gradijentom.

Na osnovu novijih statističkih podataka kojima raspolaže UN (literaturni podaci, mišljenja lokalnih stručnjaka i određene aproksimacije), broj ljudi koji se snabdeva vodom iz karsta procenjen je 2016. godine na oko 678.000.000 (Stevanović, 2018, 2019). To je gotovo dvostruko manje od broja objavljenog u nekim ranijim izveštajima (Ford & Williams, 1989; Stevanović et al, 2011), međutim i dalje predstavlja značajan broj populacije. U Srbiji i regionu Mediterana broj potrošača koji se snabdeva vodom za piće iz karsta kreće se oko 20% (Stevanović & Filipović, 1994; Stevanović 2009, 2010; Stevanović et al, 2011), a rekorder je Crna Gora sa preko 60% korisnika voda 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.

Zona prihranjivanja zajedno sa epikarstom daje sasvim drugačije značenje pojmu karstna izdan, kao i određena svojstva koje druge izdani ne poseduju (Mangin, 1974; Bakalowicz, 1995, 2003). Proceđena voda se obogaćuje novim količinama CO₂, koji je u ovoj zoni prisutan u većoj koncentraciji zahvaljujući dejstvu određenih mikroorganizama, i kada nove količine vode (nakon novih kiša ili otapanja snega) dospeju u nadizdansku zonu, voda „obogaćena“ ugljen-dioksidom biva potisnuta u izdan i proces karstifikacije se nastavlja.

Isticanje podzemnih voda u karstu najčešće se vrši preko izvora koji se nalaze na kontaktu karbonatnih stena sa vodonepropusnom sredinom na najnižim tačkama erozionog bazisa (veliki rečni tokovi, jezera i mora), ali može postojati i podzemno isticanje u susedne izdani. Mesto isticanja podzemnih voda može se pomerati vertikalno naviše ili naniže, odnosno u periodu velikih voda (uobičajeno u proleće) zone isticanja se obično nalaze na hipsometrijski višim nivoima, u odnosu na mesta isticanja u periodu malih voda (Milanović S, 2012; Stevanović, 2015b). Isticanje podzemnih voda može biti gravitaciono ili uzlazno (sifonalno), ukoliko se posmatra smer tečenja. Poznavanje tipa isticanja podzemnih voda je veoma značajno, naročito ukoliko je izvor zahvaćen ili postoje tendencije da se zahvati za vodosnabdevanje naselja ili sličnu namenu. Gravitacioni tip isticanja često je predisponiran direktnom vezom površinskih i podzemnih voda, što može usloviti pojavu poplavnog talasa nakon dugotrajnih i/ili intenzivnih kiša, a usled toga i nagle pojave zamućenja ili bakteriološkog i drugih zagađenja. U slučaju duboke cirkulacije i uzlaznog isticanja, voda u podzemlju provodi znatno više vremena, pa se i njen hemijski i mikrobiološki sastav može delimično poboljšati i stabilizovati autopurifikacionim (samoprečišćavajućim) svojstvima sredine (Milanović & Vasić, 2011; Vasić et al., 2013).

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 za određivanje pravaca cirkulacije podzemnih voda. Kada površinske vode uđu u podzemlje, dalje se sistemom pukotina kreću prema zoni koja drenira izdan rapidno, ukoliko su pukotine, kaverne i kanali (pećine) većih dimenzija ili lagano kroz sitne pukotine i pore u osnovi stene – matriksu (Stevanović, 2015a, 2015b). Najveću nepoznanicu za istraživače predstavlja vreme koje voda provede u karstnoj izdani, tokom turbulentnog i laminarnog kretanja od mesta infiltracije do mesta isticanja.

Vode iz karsta uglavnom imaju dobre fizičko-hemijske karakteristike, a unutar šupljina, kaverni i kanala u karbonatnim stenama mogu se akumulirati velike količine podzemne vode. Karstne vode su uglavnom malomineralizovane, što je posledica brze vodozamene i cirkulacije kroz podzemlje. U pogledu kvaliteta, bolje osobine sa aspekta vodosnabdevanja 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, odgovara najvišem nivou karstnih kanala (granica zone aeracije i stalno zasićene zone), nepovoljna sa aspekta hidrohemijских karakteristika voda, kao i uslova zaštite od zagađenja;
2. druga zona – zona usporene vodozamene sa horizontalnom i/ili sifonalnom cirkulacijom, a karakteriše je podzemna voda najboljih kvalitativnih karakteristika;
3. treća zona – zona izuzetno usporene razmene vode, pa ova zona nije povoljna sa aspekta vodosnabdevanja, obzirom na čestu pojavu povišene temperature i/ili visok sadržaj mikro- i makro- komponenti u vodi.

Zbog kompleksnosti karsta proučavanje najčešće zahteva istovremenu ili sukcesivnu primenu niza naučnih i inženjerskih metoda: geoloških, geomorfoloških, geobotaničkih, geofizičkih, hidroloških, speleoloških, hidro-geoloških, ekoloških i sl.

4.2. Osnovne karakteristike epikarsta

Epikarst predstavlja najviši deo stenske mase koji je izložen karstifikaciji, tj. sloj delimično izmenjene matične stene koji još uvek nije postao zemljište, a u kom je vodopropusnost (usled ispucalosti) i difuzna cirkulacija vode bitno veća i ravnomernije raspoređena u prostoru (vertikalno i horizontalno) u odnosu na ostatak karstifikovane stenske mase (Klimchouk, 2000). Kontrast u vertikalnom profilu u pogledu efektivne poroznosti i propusnosti između zone epikarsta i ostatka karbonatne stenske mase je od izuzetne važnosti za hidrogeološku funkciju ove pripovršinske zone (Slika 4.2.), odnosno mogućnost infiltracije površinskih voda je značajno lakša u odnosu na oticaj iz epikarstne u „pravu“ karstnu izdani.



Slika 4.2. Epikarst na profilu „kamenoloma“ krečnjačka, nedaleko od sela Kaletinac, Suva planina

Pojam epikarsta, od kada se pojavio pa do danas, izaziva dosta pažnje, a ponekad i jako suprotstavljene stavove istraživača. Brojne studije u kojima autori razmatraju postojanje, uticaj i funkcije epikarsta nailaze na oprečna mišljenja i činjenica je da se naučna javnost još uvek nije u potpunosti složila oko funkcije ovog pojma i zone u karstnoj izdani koju definiše.

Postojanje ovog podsistema (strukture) u okviru već kompleksne karstne izdani, počelo je da se nameće istraživačima sredinom sedamdesetih godina prošlog veka, kada je uočeno da hidrogrami određenih karstnih vrela, ali i njihov bilans ukazuju na postojanje sloja, iznad slobodnog nivoa karstne izdani, u kom je moguće zadržavanje (akumulacija) određenih količina podzemne vode, a kasnije postepeno ispuštanje te zadržane vode u karstnu izdan. U proračunu su korišćeni i podaci o utrošku infiltriranih padavina od strane biljaka, ali i količine vode koja direktno isparava iz zemljišta (Mangin, 1973, 1975). Ovaj deo uglavnom nesaturisane ili delimično saturisane izdani se u mnogome razlikuje od lebdećih izdani koje su npr. formirane u integranularnoj sredini. Razlika je u tome što se kvantitativne osobine lebdećih izdani formiranih u zbijenoj izdani ne razlikuju od osobina osnovne izdani, ponekad voda ima i isti kvalitet, dok izdan formirana u epikarstu ima drugačije odlike od „prave“ karstne izdani i u pogledu načina filtracije vode i u pogledu kvaliteta vode.

Epikarst se obično proteže od izloženog dela karbonatnih stena na površini zemljišta ili od kontakta tla/matična stena na dole do nekoliko desetina metara. Epikarst može sadržati lebdeću izdan iako se nalazi u okviru zone aeracije. Propusnost epikarsta opada sa dubinom i stvara neku vrstu uskog grla za vertikalno kretanje podzemnih voda. U epikarstu postoje pravci kretanja podzemne vode koji su veoma brzi, ali mogu biti i veoma spori tako da infiltrirana voda nakon olujnih padavina može stići do mesta isticanja karstne izdani u nekoliko talasa ili u jako dugom talasu. Dreniranje kroz epikarst može biti veoma brzo, posmatrano u vertikalnom pravcu, ali izuzetno sporo u horizontalnom. Određene količine infiltriranih voda mogu biti akumulirane u epikarstnoj izdani nekoliko godina, a mogu da migriraju na određenu udaljenost, horizontalno unutar zone epikarsta.

U većini karstnih oblasti i karstne izdani treba očekivati prisustvo epikarst zone. Glavne karakteristike epikarsta su akumuliranje podzemne vode i stvaranje uslova za formiranje koncentrisanih tokova u podini. Prva karakteristika povećava prirodnu zaštitu, dok druga povećava ranjivost podzemnih voda (Živanović, 2011).

Šušterčić (1999) posmatra epikarst samo kao zonu u kojoj dolazi do devastiranja karsta. Međutim, i u ovom slučaju epikarst može imati značajnu hidrogeološku ulogu u akumuliranju vode, iako Šušterčić ističe tranzicionu ulogu koju epikarst ima za vode koje se infiltriraju, značajniju od pećinskih sistema koji se nalaze u podini. Određeni istraživači su mišljenja da je postojanje epikarsta moguće ne u svim slučajevima (Krešić, 2013), i da se ne može o epikarstu govoriti kao o sloju koji je uvek prisutan u okviru sistema karstne izdani. Drugi razlog koji Krešić (2013) navodi kao razlog za nepostojanje epikarsta je to što se ova lebdeća izdan ne može koristiti za ljudske potrebe, ali to govori o veličini epikarsta i izdani, a ne njegovom prisustvu. Sa druge strane, kao dokaz postojanja epikarsta navodi prisustvo vrtača i vertikalnih drenova koji su sa njima povezani, ali ne kao integralni deo epikarsta. Krešić & Mikszewski (2013) tvrde da se koncept epikarsta često i nasumice primenjuje, kada god je zgodno iskoristiti ga da se objasni ponašanje karstne izdani i njeno funkcionisanje, bez ulaženja u detalje. Navode da se epikarst često pominje u studijama i istraživanjima čak i na terenima gde je apsolutno jasno da epikarst nije razvijen i ne postoji lebdeća izdan u okviru zone aeracije. Stevanović (2015a, 2015b) iako prihvata da je postojanje epikarsta u gornjim delovima zone aeracije često i da u njemu dolazi do akumuliranja određene količine podzemne vode i formiranje lebdeće izdani, koja kasnije utiče na određeno mešanje, zadržavanje i preusmeravanje novoinfiltriranih voda, ističe da se mora uzeti u obzir da na izuzetno karstifikovanim terenima može doći do brzog dreniranja vode od padavina ili ponornica. Na taj način pukotine, kaverne i fosilni pećinski kanali u zoni aeracije ostaju uvek suvi, naročito oni u najvišim delovima karstnog sistema. Stoga predlaže da svakoj hidrodinamičkoj analizi podataka sa nekog karstnog izvora ili vrela mora da

prethodi detaljno hidrogeološko kartiranje oblasti i što bolja procena prisustva ovog dela karstne izdani (uz upotrebu daljinske detekcije ili geofizičkih metoda).

4.2.1. Osnovne strukturne odlike epikarsta

Epikarst može nastati u uslovima razvijenog biljnog pokrivača i debelog sloja tla (Slika 4.3. i 4.4.), ali i u uslovima „ljutog“ karsta (holokarsta). Nastanak epikarsta određeni stručnjaci povezuju sa oslobađanjem stena od pritiska (stresa) kojem su bile izložene, raspadanju pod uticajem atmosferilija i rastvaranjem. Rastvaranje karbonata u uslovima postojanja biljnog pokrivača i tla je mnogo brže, usled povećane korozivnosti vode. Voda je agresivnija zahvaljujući povećanoj koncentraciji ugljen-dioksida (CO_2), koji nastaje u tlu raspadanjem biljnog i životinjskog materijala. Oko 80% rastvaranja obično se dešava u prvih 10-tak metara krečnjačkog izdanka (Williams, 2004). Isti autor ističe da se poroznost u epikarstu kreće i do 20%, dok u steni ispod, koja nije izložena atmosferskom raspadanju, ne prelazi 2%.

Za vreme sušnih perioda tj. perioda bez padavina, dolazi do isušivanja zemljišta i odvajanja istog od stene ili podsloja. Dolazi do gravitacionog kretanja zemljišta kroz pukotine, ukoliko su dovoljno razvijene i široke, ali će do kretanja zemljišnog materijala svakako doći prilikom prvih narednih padavina. Prvi nalet infiltrirane vode kroz prethodno nastale pukotine i kanale izazvaće ispiranje čestica tla, pa i čitavih slojeva. Zatim će uslediti ispiranje i sekundarne mreže kanala, koja više nije zaštićena slojem zemlje, i na taj način će doći do formiranja novih puteva za infiltraciju padavina, barem u nekom vremenskom intervalu odmah nakon olujnih padavina. Ovaj će proces trajati sve dok se primarni pravci infiltriranja ne ispune novim česticama zemljišta koje je doneto sa „uzvodnih“ (gornjih) delova terena.



Slika 4.3. Epikarst u okolini Rakoš česme, prekriven slojem humusnog zemljišta (levo) i sastav epikarsta (desno)



Slika 4.4. Epikarst na Suvoj planini, otkriven izgradnjom puta (gore) i u kamenolomu kod sela Sopotnica (dole)

U oblastima čestih promena suvih i vlažnih perioda može doći do plastičnog tečenja tla, pa tako dolazi do preraspodele zemljišta u odnosu na izgled stenske osnove. Vlaga koju takvo zemljište poseduje biva potisnuta kasnije u pukotine u najbližem okruženju, čime dolazi do kapilarnog kretanja vode kroz te pukotine, pa se pukotine usled hemijskog delovanja vode proširuju.

Sve prethodno navedeno nameće zaključak da će epikarst biti formiran i najbolje razvijen u topografski niskim oblastima, gde dolazi do koncentrisanja površinskih voda. Međutim, u nekoliko slučajeva zabeleženo je da su debeli slojevi epikarstno izmenjenih krečnjaka nastali na mestima gde je razvijena konveksna topografija, čemu je uzrok vlažna klima područja.

Sa dubinom smanjuje se zastupljenost epikarsta, pre svega usled smanjenja broja i dimenzija ruptura (prslina i pukotina) kroz koje voda može da cirkuliše, ali i usled povećanog taloženja karbonata iz rastvora. Razlika između postepenog smanjenja dimenzija pukotina u epikarstu i selektivnog deponovanja karbonata zavisi uglavnom od smanjenja rastvorljivosti sa dubinom. Kada je voda nezasićena karbonatima, nastaju brojni novi kanali kojima se voda kreće i rastvara stenu, nezavisno od brzine kretanja. Sa druge strane, kada se količina rastvorenih materija u vodi približi ekvilibrijumu brzina kretanja vode kroz pukotine i kanale je jedini faktor koji utiče na rastvorljivost stena. Na taj način uzrokovano je različito rastvaranje iste stene u različitim

delovima, pa se razvijaju povoljniji pravci kretanja podzemnih voda i nastanak karstnih kanala i kaverni većih dimenzija, kojima voda cirkuliše mnogo brže.

Postoje dva pristupa u modeliranju ponašanja vode u pukotinama u okviru epikarsta:

1. modeliranje koje uzima u obzir sve moguće promenljive koje utiču na ponašanje vode u pukotinama (Gabrovšek, 2000);
2. izrada jednostavnog modela, tako da odstupanja između modela i ponašanja vode u realnim uslovima, mogu lakše biti interpretirana (Palmer, 2003).

Koncept epikarsta je još uvek podložan naučnoj raspravi, a to se najbolje ogleda u velikom broju definicija kojim se opisuje ova prirodna pojava (Klimchouk, 2004). Razlog je velika prostorna varijabilnost epikarsta posmatrano lokalno, regionalno ili na nivou celog sveta, ali i loše poznavanje evolucione promenljivosti epikarsta. Karakteristike epikarsta, koje je potrebno odrediti da bi se neka pojava definisala kao epikarst, mogu se grupisati na sledeći način (Klimchouk, 2004):

- strukturna svojstva zone epikarsta;
- položaj epikarsta u vertikalnom profilu;
- poreklo epikarsta;
- hidrogeološka funkcija i uloga u celokupnom karstnom sistemu;
- uloga epikarsta u nastanku karstnog reljefa i povezanost sa zemljištem.

Mreže pukotina u plitkom podzemlju su na malom udaljenju (decimetri, do nekoliko metara), često se i međusobno prožimaju i nastavljaju jedne na druge. Rastojanje između pukotina se sa dubinom povećava poštujući hiperbolički zakon (Chernyshev & Dearman, 1991). Procene o poroznosti epikarsta se obično kreću od 1% do 10% (Williams, 1985; Smart & Friederich, 1987) i obično su i 1000 puta veće od procena poroznosti koja je nastala u karstifikovanoj steni ispod (Worthington et al, 2000). Donja granica epikarsta, prema karstifikovanoj steni, je obično veoma nepravilna i teško je odrediti njen tačan položaj u prostoru. Jako zavisi od reljefa terena, litostratigrafskih odlika i geoloških struktura matične stene. Uvećanje međusobnog rastojanja među pukotinama je značajnije duž pravaca pružanja većih raseda, i dopire do većih dubina. Granica epikarst-karst može biti oštra i lako uočljiva kada se poklapa sa (sub)horizontalnim međuslojnim granicama, ali i jako teško uočljiva u homogenim sekvencama stena (kod debelih slojeva krečnjaka i banaka).

Uprkos navedenom, terenska istraživanja pokazuju da u sistemu karstne izdani ponekad ne postoji epikarst koji funkcioniše na prethodno opisan način. Ovo se dešava zbog toga što je epikarst nerazvijen, ali i zbog toga što je uklonjen. Najčešći slučaj nepostojanja epikarsta je kada je uništen glacijacijom i radom lednika. Međutim, ne može se formirati ukoliko je početna poroznost karbonatnih stena velika, kao što je slučaj kod krečnjaka nastalih od korala kada je vrednost primarne poroznosti 20-35%. Tada imamo slučaj izuzetno brze infiltracije (Stevanović, 2015b) i napretka karstifikacije vertikalno na dole, pa ne postoje odgovarajući uslovi za nastanak sloja epikarsta.

4.2.2. Nastanak i položaj epikarsta u prostoru

Nastanak epikarsta je direktno povezan sa oslobađanjem stena od pritiska (stresa) kojem su bile izložene, zatim erozijom (fizičkim razaranjem) stene pod uticajem atmosferilija i korozijom (hemijskim rastvaranjem) stene. U najvećem broju slučajeva nastanak i razvoj karsta, samim tim i epikarsta, dešava se negde tokom procesa ponovnog otkrivanja međuslojnog karsta u kome se odigrava proces karstifikacije. Ova vrsta karstifikacije koja se naziva i interstratifikovana ili unutar-slojna (Klimchouk & Andrejchuk, 1996, Klimchouk et al, 1996)

može imati nekoliko varijeteta: u slojevima koji se nalaze u okviru mase drugih rastvorljivih slojeva, nastaje usled erodovanja nekih delova povlate (primer kolapsirane vrtače) i može biti razvijena usled nastanka otkrivke. Ukoliko dođe do potpunog uklanjanja sedimenata/povlate koji pokrivaju krečnjake nastaje ogoljeni karst, koji u najvećem broju slučajeva predstavlja početnu tačku evolucije epikarsta. Brzina i potpunost uklanjanja povlate najviše zavise od prirode erozije, brzine izdizanja krečnjačkih stena usled endogenih sila i od izgleda „povlatnog“ reljefa (Klimchouk, 2004).

U ogoljenom karstu, epikarst se razvija iznad već postojeće zone aeracije, u kojoj postoji procurivanje (infiltriranje) voda u dominantno vertikalnom pravcu, gde su pukotine i šupljine kojima se voda kreće preostale od ranijih faza procesa karstifikacije. Razlikovanje epikarsta i zone zasićene vodom (izdanske), zahvaljujući postojanju zone aeracije je jedno od osnovnih polazišta koncepta epikarsta.

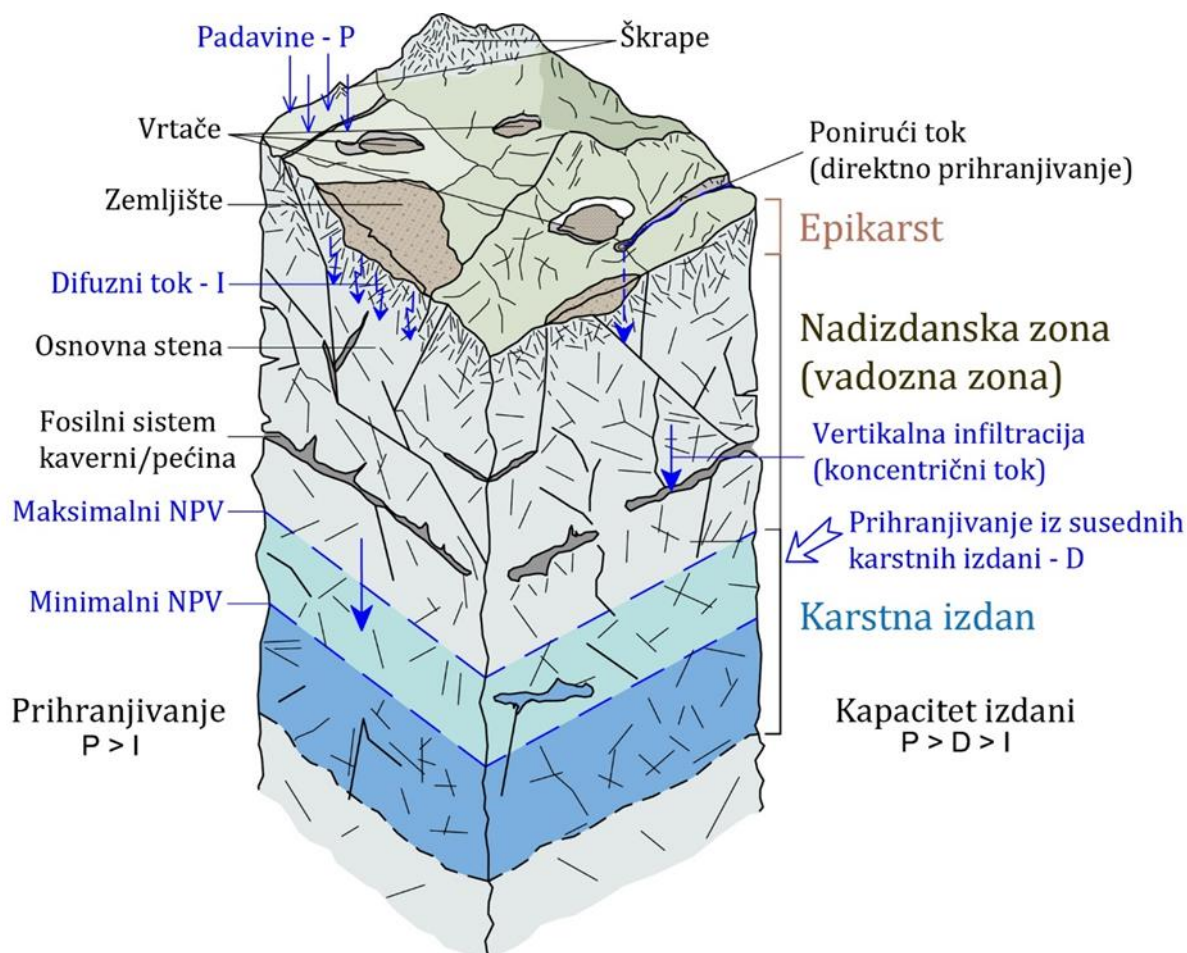
Strukturni preduslov za nastanak i dalji razvoj epikarsta je relaksacija karbonatnih (krečnjačkih) stena od pritiska kojem su bile izložene za vreme dijagenese i raspadanje stena usled izloženosti fizičkom uticaju atmosferilija. Ova dva procesa stvaraju početnu zonu epikarsta, zonu spremnu da svojim postojanjem izazove difuznu infiltraciju površinskih voda u podzemlje i razređivanje rastvora u najvišoj zoni čvrste stene. Rastvaranje (korozija) se pojačava sa prolaskom vremena i u kasnijim fazama evolucije epikarsta ima presudnu ulogu u formiranju jedinstvene strukture epikarsta. Oslobođanje stena od stresa/pritiska i površinsko raspadanje imaju najznačajniji uticaj na formiranje i veličinu pukotina, samim tim i na poroznost u pripovršinskim slojevima stena koje su ponovo otkrivene (Hudson & Harrison, 1997; Price & Knill 2009; Price & de Freitas, 2009). Na ovaj način dolazi do sledećih promena u stenama:

- proširivanje postojećih i nastanak novih pukotina;
- naglašavanje i otvaranje površi slojevitosti i mikro-pukotina, međusobno odvajanje slojeva krečnjaka;
- pogušćavanje mreže pukotina i međusobne povezanosti pukotina.

Raspadanje je odgovorno za hemijske promene *in situ* koje izazivaju mineraloške promene osnovne stene i nastanak čestica koje mogu da se istalože u pukotinama i na taj način umanje poroznost. Ovi uticaji zavise od sastava i strukture stene, klime, brzine otkrivanja matične stene i topografije. Razlika između raspadanja drugih stena i karstifikacije krečnjaka je u osnovi ono što predstavlja mogućnost za nastanak epikarsta. Raspadanjem drugih stena formira se rastresiti sloj (eluvijum) koji se sastoji od čestica koje su skoro inertne na dalje promene pod uticajem vode koja se infiltrira dublje, pa dolazi do zapunjavanja postojećih pukotina i poroznost drastično opada. Sa druge strane kod krečnjaka veličina pukotina se povećava usled konstantnog ispiranja i rastvaranja krečnjačke osnove, pa se na taj način pospešuje dalje razaranje matične stene. Usled toga produbljuje se površinski sloj, a „jačaju“ i veze sa pukotinama i kavernama u nadizdanskoj zoni, pa su kao krajnji rezultat procesa poroznost sloja i vodopropusnost veći nego na početku, i nastaje sloj epikarsta.

Položaj epikarsta u vertikalnom profilu (Slika 4.5.) u mnogome zavisi od toga kako posmatramo odnos zemljište-epikarst i epikarst-stena. U profilu položaj epikarsta je direktno povezan sa načinom nastanka ovog sloja.

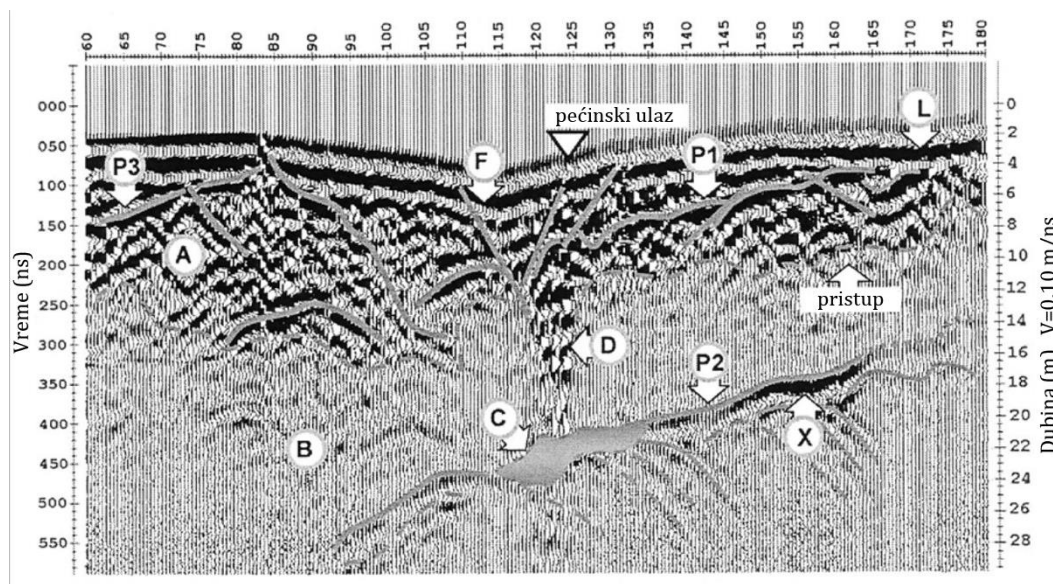
Debljina zone epikarsta može varirati u širokom dijapazonu, u ekstremnim slučajevima od 10 cm do 30 m (Klimchouk, 2000), a uobičajeno se procenjuje od nekoliko metara pa do 10-15 metara (Klimchouk, 2004).



Slika 4.5. Shema prihranjivanja otvorene karstne izdani, sa položajem epikarsta (prilagođeno, prema Stevanović, 2015b)

Postojanje potpovršinskog sloja drugačijih osobina od zemljišta i od karsta potvrđuje se i geofizičkim metodama novijeg datuma:

1. georadar (engl. *Ground Penetrating Radar* – GPR) pokazao je da u oblasti Mediteranskog karsta – pećina Lamalou u Francuskoj (fra. *Lamalou, Herault*) (Slika 4.6.) postoji sloj, koji se prostire u prvih 10 m dubine i prati izgled površine terena, nezavisno od pada slojeva krečnjačkih stena (Al-Fares *et al*, 2002);
2. snimanje magnetnom rezonancom (engl. *Magnetic Resonance Sounding* – MRS) sistematski je, na različitim karstnim terenima, pokazalo postojanje plitkog vodonosnog sloja iznad karstne izdani, koji jedino može biti opisan kao epikarstna izdani (Vouillamoz *et al*, 2003).



Slika 4.6. Istraživanja epikarsta pomoću georadara-GPR – A-epikarst; B-masivni, kompaktni krečnjak; C-Lamalou pećina; D-jamski ulaz u pećinu; F-rased; L-škrape; P1, P2, P3-ravni slojevitosti; X-nepoznati pećinski kanal (prema Al-Fares et al, 2001, 2002)

4.2.3. Evolucija epikarsta

Epikarst nastaje i razvija se pod različitim uslovima i generalno njegov razvoj može biti kontinualan ili sa prekidima.

Kontinualna evolucija epikarsta se odnosi na nastanak i promenu epikarsta od momenta prvog razaranja i rastvaranja karbonatnih stena, čak i ako su prekrivene zaštitnim slojem nerastvornih stena, pa do momenta kada je osnovna stena u potpunosti otkrivena i izložena uticaju spoljašnjih faktora.

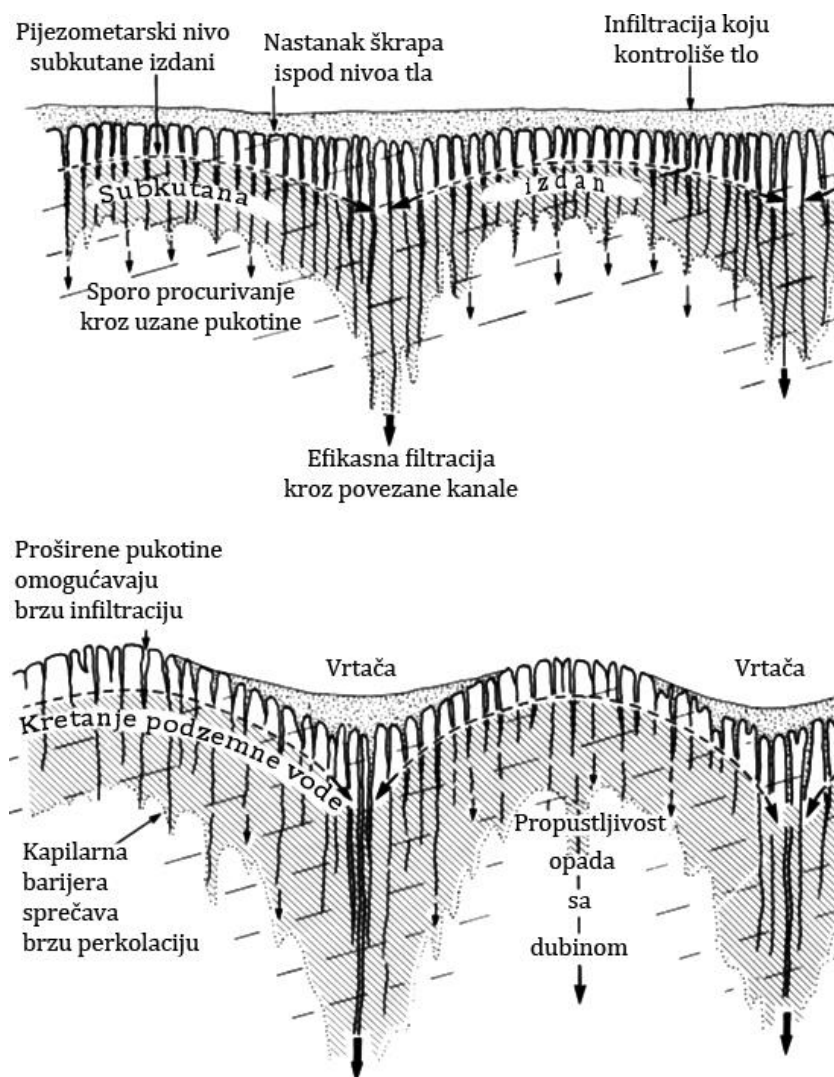
Diskontinualna evolucija epikarsta se dešava usled prekrivanja epikarsta bilo novim slojem sedimenata, bilo usled glacijacije i odnošenja nastalog epikarsta (što je čest slučaj u planinskim predelima). Tada dolazi do prestanka razvoja epikarsta usled delimičnog ili kompletnog gubitka hidrogeološke funkcije sloja. Naravno, nakon što dođe do ponovnog otkrivanja slojeva tj. otapanja lednika, proces razvića epikarsta će se nastaviti od momenta gde je prekinut.

Činioci koji utiču na formiranje epikarsta i njegovu promenu u toku vremena imaju kombinovani i kompleksan uticaj na matičnu stenu. Većina činilaca je promenljiva u vremenu i/ili prostoru što samo povećava kompleksnost ionako složenog procesa nastanka epikarsta (Klimchouk, 2004). Činioci se mogu grupisati na sledeći način:

- sastav matične stene,
- struktura i tekstura matične stene,
- litostratigrafija gornjih slojeva stene i tektonski uslovi nastanka slojeva,
- tektonika područja,
- lokalna topografija,
- prisustvo i debljina zemljišta,
- klima,
- mikroklima područja,
- priroda ogoljavanja krečnjaka i brzina ogoljavanja,
- istorija razvoja (jedna faza ili više faza razvoja),
- vreme.

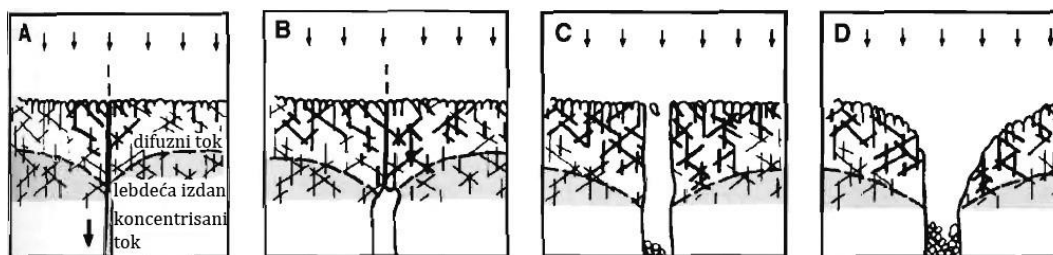
Postoje dva konceptualna modela koje su predložili *Williams* (1983, 1985), tj. Ford & Williams (2007) na jednoj, i *Klimchouk* na drugoj strani (1987, 1995, 2000, 2004), a koji se odnose na nastanak epikarsta i njegovog uticaja na evoluciju karstifikacije.

Model koji je predložio *Williams* (Slika 4.7.) naglašava uticaj usmerenog rastvaranja krečnjaka u okviru depresionih levaka koji nastaju na mestima koncentrične infiltracije vode iz epikarsta u nadizdansku zonu i dalje. Na taj način se iznad tih tačaka formiraju vrtače, kao posledica postepenog snižavanja površine terena usled iznošenja materijala.



Slika 4.7. Uticaj usmerenog rastvaranja u okviru depresionih levaka koji nastaju na mestima koncentrične infiltracije vode iz epikarsta u zonu aeracije (prilagođeno prema: Williams, 1983)

Model koji je predložio *Klimchouk*, takođe, uzima u obzir usmereno rastvaranje (Slika 4.8.), ali ističe proširenje kanala kojima voda cirkuliše direktno naniže (A) i koji formiraju skrivene drenove (okna, šahte) u okviru osnove epikarsta (B). Suština ovog modela je da dolazi do naglog ispiranja drene, usled njegovog proširenja, pa dolazi do kolapsiranja epikarsta (C) i tla iznad njega i formiranja vrtača (D).



Slika 4.8. – Model razvoja drenova na dnu epikarsta i pridruženih formi reljefa na površini (prilagođeno prema: Klimchouk 2004): A – početna faza, B – faza sakrivenog drena, C faza kolapsiranja, D – faza formiranja vrtače ili jame

Oba modela ističu značaj hidroloških procesa u epikarstu i jedinstvene morfoogenetske mehanizme ove zone i rezultat ovog procesa u vidu formiranja reljefa kojim dominiraju vrtače. Procesi koji se odvijaju u epikarstu i utiču na formiranje reljefa su pre svega vezani za promenu izgleda reljefa iz onog gde preovlađuju škrape („mladi“ oblici karstnog reljefa) u reljef kojim dominiraju vrtače („zreli“ karst, tj. holokarst). Ovaj proces izmene se dešava sve dok ima dovoljno karbonatnih stena za rastvaranje i produbljivanje karstnog reljefa.

Uticao tla na nastanak epikarsta i razvoj karstnog procesa može biti značajan ukoliko je zemljište prisutno od samog starta. Međutim, zemljište nastaje i tokom formiranja epikarsta i u tom slučaju može imati značajnu ulogu u poboljšanju rastvaračkih sposobnosti vode i pomaže proširivanju pukotina i kanala. Sa druge strane, poboljšanje rastvaračkih osobina vode, potpomaže kasnije iznošenje sitnih, pa sve krupnijih čestica tla usled povećanja brzine strujanja vode. Tako dolazi do oštećenja u strukturi zemljišnog sloja i gubitak tla će se progresivno uvećavati. Do gubitka zemljišnog sloja će prvo doći iznad mesta formiranja depresionih levaka u okviru epikarsta, a kasnije dolazi do širenja te zone usled sve bolje povezanosti šupljina i pukotina u okviru zone aeracije i u okviru epikarsta.

4.3. Funkcionisanje epikarsta

Epikarst deluje kao svojevrsna polupropusna membrana između spoljašnosti i biosfere, i „prave“ karstne izdani (podzemlja), zadržavajući određene količine vode u sebi, lokalno i zavisno od godišnjeg doba (Bakalowicz, 2005). Na ovaj način obogaćuje se proceđena voda novim količinama CO₂, koji je u ovoj zoni prisutan u većoj koncentraciji zahvaljujući prisustvu određenih mikroorganizama, i kada nove količine vode (nakon novih kiša ili otapanja snega) dospeju u nadizdansku zonu, voda „obogaćena“ ugljen-dioksidom biva potisnuta dublje u izdan i proces karstifikacije se nastavlja.

Opadanje vodopropusnosti sa dubinom uslovljava i neke druge pojave, osobene za karstnu izdan. Javlja se pojačano bočno (horizontalno) kretanje podzemnih voda, gde tok teži da dospe u propusne krupne, tektonski nastale i/ili sekundarno, karstifikacijom modifikovane oblike (pukotine, kanale, jame, pećine), koji predstavljaju direktnu vezu sa otvorenim delom karstne izdani. Upravo ova razlika u vodopropusnosti između „gornje“ i „donje“ zone, uslovljava „efekat levka“, odnosno usporenog kretanja infiltrirane vode u „donjoj“ zoni u odnosu na brzo kretanje vode u „gornjoj“ zoni, a time i mogućnost formiranja tzv. epikarstne izdani (Williams, 1983; Gunn, 1985). Zapremina privremeno akumuliranih voda, odnosno rezervi u epikarstu zavisi od starosti i od razlike u hidrauličkoj provodljivosti između epikarstne izdani i ostatka karstne izdani.

Određena istraživanja dovela su do zaključka, nakon hidrohemijskih i izotopskih ispitivanja, da postoji mešanje infiltriranih površinskih voda i kišnice sa podzemnom vodom, pre dospeća u

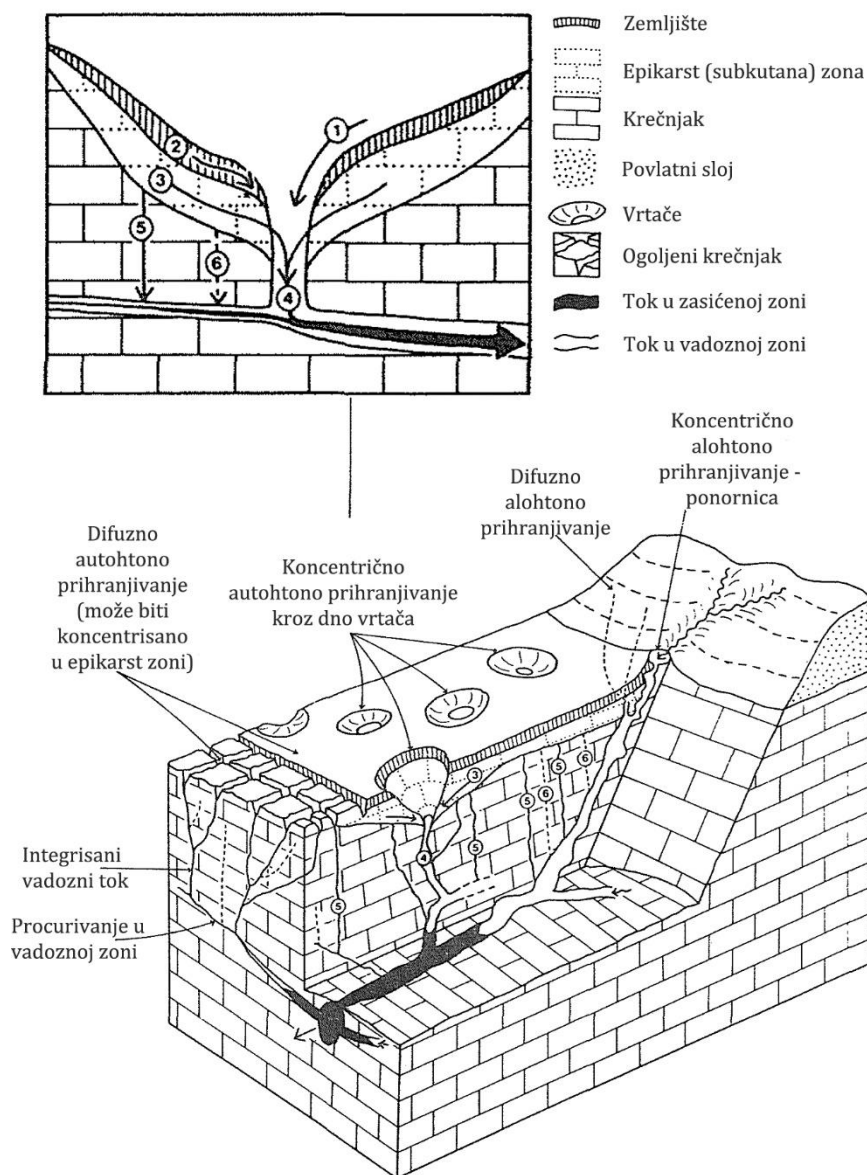
karstnu izdan (Bakalowicz et al, 1974). Naglašava se da voda koja se sporo „cedi“ kroz sredinu, na putu do otvorene karstne izdani, predstavlja epikarstnu izdan, i da su vrtače u stvari „praznine“ u epikarstnoj zoni. *Bakalowicz* (1975) u pogledu tranzitne zone (epikarst) naglašava značaj zapremine infiltrirane vode, kontakta vode sa krečnjačkim stenama i činjenicu da voda nije zasićena sa CaCO_3 . U kasnijim radovima *Bakalowicz* (2003) ističe da epikarst u stvari predstavlja „gornju“ zonu u odnosu na zonu infiltracije otvorene karstne izdani, tako da se osnova tj. baza epikarsta ponaša kao vodonepropusna-slabopropusna zona u odnosu na izdan.

Kroskorelacijom padavina i proticaja pećinskih tokova, naročito nakon pljusкова kada bi po pravilu trebalo da dođe do brzog odziva sredine (naročito karstne), uočeno je da postoji zadržka u povećanju proticaja pećinskog (izdanskog) toka (*Williams*, 1983). Objašnjenje se nametnulo u vidu postojanja određene pripovršinske zone, koja poput suđera upije vodu, ima određenu biohemijsku interakciju sa vodom i kasnije je postepeno ili naglo odaje u otvorenu karstnu izdan. *Williams* je ovu zonu nazvao *subkutana* (potkožna).

Gunn (1985) iznosi stav da modeli karstnog sistema izdani, koji izdvajaju tri komponente: prihranjivanje, akumuliranje i cirkulacija podzemne vode, nisu dovoljno detaljni. Smatra da postojeći modeli pridaju mali značaj koncentričnom autohtonom prihranjivanju i akumuliranju vode i njenom filtriranju kroz zemljište i kroz gornji sloj raspadnute matične stene (zone epikarsta), dok je sa druge strane prenaplašen značaj difuznog toka i akumuliranja vode u zasićenim stenama i kanalima i šupljinama koji se u njoj nalaze. Na osnovu analize slučaja tri karstne izdani: Mendip Hills u Engleskoj (eng. *Mendip Hills*), distrikt Vaitomo na Novom Zelandu (eng. *Waitomo district*) i Koz Komtal u Francuskoj (fra. *Causse du Comtal, Aveyron*), predložio je „novi model“ (Slika 4.9.) u kojem su komponente toka vode podeljene na:

1. prihranjivanje izdani:
 - difuzno autohtono,
 - koncentrično autohtono,
 - difuzno alohtono,
 - koncentrično alohtono – površinski tok.
2. akumuliranje podzemne vode:
 - u tlu i najvišim sedimentima,
 - u subkutanoj/epikarstnoj zoni,
 - u stalno zasićenim kanalima,
 - u stenama ispod nivoa podzemnih voda.
3. cirkulacija vode kroz sistem izdani:
 - površinski tok,
 - infiltracija,
 - filtracija kroz sedimente,
 - procurivanje u vadoznoj (nadizdanskoj) zoni,
 - (in)filtracija kroz epikarst,
 - cirkulacija podzemne vode kroz privilegovane kanale (drenove/kaverne),
 - cirkulacija u zasićenoj zoni,
 - procurivanje u okviru zone zasićenja,
 - difuzni tok,
 - tok kroz kanale, šupljine, kaverne.

Značaj svake od ovih komponenti će se menjati zavisno od lokalnih uslova sredine, i u pojedinim slučajevima određene komponente neće biti moguće identifikovati.



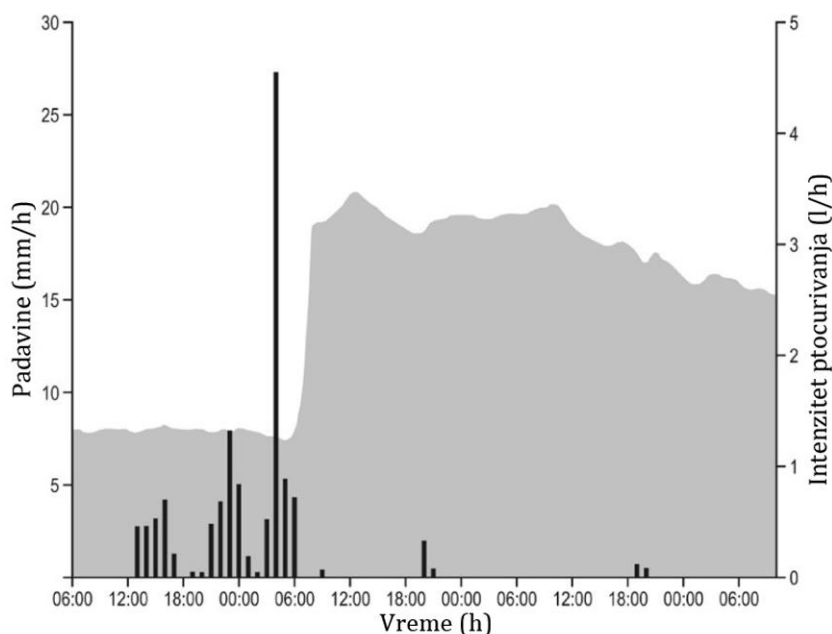
Slika 4.9. Konceptualni model karstne izdani u kom je dominantna cirkulacija vode kroz kanale: 1. površinski tok, 2. infiltracija kroz sedimente/zemljište, 3. (in)filtracija kroz epikarst, 4. filtracija kroz drenove, 5. tok u vadoznoj zoni, 6. procurivanje u okviru vadozne zone (prilagođeno prema Gunn, 1985)

Bakalowicz (1995) je sa svojim timom sproveo istraživanje koje se sastojalo od hidrodinamičkih, hemijskih i izotopskih analiza, uz nekoliko opita trasiranja. Rezultati istraživanja su pokazali da kišnica prihranjuje karstnu izdan, a da se kasnije pojavljuje na izvorima sledeći određene pravilnosti:

- usmerena i direktna infiltracija – deo padavina se infiltrira u izdan kroz otvorene i dobro povezane vertikalne pukotine i kanale
- difuzna infiltracija kroz epikarst – voda je delimično uskladištena u ovoj pripovršinskoj izdani i troši se kroz određene procese:
 - najveći deo ove vode biva utrošen na životne procese biljaka – *evapotranspiracija*;
 - manji deo se polako proceduje kroz slojeve epikarstno izmenjenih stena, uskih pukotina, prslina i kaverni, u specifičnom dvofaznom toku sličnom onom u intergranularnoj sredini – *spora infiltracija*;

- najmanji deo vode od padavina se utroši na popunjavanje vertikalnih kanala i kaverni međuzone (engl. *transmission zone*) za vreme olujnih padavina, pri čemu se u stvari prihranjuje epikarstna izdan – *odložena infiltracija*.

Brzina procurivanja infiltriranih padavina u mnogome može zavistiti i od vlage u zemljištu (Trček, 2003). „Starija“ voda će prvo biti potisnuta „novom“ koja će izvršiti vertikalni pritisak na celu vodom zasićenu površinu, pa će doći do vertikalnog usmerenog kretanja vode i ispiranja cele zone, što dovodi do vodozamenene i javljanja „efekta klipa“ (engl. *piston effect*). Uz pomoć izotopa kiseonika kao trasera moguće je izdvojiti komponente oticaja izazvanih jakim kišama (Trček & Krothe, 2004). Utvrdili su da „efekat klipa“ izaziva pomeranje nove vode u okviru epikarstne izdani i potiskuje već akumuliranu vodu iz epikarsta ka karstnoj izdani, na lokacijama vrela Hubelj (Slovenija) i izvora Orandžvil Rajza (engl. *Orangevill Rise*). Slično istraživanje u pećini Aranui, na Novom Zelandu (Williams & Fowler, 2002) pokazalo je da povećanje zapremine vode u okviru lebdeće epikarstne izdani tokom olujnih kiša (ili brzog otapanja snega) povećava hidraulički pritisak u sloju i samim tim izaziva „pulsni pritisak“ koji pojačava prolazak vode kroz epikarst (Slika 4.10.).



Slika 4.10. Odnos između padavina i procurivanja u pećini Aranui, Novi Zeland (prema: Williams & Fowler, 2002)

Određena biološka istraživanja u pećinama dovela su, takođe, do zaključka da u oblasti između površine gde dolazi do infiltracije površinske vode i tavanice pećina (odakle su uzimani uzorci vode sa živim svetom), postoji stanište koje se može nazvati „stanište vode koja procuruje“. Vrste koje žive u okviru ovog staništa se razlikuju od onih koje se obično mogu pronaći u pećinama, ali i od vrsta koje žive u površinskim delovima tla. U ovoj zoni se vrši i nagomilavanje organske materije koju voda na svom putu „prikupi“ prilikom prolaska kroz zemljišni sloj. Na taj način se epikarst obogaćuje ugljen-dioksidom koji nastaje kao krajnji produkt raspadanja organskog materijala. Usled ovih oksidaciono-redukcionih procesa voda koja potiče iz epikarsta je obogaćena ugljen-dioksidom, pa predstavlja prirodni „traser“, pomoću koga se može razlikovati od vode koja je poreklom iz otvorene, „ogolićene“ karstne izdani (Batiot et al, 2000). Iz ovoga proizilazi da je epikarst svojevrsan posrednik (engl. *interface*) između biosfere i dubljeg dela karsta. Nastanak i razviće karsta, gledano kroz prizmu bioloških procesa, jako zavisi od postojanja epikarsta i procesa koji se tu odvijaju.

U pećinama su sprovedena i istraživanja vode koja procuruje (prokapna voda) sa tavanice (Kogovšek, 2010) i one koja se nalazi u bigrenim kadicama, u pokušaju da se odredi količina vode koja procuruje sa tavanice, odredi njen kvalitet i pravac (smer) toka (test obeležavanja pomoću fluorescentnih obeleživača) i poreklo. Rezultati istraživanja su pokazali, iako postoji zona aeracije od skoro 100 m iznad izdanske zone u Postojnskoj jami, da je odziv epikarstne sredine na kišne serije izuzetan, i da se 72% ukupnih godišnjih padavina infiltrira kroz epikarst. Infiltrirana voda je u okviru lebdeće izdani epikarsta potiskivala prethodno akumuliranu vodu zauzimajući njeno mesto, i potiskivala je prema mernim profilima u okviru pećinskih kanala. Ukoliko je količina vode u epikarstu bila mala, pre jakih kiša, do odziva sredine ne bi došlo sve dok se svi kanali i pore ne bi popunile novom vodom. Testovi obeležavanja ukazali su na veliku adsorpcionu moć epikarsta, jer obeleživač koji nije direktno unet u sredinu, već raspršen po površini terena pojavljivao se u pećini tek nakon 5 meseci, i pojavljivao se i tokom narednih 7 godina. Sa druge strane obeleživač unet u sredinu, putem nekog od ponora ili kroz dno vrtača, kroz sredinu je dospeo mnogo brže u pećinu, nakon 1-3 dana.

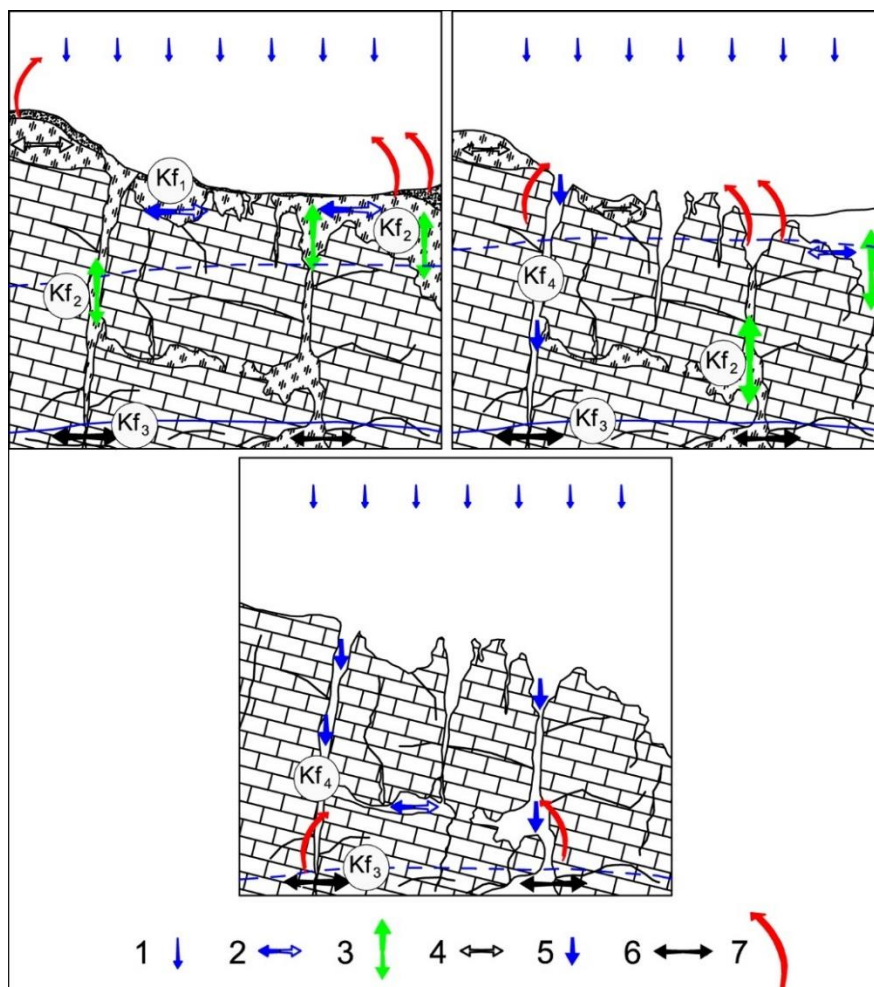
Matematičkim 3D modelima konačnih elemenata, potvrđeno je da se infiltrirana površinska voda prvo zadržava u epikarstnoj zoni, a onda biva horizontalno-bočno usmerena ka oblastima gde je pojačano kretanje podzemnih voda (Kiraly, 1995, 2003). Voda se u ovim oblastima kreće vertikalno naniže, kroz tzv. *drenove* (šah ili okno), putem koji se preskače zona aeracije (nadizdanska zona karstne izdani) i voda direktno doprema u stalno zasićenu (izdansku) zonu. Kontaminanti se ponašaju dvojako u uslovima postojanja masivnije zone iznad pećinskih kanala, ukoliko postoji i epikarst (Loop & White, 2001). Kontaminanti budu „zadržani“ i onda tokom dužeg perioda vremena budu ispuštani u podzemni tok vode, pa zagađenje bude prisutno u manjim koncentracijama, ali mnogo duži period vremena.

Određenim geotehničkim i hidrogeološkim istraživanjima došlo se do zaključka da procurivanje oko i ispod tela brane pre može da se dogodi kroz „epikarstni sloj“, nego kroz sistem kanala i kaverni koji postoji u okolini brane (Huntoon, 1997).

4.3.1. Hidrogeološka funkcija epikarsta u karstnom sistemu

Jedna od osnovnih odlika epikarsta je da se voda mnogo lakše infiltrira u epikarst, nego što se iz njega drenira dublje u karstnu izdan. Homogenost poroznosti, a samim tim i vodopropusnost gornjeg sloja epikarsta, postepeno opada sa dubinom, samim tim i difuzna infiltracija, koja je intenzivna na „vrhu“ epikarsta u potpunosti opada na njegovom „dnu“. Filtracija vode se odigrava kroz pukotine koje duboko prodiru kroz sloj, nekada i do karstne izdani, više od 50% infiltrirane vode dospeva u izdan u vidu „koncentrisanog“ toka, direktno kroz te visoko provodne kanale – „drenove“ (Kiraly, 2003). Smatra se da je koeficijent filtracije u epikarstu 2 do 3 reda veličine veći nego u zoni aeracije karstne izdani, preko koje leži (Slika 4.11). Međutim, heterogenost prostorne distribucije još je značajnija za ponašanje epikarsta u hidrogeološkom smislu. Propusnost epikarsta opada sa dubinom i stvara neku vrstu uskog grla za vertikalno kretanje podzemnih voda, ali u epikarstu postoje i prošireni prostori. Ova dvojakost može uticati na pojavu da infiltrirana voda nakon olujnih padavina stigne do mesta isticanja karstne izdani u nekoliko talasa ili u jednom jako dugom talasu. Dreniranje kroz epikarst može biti veoma brzo, posmatrano u vertikalnom, ali izuzetno sporo u horizontalnom pravcu.

Istraživanja uticaja epikarsta na prihranjivanje karstne izdani vršena su u Velikoj Britaniji od strane *Friederich & Smart* (1981) i *Bottrell & Atkinson* (1992), a u Sloveniji je istraživanje sprovedeno u nekoliko istraživačkih kampanja, tokom kojih su praćeni fluorescentni traseri uneti u karstni sistem na granici između zemljišta i epikarsta (Kogovšek, 1997, 2010).



Slika 4.11. Hidrogeološka funkcija epikarsta:

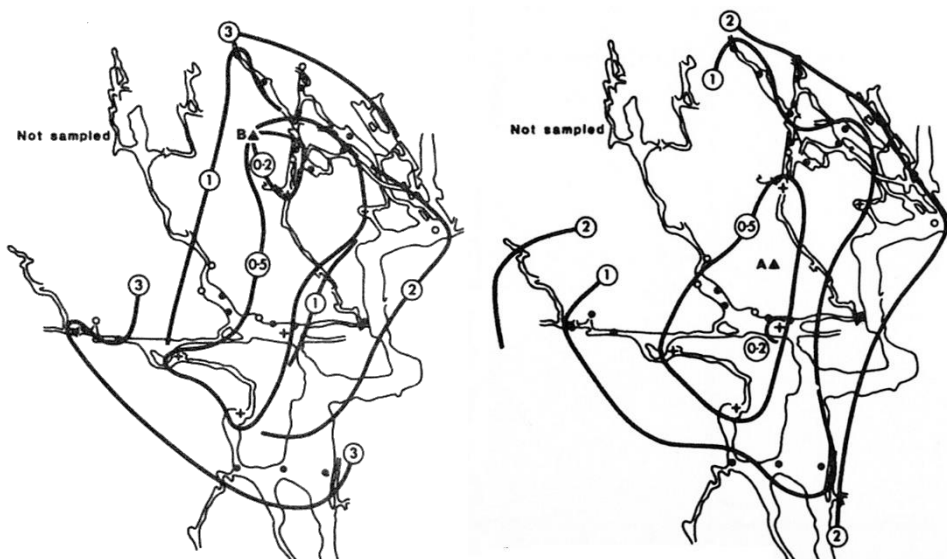
Kf_1 – koeficijent filtracije u epikarstu, horizontalni pravac, Kf_2 – koeficijent filtracije u epikarstu, vertikalni pravac, Kf_3 – koeficijent filtracije u karstnoj izdani, horizontalni pravac, Kf_4 – koeficijent filtracije u vertikalnim kanalima drenovima; $Kf_4 > Kf_2 \gg Kf_3 > Kf_1$;

1-padavine, 2-kretanje vode u epikarstu horizontalno, 3- kretanje vode u epikarstu vertikalno, 4- povremeno kretanje vode u epikarstu horizontalno; 5-dreniranje, brza filtracija naniže; 6-kretanje vode u karstnoj izdani; 7-isparavanje vode

U slučaju istraživanja koje su obavili *Friederich & Smart* (1981) traser je ubačen na nekoliko lokacija u sloju iznad pećine i po očekivanju boja se prvo pojavila u pećini direktno ispod mesta injektiranja, međutim, došlo je i do njenog pojavljivanja na svim osmatranim lokacijama jako brzo posle injektiranja (Slika 4.12.). Naime, traser se pojavio nakon samo nekoliko sati na lokaciji ispod tačke injektiranja, ali je došlo do lateralnog širenja trasera i njegovo pojavljivanja na lokacijama i do 60-80 metara od mesta injektiranja u roku od 5 dana. Većina trasera pojavila se nakon nekoliko dana prateći tok vode kroz drenove u okviru epikarsta, međutim u tragovima traser je detektovan i narednih 13 meseci na različitim lokacijama u pećini.

Drugo istraživanje, takođe sprovedeno u Engleskoj, u Peninskom karstu (engl. *Pennin karst*) je dalo slične rezultate (*Bottrell & Atkinson*, 1992). Četiri različita fluorescentna traser injektirana su ispod zemljišta u povlatnom sloju pećine Vajt Skar (engl. *White Scar Cave*) u okviru koje je na 24 lokacije osmatrano njihovo pojavljivanje. Eksperiment je sproveden 10 puta, sa 7 različitih lokacija injektiranja. Vremenski uslovi su se jako razlikovali od testa do testa, od jako suvih do izuzetno kišovitih. Obeleživač je kroz povlatni sloj pećine debeo 45-90 metara prolazio oko 24h. Međutim, dešavalo se da se boja ne pojavi prvo na lokaciji koja je direktno ispod ili nedaleko od mesta injektiranja, već i do 100 metara daleko od mesta injektiranja. Koncentracija trasera na lokacijama koje su osmatrane eksponencijalno je opadala,

što je bilo očekivano. Međutim, na nekoliko lokacija se posle olujnih kiša koncentracija uvećala, ukazujući na pulsno ispiranje trasera iz lebdeće izdani, gde je bio zadržan. Dobijen je „testerast“ dijagram koncentracije isticanja trasera, koja postepeno opada u toku nekoliko meseci.



Slika 4.12. Disperzija trasera u okviru pećine, lokacija Mendip Hills, Enleska (levo-rodamin, desno-uranin):
+ - lokacije injektiranja obeleživača, • - lokacije uzorkovanja (preuzeto iz Friederich & Smart, 1981)

Istraživanjima sprovedenim u Sloveniji (Kogovšek 1997, 2010) u oblasti pećine Pivka jama na osnovu opita trasiranja, izdvojene su tri komponente toka u vadoznoj (nadizdanskoj) zoni na osnovu brzine:

1. brzi tok, kroz zonu: 0,5 do 2 cm/s;
2. sporiji tok, kroz zonu: reda veličine 10^{-2} cm/s;
3. najsporije brzine toka kroz nadizdansku zonu: < 0,001 cm/s.

Bakalowicz & Jusserand (1987) su upoređujući koncentracije $\delta^{18}\text{O}$ u kišnici i vodi koja procuruje u pećini Nio (fra. *Grotte de Niaux*) južna Francuska, utvrdili da je potrebno do 18 nedelja da se voda profiltrira kroz 300 metara slojeva krečnjaka i dospe u otvoren karstni tok. U semi-aridnim oblastima Novog Meksika, SAD (Williams, 2008), ustanovljeno je da se voda kretala brzinom od 7-15 m/god kroz 250-300 metara stalno zasićene zone iznad pećine Karlsbad (engl. *Carlsbad Caverns*). U Izraelu je istraživanje pokazalo da do izotopske homogenizacije dolazi jako brzo nakon infiltracije vode, međutim, onda se dešavalo da određena količina vode odmah dospe u podzemne kanale, a da određena količina vode bude zadržana i nekoliko decenija u epikarstu (Williams, 2008).

Na osnovu rezultata analiza elemenata u tragovima u procednoj vodi pećine u zapadnoj Irskoj Tooth & Fairchild (2003) zaključili su da nivo podzemnih voda u karstu odgovara prilivu vode koji dotiče kroz zemljište u suvim periodima, dok sa druge strane reaguje na priliv vode nastao usled „efekta klipa“ za vreme kišnih perioda.

Varijacija brzine kapanja vode sa tavanice pećine zavisi od efekta klipa i promene pritiska vazduha u unutrašnjosti pećine (Fernandez-Cortes *et al*, 2008). Na godišnjem nivou brzina kapanja vode zavisi od sezonskih promena u količini padavina. Međutim, nagli porasti brzine kapanja (porast > 1,5 mm/h) dešava se usled pritiska infiltrirane vode duž preferencijalnih pravaca, kao i zbog evakuacije „stare“ vode usled postojanja efekta klipa. Sezonske promene brzine kapanja su duže i postepenije. Suprotno tome, primetili su nagle promene infiltracionog režima usled mobilizacije rezervi vode u mikro-pukotinama i porama. Ovi događaji traju između 5 i 10 dana. Oba režima procurivanja vode povezana su sa viškom infiltrirane kiše ili sa

vrstom infiltrirane vode u nezasićenoj zoni. Tokom olujnih i/ili obilnih padavina (posebno tokom jeseni) zabeležen je mnogo veći porast brzine kapanja, ukoliko je veća količina vode akumulirana u vadoznoj zoni tokom prethodnog perioda ili ukoliko je maksimum kiše tokom nekoliko dana bio zaista značajan.

Prethodno navedene osobine epikarsta opisuju mogućnost epikarsta da apsorbuje, akumulira i propusti infiltriranu kišnicu. Ukoliko je karst otkriven, brzina infiltriranja vode zavisi najpre od osobina poroznosti osnovne stene (vertikalnog hidrauličkog gradijenta), ali ukoliko postoji zemljišni pokrivač umnogome će zavisi od prirode tla (infiltracionog kapaciteta tla).

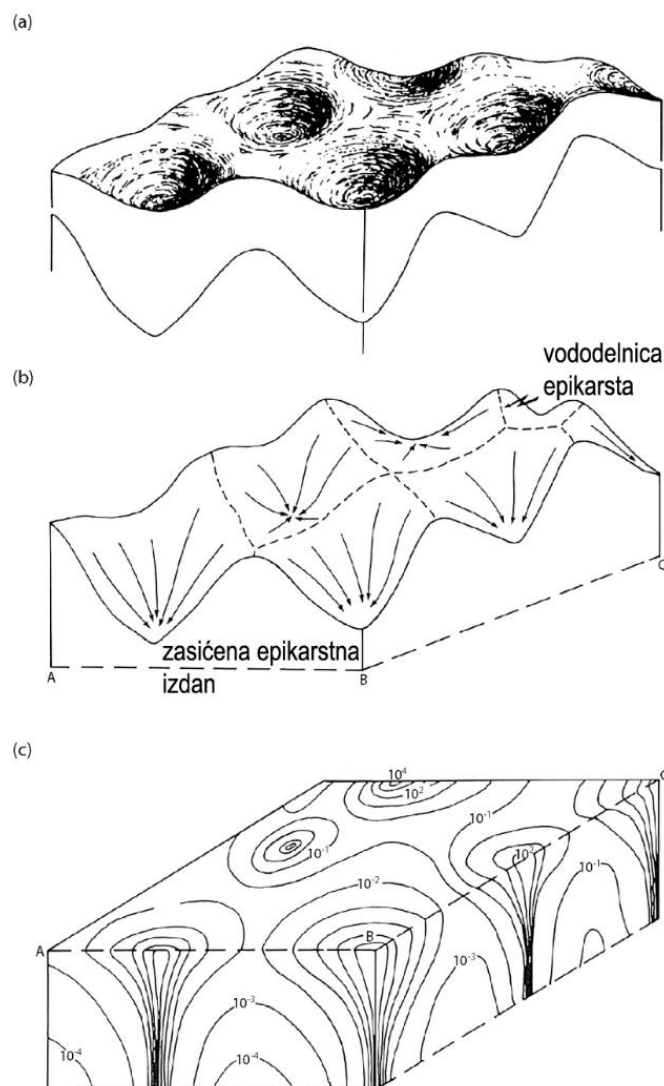
Specifična izdašnost epikarsta (Williams, 2008) zavisi od tri faktora: 1) debljine i neprekidnosti sloja; 2) prosečne poroznosti i 3) relativne brzine dotoka tj. isticanja vode iz epikarsta.

Prilikom filtracije vode kroz epikarst dolazi do razdvajanja toka na tri komponente (Klimchouk, 2004): 1. filtracija kroz vertikalne kanale (okna ili drenove), 2. filtracija kroz zonu aeracije i 3. procurivanje kroz nadizdansku zonu. Epikarst distribuira vodu ka zoni aeracije u vidu brzog i sporog toka i odgovoran je za usporavanje infiltracije padavina i njihovo mešanje sa vodom koju je ranije sadržao. Takođe, odgovoran je i za brzi hidraulički tok na mestima gde postoji direktna veza sa kanalima i pukotinama u zoni aeracije (filtracija kroz drenove). Protok vremena utiče na to da se sistem sve bolje „organizuje“ i razvija, rastvaračkom snagom vode, u smeru poboljšanja vodopropusnih osobina epikarsta. Na taj način poboljšava se infiltriranje vode ka nadizdanskoj zoni i izdani. Prema složenosti i organizovanosti sistema pukotina i šupljina u epikarstu može se proceniti njegova „starost“ i razvijenost.

Spora komponenta toka je vezana za cirkulaciju vode na većim dubinama vadozne zone, na prelazu u karstnu izdan (Barbel-Perineau et al, 2015). Vadozna zona je ispucala i karstifikovana, pa se komponenta srednje brzog toka javlja nevezano od dubine i stepena ispucalosti/karstifikacije ukoliko postoji hidraulička povezanost šupljina i visok pritisak iz gornjih slojeva. Komponenta brzog toka javlja se jedino u dobro razvijenim drenovima koji prolaze kroz celu vadoznu zonu, javlja se do dubine od 200 metara, kada postepeno nestaje i prelazi u spori permanentni tok (prva komponenta toka).

Proces primanja i ispuštanja vode podseća na funkcionisanje cediljke (npr. za špagete), što više vode ima u njoj, više vode i brže iz nje istekne, ali sa opadanjem količine vode u posudi, opada i količina i intenzitet isticanja vode. Isticanje vode iz epikarsta direktno zavisi od vertikalnog hidrauličkog gradijenta sloja na koji epikarst naleže (Slika 4.13.). Zbog toga se u epikarstu mogu akumulirati velike količine vode koja se može jako brzo isprazniti, u drugom slučaju postoji epikarst koji se često dopunjuje, ali se sporo prazni i postoji epikarst koji je u neprekidnom kontaktu sa karstnom izdani i teško je odvojiti lebdeću izdan od karstne, barem u ovom smislu.

Epikarst i karstnu izdan možemo posmatrati kao jedan sistem, ali i kao potpuno odvojene sisteme, koji koegzistiraju jedan pored drugog (Ford & Williams, 2007). Dokaze za to su dobili iz prethodno navedenih opita obeležavanja, izotopskih istraživanja vode u pećinama na nekoliko lokacija u svetu. Zona intenzivnog mešanja infiltrirane vode i podzemne vode se nalazi u prvih nekoliko metara epikarsta, tako da na dalji tok infiltracije podzemne vode do karstne izdani uticaj imaju lokalni uslovi, i jedinstveni su za svaku lokaciju. Vreme boravka vode u lebdećoj izdani epikarsta nije lako odrediti, kao ni količinu koja se tu može zadržati. U semi-aridnim oblastima može biti i nekoliko godina, dok je u vlažnim oblastima to obično nekoliko meseci do godinu dana.



Slika 4.13. – Odnos između površine sa vrtačama, osnovnog karstnog reljefa ispod i vertikalnog koeficijenta filtracije blizu podine epikarsta: a) vrtače nastale rastvaranjem krečnjaka su površinska slika centripetalne drenaže kroz epikarst; b) nivo vode ispod površine u lebdećoj izdani i smerovi kretanja vode ka drenovima; c) dreniranje kroz epikarst usmereno ka zonama sa visokim vrednostima koeficijenta filtracije – drenovi (prilagođeno prema Williams, 1985)

Makroporoznost obuhvata pukotine u tlu, kanale preostale od korenja, kanale koji su rezultat životnih procesa živog sveta i druge jasno uočljive otvore čije su dimenzije reda veličine 0,1 cm do nekoliko santimetara (Herman, 2003). Kroz veće makropore moguć je i transport krupnijih čestica i koloida u dublje delove terena, ka slobodnom nivou podzemnih voda. Pokretljivi koloidi mogu zatim ubrzati hemijski transport adsorbovanih jedinjenja kroz nezasićenu poroznu sredinu. Tokom trajanja karstnog procesa, regolit (ako postoji) i epikarst su konstantno izloženi promenama usled rastvaranja i snižavanja matične stene, koje se odigrava sporadično i u nejednakim intervalima, samim tim dolazi do pojačanog stvaranja makropora.

Složenost mešavine konsolidovanih i nekonsolidovanih materijala koji u stvari čine epikarst, usloveli su i značajne hemijske i biološke procese koji utiču na infiltriranu površinsku vodu i/ili padavine. Uticaj epikarsta na hemijski sastav podzemne vode je značajan jer prikuplja i akumulira infiltriranu vodu sa površine terena koja može sadržati određene hemijske ili biološke zagađujuće supstance, koja zatim može izuzetno brzo da se infiltrira putem privilegovanih pravaca (drenova) u epikarstu i dospe do nivoa podzemne vode u karstnoj izdani.

Dva aspekta geohemijskih svojstava vode iz zemljišta i podzemne vode (Herman, 2003) u okviru terena koji su izgrađeni od krečnjaka, mogu značajno uticati na shvatanje epikarsta:

- 1) hemijski karakter vode iz zemljišta je faktor koji pokreće interakciju voda-stena i doprinosi razvoju karstnih oblika u matičnoj steni, pa samim tim podstiče i evoluciju epikarsta,
- 2) transport hemikalija sa površine zemljišta može zagaditi podzemnu vodu u karstnoj izdani.

Iako transport zagađujućih supstanci kroz makropore i mikropore zemljišta i nižih slojeva može da postoji u bilo kojoj sredini, epikarst može da ubrza proces transporta putem cirkulacije vode naniže kroz drenove koji su direktno povezani sa karstnim kanalima.

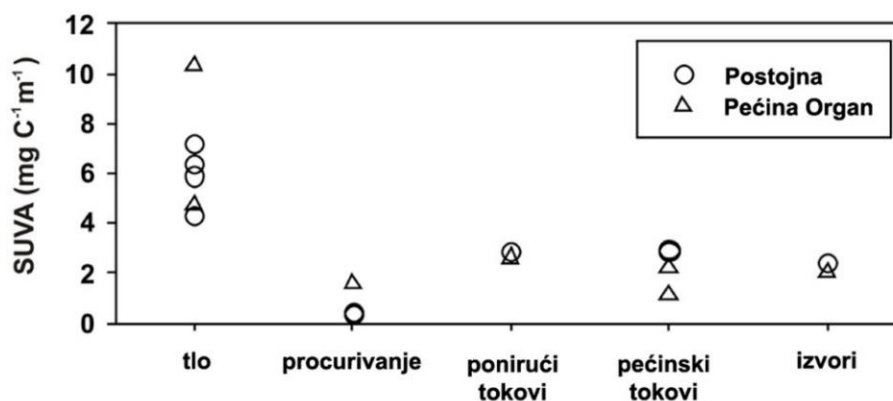
Kvalitet podzemne vode u epikarstu i lebdećoj izdani koja je tu formirana je izrazito ranjiv na kontaminante koje dospevaju na zemljište (herbicidi, đubrivo i sl.).

4.3.2. Živi svet u epikarstu

Epikarst nije značajan samo sa hidrogeološke tačke gledišta i nastanka i razvoja pećinskih kanala, epikarst predstavlja prirodnu sredinu, pa samim tim i stanište za brojne vrste koje su se adaptirale na život u podzemlju. Iako je živi svet u okviru pukotina i šupljina u podzemlju poznat već više od 100 godina, tek u poslednjih nekoliko decenija je uočeno da postoje razlike između tih staništa i onih koji postoje u epikarstu.

Organski ugljenik je posebno interesantan za proučavanje ovog aspekta epikarsta. Ustanovljeno je da fauna u pećinama i karstnim kanalima uopšte, jako zavisi od koncentracije rastvorenog organskog ugljenika (engl. *Dissolved Organic Carbon* - DOC) i da je koncentracijom DOC-a limitirana, a ne od sadržaja nutrijenata, kao što su jedinjenja azota i fosfora (Simon & Benfield, 2002; Simon et al, 2007; Pipan & Culver, 2013). Poreklo DOC u vodi epikarsta je iz tla. Kišnica ne sadrži DOC, pa se samim tim bogaćenje ugljenikom odigrava u procesu infiltracije kroz zemljište, u kome se sa druge strane odigravaju biološki procesi. Koncentracija DOC u nezasićenoj zoni u okviru Organ pećine (engl. *Organ Cave*) iznosila je 1,1 mg/l, a u Postojnskoj jami 0,7 mg/l. Razlike u koncentraciji potiču od upotrebe zemljišta tj. od vegetacije koja na njemu raste. Na površini iznad pećine Organ su pašnjaci i livade, a iznad pećine u Postojni je šumska vegetacija, tako da je koncentracija DOC u Postojni bila mnogo viša nego u pećini Organ, jer je Postojna još uvek hidrogeološki aktivna i bogata kanalima koji su ispunjeni vodom i povezani sa površinom.

Značajan je naravno i tip i kvalitet DOC u okviru epikarsta. DOC potiče od raspadanja materijala na površini ili blizu površine npr. raspadanje lišća, ili kao rezultat rada mikrobiološke zajednice i lučenja njihovih enzima. Merenjem specifičnog upijanja UV zraka (engl. *Specific UV Absorbance* - SUVA) na 254 nm, što je standardna frekvencija aromatičnih jedinjenja, ustanovljeno je da postoje značajne razlike u kvalitetu DOC unutar sistema dve pećine (Simon et al, 2010). Više vrednosti SUVA obično ukazuju na jedinjenja koja su manje reaktivna i slabije podložna metaboličkim procesima (Slika 4.14.). Zemljište, iz koga u stvari potiče najveća količina DOC, u oba slučaja ima visoke vrednosti SUVA, dok vode uzorkovane na mestima procurivanja imaju niske vrednosti SUVA. Vrednosti SUVA sugerišu da je organski ugljenik u epikarstu metabolički pristupačniji od onog u tlu, ili da sadrži manje količine aromatičnih i huminskih supstanci.



Slika 4.14. Dijagram SUVA za DOC u uzorcima iz Postojnska jame i pećine Organ (prilagođeno prema Pipan & Culver, 2013)

Proučavanje živog sveta koji nastanjuje epikarst najbolje je izvršiti na osnovu uzoraka koji se prikupljaju direktno na mestima procurivanja vode u pećinskim kanalima. Najveći broj predstavnika imaju Kopepodi (lat. *Copepoda*), a mogu se pronaći i amfipodi, ostrakode, kao i mokrice u zavisnosti od lokacije. Organizmi koji potiču iz zemljišta se, mogu naći u epikarstu i vodi koja procuruje u pećine, a pretpostavlja se da tu dospevaju ispiranjem iz šupljina ispunjenih vazduhom u kojima obitavaju.

4.3.3. Epikarst i promene prirodnih uslova

Funkcionisanje biosfere ogleda se u uzajamnoj povezanosti različitih ekosistema na principima kruženja materije i jednosmernom proticanju energije u globalnim razmerama. Osnovne elemente (C, O, H, N i dr.) organizmi ugrađuju u organska jedinjenja u svom telu. Organska materija prolazi kroz lance ishrane i na kraju se razlaže i mineralizuje. Tako se osnovni elementi vraćaju u spoljašnju sredinu, odakle ponovo mogu da se iskoriste. Ovaj put osnovnih elemenata predstavlja biogeochemijske cikluse materije na Zemlji, koji se mogu utvrditi za svaki element posebno.

Kruženje ugljenika u globalnom smislu je biogeochemijski proces u okviru kojeg ugljenik prolazi kroz biosferu, pedosferu, litosferu, hidrosferu i atmosferu. Ako to kruženje posmatramo na nivou (epi)karstnog sistema, kruženje se odvija u okviru atmosfere, vode i karbonatnih stena. Aktivni deo ugljenikovog ciklusa poboljšava kretanje drugih elemenata i poboljšava rastvaranje drugih jedinjenja.

Klimatske promene navele su veliki broj naučnika da problem prisustva CO₂ u vazduhu posmatraju i iz ugla razmene između atmosfere i karstnih sistema. Samim tim je i sadržaj ugljenika i ugljen dioksida koji se nalazi u zemljištu i epikarstu došao u sferu interesovanja. Procenjeno je da godišnja apsorpcija CO₂ od strane karstnih sistema iznosi i do 6,08 x 10⁸ t (Jiang *et al*, 2013), što može da predstavlja deo „nedostajućeg ugljenika“ (engl. *missing carbon sink*). Iako ova količina nije značajna u poređenju sa količinama ugljenika koje učestvuju u globalnom ciklusu, značajna je zato što utiče na oko 22 miliona km² Zemljine površine izgrađenih od karbonatnih stena.

Značaj ugljen-dioksida ogleda se u njegovoj reaktivnosti i mogućnostima da ubrza fizičke, hemijske i biološke procese u epikarstu, samim tim vrši uticaj na ekosistem i živi svet u oblastima gde preovladava karstni tip reljefa.

Promene količine vode u tlu i erozija tla su najčešći direktan uzrok degradacije i razaranja epikarsta. Epikarst ispoljava veliku osetljivost na uticaj vremenskih prilika, pre svega temperaturne promene. Velike površine krečnjačkih masiva, na kojima je bio razvijen epikarst, su tokom poslednjeg ledenog doba ostale bez ovog sloja usled promena izazvanih naglim zamrzavanjem i otapanjem vode koja je bila akumulirana u epikarstnoj izdani. Na skoro celoj površini Severne Amerike i Evrope došlo je, u određenoj meri, do uništavanja epikarsta usled glacijacije, a dokaze možemo naći u podnožju krečnjačkih masiva gde su formirane debele naslage krečnjačkih breča. Sličan proces se i danas odvija u široj oblasti Mediterana, gde olujne padavine praćene poplavama spiraju i odnose usitnjeni materijal sa padina. Erozija je ograničena na strme padine, dok se akumuliranje materijala odvija na mestima gde slabi kinetička energija povremenih tokova.

Velika osetljivost epikarsta se najbolje vidi prilikom promene bilo kog člana osetljive prirodne ravnoteže usled delovanja čoveka. Krčenje šuma u oblasti Mediterana i jugoistočne Azije direktno utiče na degradiranje i razaranja epikarsta (Kranjc, 2012; Jiang et al, 2014; Zhang et al, 2016). Protokom vremena ove veštačke promene prirodnih uslova dovode do ogoličavanja (dezertifikacije – engl. *rocky desertification*) velikih površina terena i nastanka oblasti nepodobnih za održavanje života. Čak i kada je sloj zemljišta iznad epikarsta veoma debeo stalno spiranje čestica zemljišta kišnicom ili povremenim površinskim tokovima, koje više nije zaštićeno vegetacijom, na kraju će dovesti do otkrivanja epikarsta. Sve gore navedene promene na kraju će dovesti do razvitka škrapa, pa i škrapara, glavnih predstavnika „ljutog“ karsta. Na površini se mogu uočiti još i povremene vertikalne pukotine koje svu površinsku vodu i kišnicu direktno sa površine sprovode do karstne izdani, pa time ovi tereni postaju još manje pristupačni za živi svet. Ovaj proces je naravno moguće preokrenuti u smeru nastanka novog sloja epikarsta, ali je za to potrebno nekoliko stotina, pa i hiljada godina i postojani umereni klimatski uslovi (Kranjc, 2012).

Otvaranje kamenoloma za eksploataciju materijala za izgradnju saobraćajnica ili građevinsku industriju, u krečnjačkim terenima, takođe, dovode do direktnog ugrožavanja epikarsta. Često se ovaj sloj uklanja i zbog toga što je sa geotehničke tačke gledišta jako nestabilan i može da ugrozi građevine ili saobraćajnice locirane na tom terenu. Savremena poljoprivredna proizvodnja, hemijska industrija, ali i komunalne vode vrše jak negativan uticaj na biohemijsku ravnotežu koja postoji u epikarstu, koji u ovom slučaju predstavlja svojevrsan filter.

Efikasan menadžment antropogenog uticaja na prirodnu sredinu zahteva mnogo bolje poznavanje hidrogeoloških procesa koji se u sredini odvijaju, a samim tim i u epikarstu. Na taj način povećavamo šanse da predvidimo npr. širenje „šljive“ zagađenja nastalog usled nekog akcidenta.

Značaj epikarsta kod procene ranjivosti podzemnih vodnih resursa najbolje se ogleda u nastanku i razviću metoda za izradu karata zaštite karstnih izvorišta tj. određivanju zona sanitarne zaštite. Razvoj metodike je zasnovan na određivanju ranjivosti izdani na spoljašnje uticaje, gde sloj epikarsta ima određenu ulogu, dodeljuje mu se određeni težinski koeficijent prilikom „izračunavanja“ uticaja, ukoliko se pokaže da postoji na terenu koji se istražuje.

Prirodno prečišćavanje voda (samoprečišćavanje) je proces koji dovodi do umanjenja sadržaja zagađujućih supstanci u vodi. 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). Proces samoprečišćavanja vode se završava kada kvalitet podzemne vode, manje ili više, bude kao „nulti“ kvalitet podzemne vode, tj. onaj pre uticaja zagađujućih supstanci. Specifičnost nastanka

i razvoja karstne izdani kao i sveprisutna heterogenost i anizotropija poroznosti uz uslove koji u karstnoj izdani vladaju (favorizovani pravci i relativno velike brzine kretanja podzemne vode) predstavljaju poseban problem prilikom određivanja stepena samoprečišćavanja podzemne vode. Takođe, on je u izdanima u velikoj meri uslovljen dimenzijama pora u stenskoj masi, a u slučaju karstne izdani imamo kaverne i kanale od milimetarskih do (deci)metarskih dimenzija. Samoprečišćavanje se često odvija pod uticajem (mikro)organizama koji razlažu organske komponente. Procesu pod dejstvom mikroorganizama se dele na aerobne i anaerobne (Grozdanović- Radovanović, 2000; Lalošević, 2011). Aerobni procesi, obično, kao krajnje proizvode daju neškodljive supstance, dok anaerobni dovode do građenja i škodljivih jedinjenja (H_2S , CH_4 i dr.). Najvažniji činioci u prečišćavanju podzemne vode jesu aerobne bakterije, koje razgrađuju organske komponente uz potrošnju kiseonika.

Prirodni procesi popravke kvaliteta vode i prečišćavanja kontaminanta počinju da se odigravaju na površini terena i u okviru zemljišnog sloja, kada je prisutan. U zemljištu se prožimaju uticaji litosfere, atmosfere, hidrosfere i biosfere. Zemljište je kompleksna smesa neorganskog i organskog materijala u čijim se porama i šupljinama nalaze i vazduh i voda (Veselinović *et al*, 2005). Takođe, ono je životna sredina i rezervoar aerobnih mikroorganizama, koji vrše prvi stupanj izmene materija koje voda nosi sa sobom. Voda se može obogatiti gasovima koji su prisutni u tlu. Povećanje sadržaja kiseonika će pospešiti razgradnju kontaminanta organskog porekla usled povećane oksidabilnosti, ali takođe, može se uvećati i sadržaj ugljen-dioksida što će pospešiti koroziju krečnjačkih stena.

Samoprečišćavajuća sposobnost (epi)karstne izdani zavisi prvenstveno od veličine pukotina/kaverni/kanala i njihove zapunjenosti, pa i od vrste ispune, ali i od vrste cirkulacije vode koja je zastupljena u okviru dela izdani koji se posmatra. S obzirom na brži režim tečenja vode u otvorenim gravitacionim delovima sistema (zona tankog ili nedostajućeg epikarsta), voda se obično nedovoljno pročisti, što je posledica kratkog vremena zadržavanja, međutim ukoliko se voda filtrira kroz delimično zapunjene kaverne, može doći, u određenom stepenu, do apsorpcije zagađujućih supstanci. Naravno, nakon nailaska novih količina vode dolazi do ispiranja (desorpcije) supstanci, pa kontaminant ipak može dospeti do nivoa karstne izdani.

Transport zagađujućih supstanci kroz makropore i mikropore zemljišta postoji u bilo kojoj sredini, a epikarst može da dodatno ubrza filtraciju kontaminirane vode naniže kroz tzv. drenove, koji su direktno povezani sa karstnim kanalima. Ubrzana filtracija vode postojećim pravcima kretanja, osim fizičkog dejstva na sredinu, svojim korozivnim dejstvom uzrokuje proširivanje prslina i pukotina u kaverne i kanale usled rastvaranja kalcita od kojeg je izgrađen krečnjak. Kroz te proširene prostore voda brže cirkuliše i može da osim rastvorenog kontaminanta prenese i zagađujuće supstance adsorbovane na česticama. Dispergovanje supstanci u okviru epikarsta i kasnije ispiranje usled olujnih kiša može uticati na dospevanje kontaminanta mnogo dalje od mesta prvobitnog ekscesa, ali i mnogo kasnije od momenta kontaminiranja. Sve ovo utiče na jako sporu biodegradaciju zagađujućih supstanci.

4.4. Ciklus kruženja ugljenika i ugljen-dioksida u (epi)karstu

Kruženje ugljenika i CO_2 u karstnom sistemu, a samim tim i u epikarstu tiče se pre svega razmene atmosferskog ugljen-dioksida sa zemljištem, vodom i karbonatnim stenama koja biva pokrenuta dinamičnom interakcijom trofaznog CO_2 : vazduh-voda-karbonatna stena.

Rastvorljivost kalcita i dolomita u čistoj, nejonizovanoj vodi je samo 14mg/l , na temperaturi od 25°C (Ford & Williams, 2007), što je malo više od rastvorljivosti kvarca. Istraživanja sprovedena

u svrhu otkrivanja uzroka pojačane rastvorljivosti karbonatnih stena u prirodi, ukazala su na izuzetnu ulogu koju u tom procesu ima ugljen-dioksid. Njegovom reakcijom sa vodom nastaje ugljena kiselina, koja lako disosuje, oslobađajući H^+ , a druge kiseline iz vode mogu da obezbede još vodonikovih jona. Njegova rastvorljivost u vodi je direktno zavisna od njegovog parcijalnog pritiska (Henrijev zakon⁴) i obrnuto proporcionalna temperaturi. Rastvorljivost CO_2 u vodi može se primenom Henrijevog zakona (formula 4.2.) napisati kao:

$$CO_2 (aq) = C_{ab} \cdot P_{CO_2} \cdot 1,963 \quad (4.2.)$$

gde su:

CO_2 izražen u g/l,

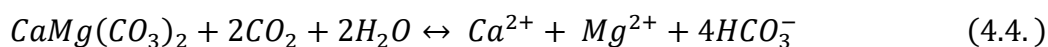
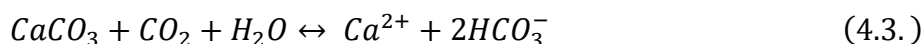
P_{CO_2} je parcijalni pritisak CO_2 ,

1,963 je masa 1l CO_2 , pri pritisku od 1bar i temperaturi od 20 °C, i

C_{ab} je koeficijent apsorpcije koji zavisi od temperature

Parcijalni pritisak CO_2 se ne menja mnogo u zavisnosti od nadmorske visine (Ford & Williams, 2007), a može biti samo donekle smanjen u šumama (usled asimilacije) i na prostranstvima pod svežim snegom. Povećanje P_{CO_2} može biti veoma značajno i znatno u vazduhu u okviru zemljišta. Ovo povećanje posledica je oslobađanja organskih jedinjenja u okviru zone korena biljaka.

Hemijske reakcije razlaganja karbonatnih stena koje sadrže kalcit (formula 4.3.) ili dolomit (formula 4.4.) su dinamične i povratne:



Ravnoteža hemijskih reakcija se uspostavlja jako brzo u okviru određenih prirodnih uslova, a ono što uzrokuje dalje taloženje/rastvaranje je stalna promena uslova usled promene parametara: koncentracije CO_2 iz vazduha i zemljišta, rastvaračke „moći“ vode i pH vode, temperature vazduha i vode, sastava karbonatne stene itd.

Oslobađanje CO_2 iz vode izaziva taloženje karbonatnih minerala (kalcita, dolomita ...) obično na mestima „oslobađanja“ pritiska, gde podzemna voda napušta relativno zatvorenu i stabilnu sredinu i ulazi u poluotvorenu ili otvorenu sredinu – pećinske dvorane i kanali (pećinski nakit) ili pak izvori (naslage bigra). Nove padavine sa rastvorenim ugljen-dioksidom iz vazduha ulaze u sistem i proces se ponavlja, sve dok postoji karbonatna stena.

Merenja koncentracije ugljen-dioksida u pukotinama pećinskih zidova i analize hemijskog sastava prokapne vode sa tavanice pećine Mendip Hilsa, dovela su do zaključka da u nezasićenoj zoni mora postojati neki izvor CO_2 (Attkinson, 1977). Parcijalni pritisak CO_2 se povećavao sa dubinom, tako da su vrednosti izmerene na „dnu“ pećine bile iste sa onima na izvorima u oblasti istraživanja. Povećanje koncentracije ugljen-dioksida je izazvala isprana organska materija iz zemljišta, koja se na putu naniže dodatno raspadala i oslobađala gas. Koliko intenzivan proces rastvaranja karbonatnih stena može biti pokazali su *Kogovšek & Habič* (1980; preuzeto iz Bonacci, 1987) eksperimentom sprovedenim u Planinskoj pećini (Planinska Jama, Slovenija). Rezultatima istraživanja je utvrđeno da 42 m³ vode može da rastvori oko 7 kg karbonatne stene

⁴ Količina gasa koja se rastvara u nekoj tečnosti je direktno proporcionalna parcijalnom pritisku tog gasa, na zadatoj temperaturi. Drugim rečima, sa povećanjem pritiska povećava se i mogućnost tečnosti da rastvori neki gas, dok se sa povećanjem temperature taj kapacitet smanjuje.

(uglavnom krečnjak) tokom 17 h i da ga prenese u jamu zajedno sa još 6 kg suspendovanog materijala. Ovakvi procesi u „trenutku“ menjaju izgled površine karstnog terena.

Na ciklus kruženja ugljenika, a samim tim i ugljen-dioksida, utiču sledeći faktori :

- biljni i zemljišni pokrivač,
- pritisak CO₂ u tlu,
- temperatura vode,
- padavine, evapo(transpi)racija, atmosferski pritisak,
- hidrodinamički uslovi sistema.

Biljke preko korenovog sistema u zemljište „upumpaju“ oko 40% CO₂ koji prerade u svojim životnim procesima, a koji preuzmu iz atmosfere (Drake, 1984). Sa druge strane ugljen-dioksid nastaje i u životnim procesima faune koja živi u tlu, mikrofaune i mikroflora (bakterije, gljive, aktinomicete). „Proizvodnja“ ugljen-dioksida se uvećava sa povećanjem temperature i vlažnosti.

Molekularna vlažnost (poljski kapacitet) zemljišta, takođe, može uticati na količinu CO₂ koja će nastati. Najveća količina će nastati ukoliko je poljski kapacitet u intervalu od 50-80%, ali takođe, ugljen-dioksid može nastajati i ako molekularna vlažnost padne na 5%.

Sve ovo ukazuje na velike razlike u „proizvodnji“ CO₂ u zemljištu, i da u stvari dolazi do konstantnih promena količine gasa zavisno od:

- tipa zemljišta,
- teksture i horizonta tla,
- dubine koja se posmatra,
- dreniranju (infiltriranju) vode i izloženosti površinskim uslovima,
- sastavu flore i faune tla, i
- promena godišnjih doba.

U umerenim klimatskim pojasevima uobičajeni parcijalni pritisak CO₂ će biti u intervalu od 0,1% do 6,0%, međutim zabeleženi su i slučajevi sa vrednostima parcijalnog pritiska $P_{CO_2}=10\%$ (Smith & Atkinson, 1976).

Debeli zemljišni pokrivač i bogata vegetacija na površini pogoduju povećanju koncentracije ugljen-dioksida i povećanju njegovog pritiska u zemljištu. Proces kruženja ugljenika u zemljištu je značajan za proces karstifikacije (Jiang, 2013), međutim proces je veoma kompleksan zbog ograničenja koje zemljište i vlaga u zemljištu nameću. Istraživanje je pokazalo, na osnovu izotopskih analiza stabilnog ugljenika, da je CO₂ u epikarstu uglavnom poreklom iz zemljišta i da ciklus kruženja ugljenika u epikarstu pojačava hemijske i biološke procese u sistemu. U okviru zone epikarsta se odvija hidratacija ugljen-dioksida u okviru lebdeće izdani tj. prelazak u HCO₃⁻ jone i vrši se pojačano rastvaranje ostataka matične stene i voda se obogaćuje i jonima kalcijuma (Perrin et al, 2003a, 2003b). Na osnovu tih procesa i dubine njihovog dopiranja, može se izvući linija ekvilibrijuma koncentracija Ca²⁺, HCO₃⁻ i temperature infiltrirane vode.

Usled postojanja direktne i otvorene veze epikarsta sa atmosferom razmena ugljenika između ove dve sredine je dinamična. To se najbolje vidi u oblastima gde ne postoji zemljište. Najčešće je matična, karstifikovana stena ogoljena ili prekrivena samo tankom pokoricom, koja se sastoji od lišajeva, algi ili ostataka viših biljaka. Zemljište može biti odsutno iz više razloga: još nije nastalo, ili je preteranom poljoprivrednom (ratarstvo i stočarstvo) upotrebom uništeno (čest slučaj u Mediteranskim zemljama, ali i u jugozapadnoj Kini), a može biti i odneto radom lednika tokom poslednje glacijacije. Tada do izražaja dolazi postojanje epikarsta ili sistema pukotina

(ispucalost) u tim oblastima, jer sada u toj zoni uz ostatke tla (regolit) i korenovog sistema biljaka koje uspevaju u tim „surovim“ uslovima nastaju uslovi za život biljaka, ali i drugog živog sveta koji tu obitava, i njihove procese, čiji će rezultat na kraju biti veća količina CO₂.

Određena istraživanja koncentracije ugljen-dioksida u pećinama su bila sprovedena i ukazala na to da količina može biti i 2-20 puta veća nego na površini, a čak su zabeležene i vrednosti od 6% (Renault, 1982; Ek & Gewalt, 1985). Pećinski tokovi, u pećinama koje su još uvek hidrogeološki aktivne, mogu da u sebe prime CO₂ i povećaju svoju korozivnost.

Količina ugljenika koja uđe u sistem može biti uvećana na mestima isticanja vode iz karstne izdani usled procesa koji se odigravaju u karstnom sistemu (Shiyi et al, 2000). Ukupna izlazna vrednost ugljenika na izvorima je samo 15% ukupnog izlaza iz sistema i prenos ugljenika u sistemu je izuzetno blisko povezan sa procesima „disanja“ zemljišta i raspadanja organske materije u tlu. Najviše vrednosti CO₂ u tlu su zabeležene u letnjem periodu, a najniže u zimu.

Zahvaljujući razlikama u vegetacionom pokrivaču i različitom sastavu zemljišta, postoje i razlike u ciklusu kruženja ugljenika, pa samim tim i stepenu karstifikacije. Stepenu karstifikacije se veoma razlikuje na terenima pokrivenim šumom, čak zavisi i od vrste šume, od onog na ogoljenim planinskim predelima (Linhua & Fuyuan, 2003; Benavente et al, 2010; Faimon et al, 2012; Jiang, 2013; Blecha & Faimon, 2014).

Evolucija epikarsta može se posmatrati kao razvoj površinskog dela karstnog sistema: lito-karst→bio-karst→pedo-karst→eko-karst, pa povećanje biomase i nastanak novog zemljišta utiče na stvaranje karstnog ekosistema, koji je biološki aktivan usled delovanja mikroorganizama i karbonatne anhidrataze (KA)⁵ (Li et al, 2005; Lian et al, 2011). Uloga mikroorganizama u karstifikaciji je nezamenljiva, uzevši u obzir da se fiksacija CO₂ u mikrobiološkim uslovima obavlja bez prestanka, i da se i pored toga što u svojim životnim procesima mikroorganizmi i oslobađaju ugljen-dioksid, veliki deo ugljenika biva vezan i istaložen u zemljište i/ili u dublje slojeve.

Kišnica u prirodnim uslovima predstavlja glavni izvor jona sulfata, hlorida, nitrata, natrijuma, (Perrin, 2003). Ukoliko se u ovaj proces umeša čovek, onda poljoprivredna proizvodnja tj. primena meliorativnih sredstava (đubriva, pesticida i sl.) može da promeni odnos jona u zemljištu i izvrši obogaćivanje određenim supstancama. Takođe, prve količine ugljen-dioksida koje dospevaju do karbonatnih stena nalaze se u kišnici, koja na svom putu ka tlu rastvara, u većoj ili manjoj meri, CO₂ iz vazduha.

Maksimalni doprinos kišnice istekloj vodi primetan je tek nakon 18-24 h, nakon maksimalno postignutog proticaja i da je taj doprinos maksimalno 20 do 25%, tokom celog posmatranog perioda (Lakey & Krothe, 1996). Voda koja je istekla na izvoru oslobođena je iz zone zasićenja i zone aeracije, na početku naleta infiltrirane vode od strane olujnih kiša, dok je voda koja je bila akumulirana u tlu i epikarstu mogla dospeti do tačke isticanja tokom početnog dela recesionog perioda.

Površina ogoljenog krečnjaka se pod uticajem kišnice jako brzo rastvara, neka istraživanja su pokazala da koncentracija HCO₃⁻ u vodi, nakon izlučivanja kišnice koja ima 20 mg/l, iznosi oko 40 mg/l nakon samo 1 časa (Jiang, 2013). Sa druge strane postoji i sporiji vid obogaćivanja vode ugljen-dioksidom tj. HCO₃⁻ jonima, a koji se odvija za vreme infiltracije i filtracije vode u zemljištu. Kao što je već rečeno dobri hidrodinamički uslovi mogu da poboljšaju rastvaranje

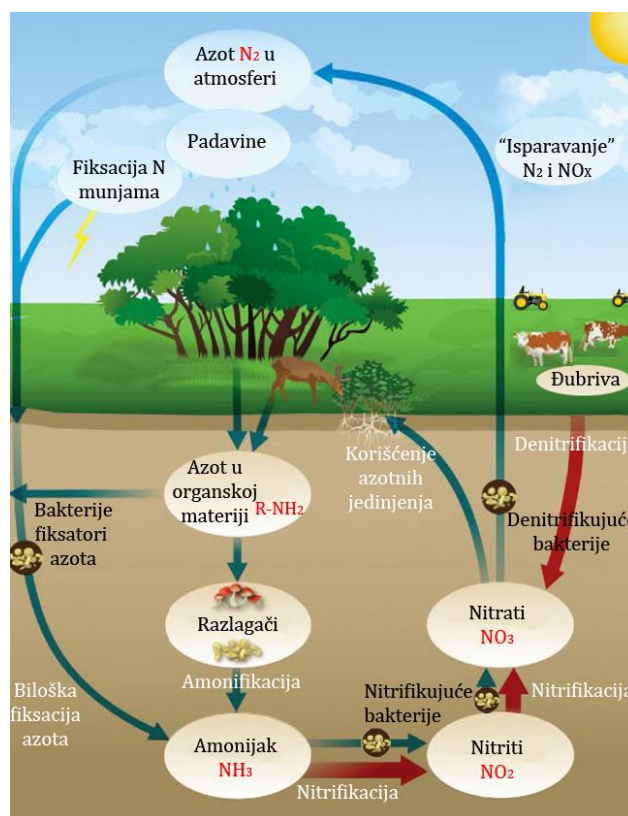
⁵ Karbonatna (anhidrataza) dehidrataza (karbonat hidro-lijaza) je enzim sa sistematskim imenom karbonat hidro-lijaza. Ovaj enzim katalizuje hemijsku reakciju: $H_2CO_3 \leftrightarrow CO_2 + H_2O$

ugljenika iz zemljišta, potpovršinski tok rastvara ugljenik na svom putu ka podzemlju i odnosi ga u vidu agresivne ugljene kiseline tj. HCO_3^- jona. Na kraju koncentracija HCO_3^- se može uvećati i 4 puta u odnosu na koncentraciju u vodi na površini stene.

Sistem karstne izdani je prepoznat kao mesto fiksacije ugljenika iz atmosfere u vidu gasovitog ugljen-dioksida i prevođenja u tečnu fazu kao HCO_3^- (Jiang et al, 2013). CO_2 se može iz sistema osloboditi u slučaju promene pritiska, temperature ili hemijskih uslova sistema, o čemu je već bilo reči. U tom slučaju dolazi do taloženja karbonata (kalcita ili aragonita ili dolomita i sl.) iz vode, ova pojava je razlog postojanja pećinskih ukrasa. Ulogu u taloženju mogu imati i biljke u blizini izvora, koje svojim radom i izdvajanjem ugljen-dioksida iz vode vrše obaranje karbonata, tako nastaje bigar, često prisutan u debelim slojevima u blizini karstnih izvora, vodopada itd.

4.5. Ciklus kruženja azota u (epi)karstu

U biosferi azot je akumuliran u dva osnovna rezervoara (Slika 4.15.). Veliki rezervoar azota nalazi se u atmosferi gde je azot zastupljen sa 78%. Drugi izvor azota predstavlja zemljište u kome se on nalazi u obliku neorganskih jedinjenja (nitrati – NO_3^- , nitriti – NO_2^- i amonijumove soli – NH_4^+) i u obliku organskih jedinjenja (R-NH_2 - urea, aminokiseline i dr.) koja nastaju degradacijom ostataka biljaka i životinja ili se nalazi u njihovim izlučevinama.



Slika 4.15. Kruženje azota u prirodi (prilagođeno prema:

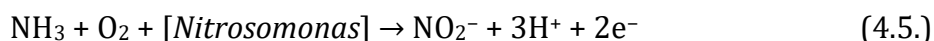
<http://mrsbioblog.blogspot.rs/2014/02/chapter-43-cycling-of-matter.html>)

Atmosferski azot je vrlo inertan i može se aktivirati samo pod uslovima visokog pritiska i temperature, što se dešava prilikom električnih pražnjenja u atmosferi. Pri sevanju munja dolazi do reakcije između azota i kiseonika u atmosferi, tzv. abiotska fiksacija azota usled električnih pražnjenja. Nastaju oksidi azota - NO_x , koji se rastvaraju u kišnim kapima i dospevaju na zemljište u obliku veoma razblažene azotne kiseline, pri čemu u tlu dolazi do stvaranja nitrata koje biljke dalje mogu da koriste. Svojevremeno poseduju i neki

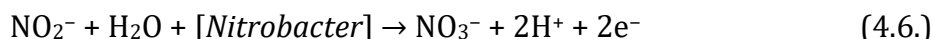
mikroorganizmi. Biološka fiksacija azota odvija se uz posredovanje bakterija roda *Azotobacter* koje žive slobodno u tlu, ali i uz delovanje simbiotskih bakterija npr. rod *Rhizobium*. Treći oblik fiksacije azota je veštačka fiksacija koja se ostvaruje u fabrikama azotnih đubriva Harper-Bošovićim postupkom, koji imitira proces koji se odigrava pri električnom pražnjenju u vazduhu: visok pritisak i temperatura od 600°C.

Amonifikacija podrazumeva proces preobražaja organskog azota u neorganski oblik, tj. do amonijaka. Amonifikacija (mineralizacija) je egzotermni proces razgradnje ostataka uginulih biljaka i životinja ili životinjskog izmeta, koji se odigrava pod uticajem razlagača: heterotrofnih bakterija rod *Aktinomycece* i nekih gljiva. Amonijak u podlozi može biti preveden u nitrata i nitrite ili direktno apsorbovan korenovim sistemom biljaka i ponovo uključen u složena azotna jedinjenja iz kojih je nastao.

Nitrifikacija predstavlja proces (formula 4.5.) transformacije redukovano neorganskog oblika azota (amonijaka) u oksidativne oblike (nitrite i nitrata). U prvoj fazi amonijak se pretvara u nitritni kompleks. Energija oslobođena u ovom procesu predstavlja energetski izvor za život nitrifikatora bakterija *Nitrosomonas*:



Druga faza predstavlja dalju oksidaciju nitrita do nitrata (formula 4.6.), ova faza je jako značajna, jer su nagomilani nitriti otrovni za biljni svet. Energija oslobođena u ovim procesima predstavlja energetski izvor za život nitrifikatora bakterija *Nitrobacter*.



Nitrati i nitriti mogu biti podvrgnuti procesu *denitrifikacije* u pravcu formiranja molekularnog i gasovitog azota – N₂ koji dospeva u atmosferu, čime se završava kruženje azota. U ovom procesu učestvuju bakterije tipa *Pseudomonas* i *Clostridium*, kao i gljive koje koriste azot kao izvor kiseonika u anaerobnim uslovima.

Zbog velike rastvorljivosti nitrata, a i nemogućnosti zemljišta da zadrži anjone, oni lako dospevaju do podzemnih voda. Visok nivo nitrata loše utiče na kvalitet podzemne vode za piće, jer nitrati utiču na nivo kiseonika u krvi: methemoglobinemija (sindrom plavih beba). Ukoliko podzemne vode sa visokom koncentracijom nitrata dospeju u površinske vode može doći do eutrofikacije tj „cvetanja vode“ (npr. Paličko jezero), uvećanje populacije algi.

Usled postojanja direktne i otvorene veze epikarsta sa atmosferom razmena azota i njegovih jedinjenja između ove dve sredine je dinamična, slično razmeni ugljenika. Postojanje poroznog prostora, koji je ispunjen smešom vazduha i vode, obogaćen organskim materijama koje dospevaju sa površine terena, pruža odlične uslove za odvijanje procesa amonifikacije, nitrifikacije i denitrifikacije. Transport zagađujućih supstanci npr. nitrita/nitrata kroz makropore i mikropore zemljišta i nižih slojeva može da postoji u bilo kojoj sredini, međutim epikarst može i da ubrza proces transporta kontaminanta. Kvalitet podzemne vode u lebdećoj epikarstnoj izdani je izrazito ranjiv na kontaminante koje dospevaju na zemljište (stajsko ili veštačko đubrivo, herbicidi).

II KONCEPCIJA I METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

5. Konceptija i metodologija istraživanja

Kako bi se svi aspekti i osobine karstne izdani što preciznije definisali potrebno je primeniti multidisciplinarna istraživanja: geološka, hemijska, hidrometeorološka, eksperimentalno modeliranje i druga, uz neophodnu analizu prirodnih uslova, koji su doveli do formiranja hemijskog sastava podzemnih voda (Stevanović & Papić, 2008).

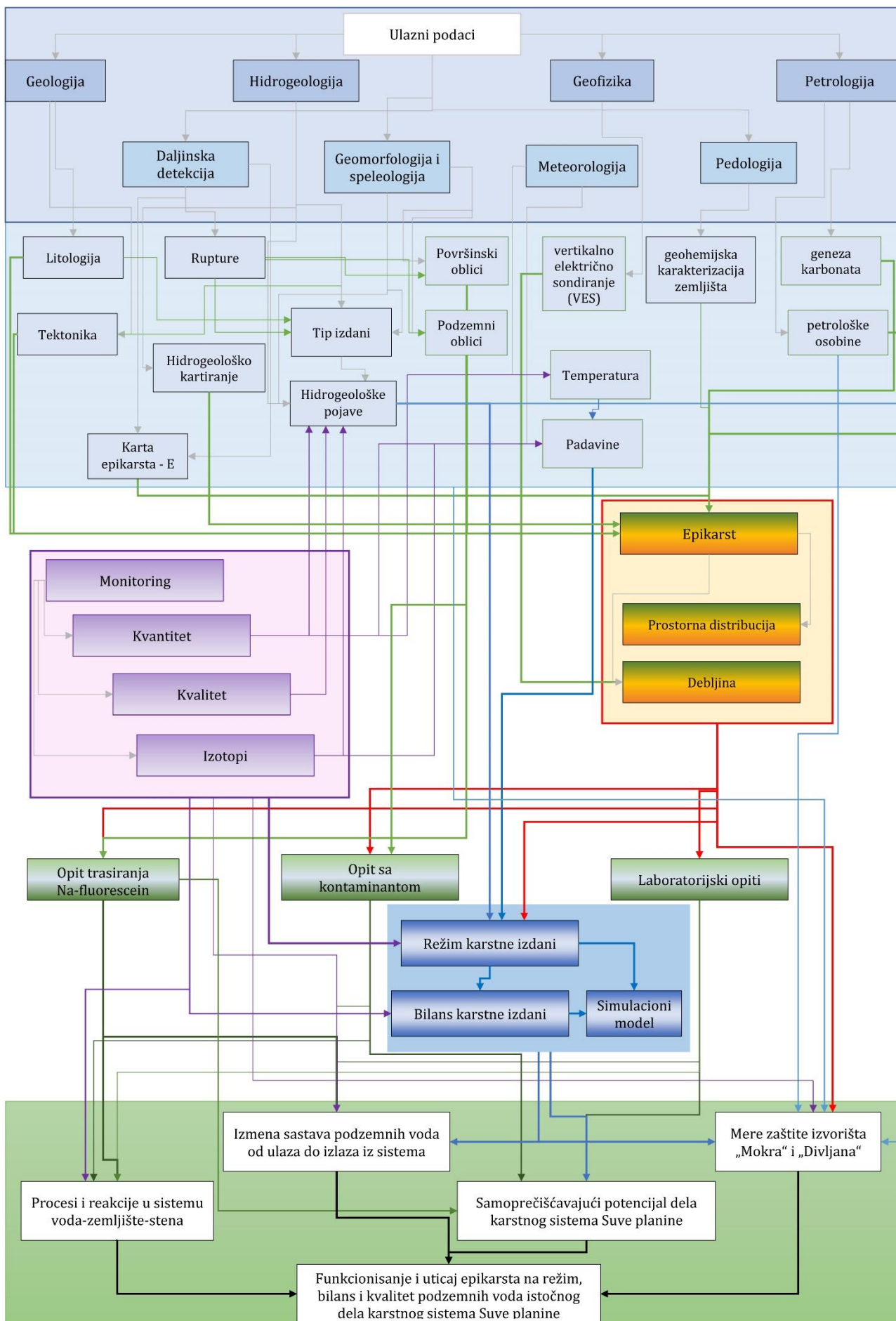
Glavni zadaci sprovedenih istraživanja bili su:

- definisanje uticaja epikarsta na funkcionisanje karstne izdani u pogledu režima kvantiteta i kvaliteta vode;
- određivanje sposobnosti epikarsta da prečisti podzemne vode;

Posebni zadaci koji su izvedeni iz osnovnih zadataka odnosili su se na:

- utvrđivanje prisustva, prostornog rasporeda i debljine epikarsta,
- definisanje veze između površinskih (atmosferskih) i podzemnih voda;
- definisanje oblasti prihranjivanja vrela: Mokra, Divljana, Bežište, Gornja Koritnica, kao i Rakoš česme,
- definisanje uloge epikarsta u procesu filtracije vode od zone prihranjivanja do mesta isticanja,
- određivanje vremena zadržavanja vode u podzemlju tj. brzine izdanskog toka, naročito vremena zadržavanja vode u epikarstu,
- određivanje uticaja epikarsta na količine podzemne vode i njihov bilans i režim;
- određivanje izmene kvaliteta infiltrirane vode koja se dešava u epikarstu,
- definisanje uticaja epikarsta na proces samoprečišćavanja i brzinu procesa u zavisnosti od kontaminanta
- određivanje promena mikrobiološkog sastava u sistemu: zemljište, epikarst, podzemne vode;
- definisanje parametara prirodne sredine i njihovo modeliranje u prikazu epikarsta u fizičkom laboratorijskom modelu.

Kako bi se navedene karakteristike i procesi sagledali na pravi način, primenjen je multidisciplinarni pristup, uz primenu geoloških i negeoloških metoda kroz: kabinetska, terenska i laboratorijska istraživanja (Slika 5.1.). Početak istraživanja je protekao u prikupljanju i obradi literaturnih podataka, kao i informacija sa internet portala, koje su se koristile prilikom: daljinske detekcije (satelitski snimci, karta *CORINE Land Cover - CLC...*), strukturno-geološke analize rupturnog sklopa, izrade karte epikarsta i sl. Tom prilikom definisane su zone od interesa za dalja detaljna terenska istraživanja tj. definisano je područje kojem je posvećena veća pažnja i u okviru kojeg je obavljena terenska prospekcija.



Slika 5.1. Koncept istraživanja funkcionisanja i uticaja epikarsta na istočnim padinama Suve planine

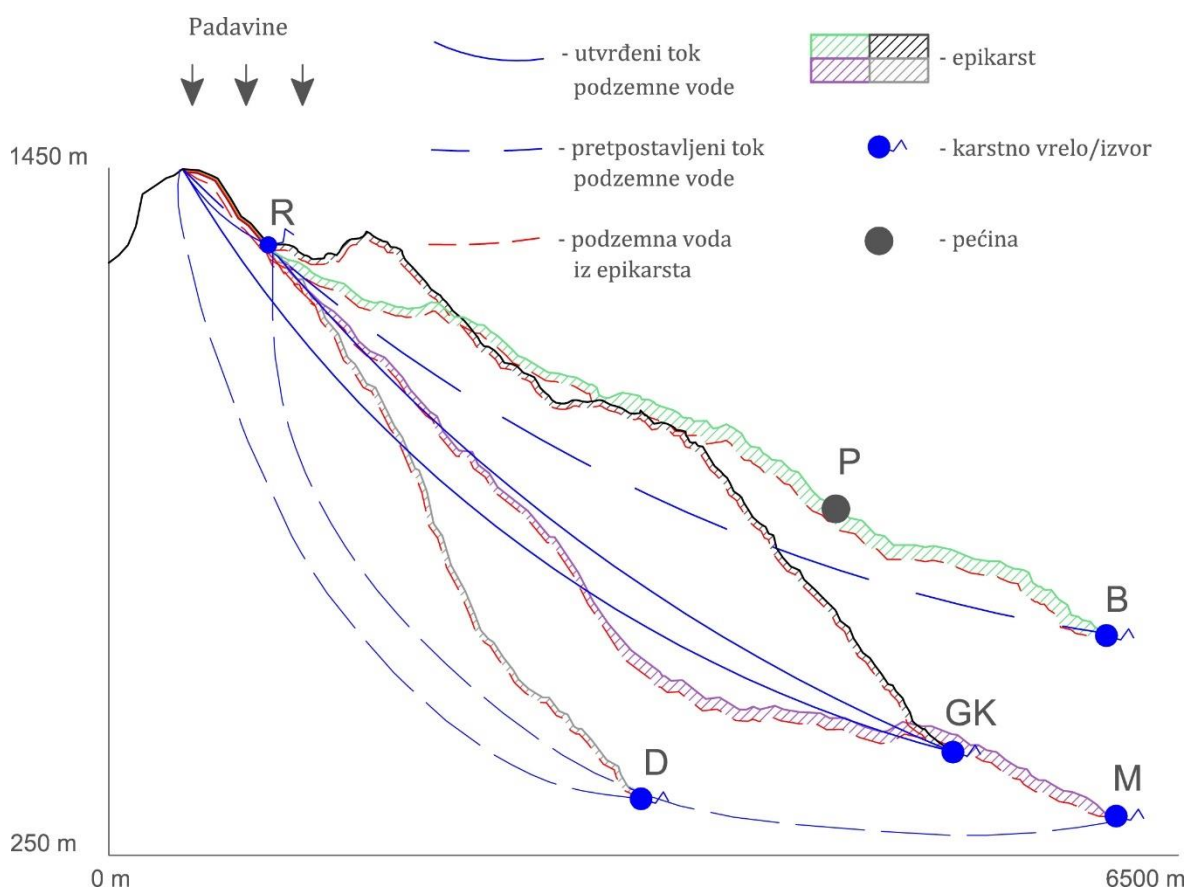
Geološki faktori su od osnovnog značaja kod proučavanja funkcionisanja jedne izdani, stoga istraživanje mora sadržati i analizu opštih geoloških zakonitosti terena uz korišćenje geoloških metoda (Filipović, 1980; Komatina 1984; Goldscheider & Drew 2007; Stevanović & Milanović, 2017): metode daljinske detekcije, strukturno-geološke metode, petrološke metode, geomorfološke, geofizičke, hidrogeološke, hidrogeohemijske, i sl.

Metode razvijene u okviru drugih nauka, koje spadaju u grupu negeoloških metoda: hidrološke, hidrometeorološke, pedološke, hemijske, izotopske, mikrobiološke i sl. korišćene su za dobijanje određenih ulaznih podataka, i za proučavanje procesa koji u suštini nisu geološki.

Kompleksna istraživanja su obezbedila potrebne podloge i dovela do znatnog broja podataka na osnovu kojih se sagledao sistem, izvršila analiza procesa koji se odvijaju u sistemu i izveli zaključci o funkcionisanju epikarsta u okviru karstnog izdanskog sistema (Slika 5.2.).

Premisa je da se cirkulacija podzemne vode na istočnim padinama Suve planine, u okviru uže zone istraživanja odvija od momenta infiltriranja kroz sloj zemljišta i epikarsta, do karstne izdani, a onda ka svim izvorima i vrelima: Rakoš česma-R, Bežište-B, Gornja Koritnica-GK, Divljana-D, Mokra-M, kao i prema podzemnim karstnim objektima (pećina Peč-P).

Cirkulacija se odvija i od mesta poniranja kratkog površinskog toka Rakoša, kroz epikarst i karstnu izdan ka izvorima i vrelima u podnožju, kao i prema podzemnim kanalima (pećinama i jamama). Od podzemnih kanala nakon procurivanja i proceđivanja, podzemna voda nastavlja cirkulaciju ka karstnim vrelima i izvorima, koja su hipsometrijski niže npr. od pećine Peč ka vrelu Bežište.



Slika 5.2. Konceptualni model cirkulacije vode u okviru dela Suve planine koji je obuhvaćen istraživanjima: R – Rakoš česma, P – pećina Peč, B – vrelo Bežište, GK – Gornjekoritnička vrela, D – vrelo Divljana, M – vrelo Mokra;

5.1. Geološke metode

5.1.1. Metode daljinska detekcije i strukturno-geološke metode

Primena daljinske detekcije (satelitski snimci) i strukturno geološke metode u kombinaciji sa analizom tektonskih odlika terena preuzetih sa OGK SFRJ, list Bela Palanka (Vujsić et al, 1971) poslužile su u definisanju prisustva ruptura, koje u karstnoj izdani usmeravaju kretanje podzemnih voda ka izvorima i vrelima, a zatim i kao priprema podloga za terenska istraživanja epikarsta. Izvršena je interpretacija Landsat 8 snimaka izrađenog kombinacijom kanala 5, 6, i 7 (Won-In K. & Charusiri P., 2003; WEB izvor 1), kao i kombinacijom kanala 7, 6 i 2 (WEB izvor 2). Rasteri su u cilju popravke kvaliteta filtrirani u cilju popravke kvaliteta (engl. *image enhancement*). Poboľšavanje kontrasta „sirovih“ snimaka je izvršeno selektivnom linearnom transformacijom originalnih vrednosti piksela. Takođe, izvršeno je prostorno filtriranje snimaka postupkom isticanja linijskih elemenata (engl. *edge enhancement*) u cilju poboljšanja uočljivosti ruptura.

Daljinska detekcija je takođe, iskorišćena i prilikom analize vegetacije (gustine i vrste), određivanjem normalizovanog indeksa razlike vegetacije (engl. *Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI) korišćenjem Landsat 8 snimaka. Metoda se razvila zahvaljujući činjenici da su instrumenti i u najranijoj generaciji satelita NASA ERTS⁶ i NOAA AVHRR⁷ pravili snimke u normalnom i infracrvenom spektru, pa je bilo moguće uporediti razlike u prostiranju i gustini biljnog pokrivača na istom terenu za dugi niz godina. Definisanje NDVI se poslednjih godina ubrzano razvija i uz primenu GIS okruženja (engl. *Geographic Information System*-GIS) postala je pristupačnija. NDVI se računa iz pojedinačnih merenja na satelitskim snimcima, koja su zasnovana na činjenici da biljke upijaju crvene i infracrvene zrake, a reflektuju zelene. Tako da ukoliko biljka poseduje više lišća, veća količina sunčevih crvenih i infracrvenih zraka će biti upijena. Na ovaj način se mogu ispratiti posledice dugih sušnih perioda ili nedozvoljene seče šume, u periodu koji je od interesa. Formula (5.1.) za proračun NDVI glasi:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (5.1.)$$

gde su:

NIR – merenja spektralnog odbijanja u okviru nevidljivog spektra (blisko infracrvenom)

RED – merenja spektralnog odbijanja u okviru vidljivog spektra (crvena)

U okviru istraživanja epikarsta obavljena je analiza geomorfoloških karakteristika terena (analiza topografije terena, analiza digitalnog elevacionog modela – DEM-a), izvršena analiza satelitskih snimaka (Landsat 8), obavljena analiza geološkog sastava sa aspekta podložnosti stena karstifikaciji i na kraju analiza zemljišta i vegetacije kao faktora koji utiču na epikarst. Izvršene analize su rezultirale izradom 4 oleate: S – nagib terena (eng. *slope*), N – oleata vegetacije (NDVI indeks), Z – zaštitna uloga tla i K – stepen razvoja karstifikacije.

Definisan je nagib terena na osnovu digitalnog elevacionog modela (DEM) terena rezolucije 10 x 10 m (engl. *Spatial Analyst Tools*), pa je DEM snimak pretvoren u poligone gde je nagib terena izražen u procentima, čije su vrednosti klasifikovane u opsege koji su navedeni u tabeli 5.1. Nagib terena kontroliše da li će voda površinski oticati i na taj način vršiti spiranje zemljišta sa terena ili će ostati na površini terena i infiltrirati u podzemlje i na taj način doprineti koroziji

⁶ Landsat 1 lansiran u orbitu 23. jula 1972; u momentu konstruisanja i lansiranja bio je poznat pod nazivom *the Earth Resources Technology Satellite (ERTS)*

⁷ NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*); *The Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)* je u upotrebi od 1979. godine

krečnjaka - karstifikaciji. Na ovaj način kreirana je oleata S – nagib terena. Delovi terena sa nagibom manjim od 12% omogućuju bolju infiltraciju vode. Izgled topografije, takođe, ima uticaj i na stepen razvoja zemljišta.

Tabela 5.1. Težinski faktori za parametar S - inklinacija, nagib terena (Prema: Aller et al, 1985)

Nagib terena / Inklinacija (%)	Težinski faktor
> 18	1
12 - 18	3
6 - 12	5
2 - 6	9
< 2	10

Vegetacija i njeno prisustvo na karbonatnim terenima se javlja kada je epikarst formiran, nakon raspadanja stena i formiranje zemljišta, međutim, vegetacioni pokrivač može da stimuliše razvoj epikarsta, pa je stoga uvršten u faktore. Prilikom izrade karte vegetacije na osnovu satelitskih snimaka izvršena je karakterizacija terena upotrebom NDVI indeksa. Tom prilikom je kreirana oleata N koja ima 2 kategorije: 1 – prisustvo vegetacije u vidu pašnjaka, livada i retkog žbunja (težinski faktor 1); 2 – prisustvo žbunaste (srednje visoke) vegetacije i šumske (visoke) vegetacije (težinski faktor 2).

Zatim je izrađena karta tipova zemljišta, za te potrebe iskorišćene su pedološke karte SFRJ u razmeri 1:50 000, listovi Niš-4 i Pirov-3 (Antonović, 1982; Antonović & Protić, 1982). Svaki tip tla na karti se karakteriše određenim granulometrijskim sastavom na osnovu kojeg je izvršena ocena i rangiranje poljskog kapaciteta zemljišta (Živanović, 2011). Ove vrednosti su posle iskorišćene da bi se po tabeli Seann-a (Jemcov, 2009) izračunala vrednost poljskog kapaciteta tla tj. vlaga zemljišta - eFC. Nakon izrade eFC karte pristupilo se određivanju zaštitne uloge koju pruža zemljište. Pri određivanju parametra zaštitne uloge izvršeno je bodovanje za svaki tip zemljišta i dobijena vrednost je pomnožena debljinom zemljišta (Goldscheider et al, 2000). Množenjem ove dve vrednosti dobijena je karta koja prikazuje zaštitnu funkciju koju pruža zemljište – oleata Z. Raspon dobijenih vrednosti se kretao od 1 do 35, izvršena je reklasifikacija vrednosti i kreirane su kategorije prema tabeli 5.2.

Tabela 5.2. Težinski faktori za parametar Z- zaštitna uloga tla

Zaštitna uloga tla	Težinski faktor
< 7,5	1
7,5-50	2
50 - 60	3
60 - 90	5
90 - 150	7
150 - 160	8
160 - 350	10

Na osnovu geoloških karakteristika terena (Vujisić et al, 1971) kreirana je oleata K, koja u stvari predstavlja prisustvo karbonatnih stena na terenu i njihov stepen karstifikacije, procenjen na osnovu litostratigrafskog sastava i debljine slojeva, kao i poznatih hidrogeoloških osobina na osnovu izdvojenih tipova izdani. Izdvojeno je 5 kategorija, tako da su slojevi izgrađeni od titonskih krečnjaka okarakterisani kao najpodložniji karstifikaciji (1), kao i baremskih i aptskih krečnjaka (2), dok su valensko-otrivski krečnjaci svrstani u sredinu intervala (3), na kraju najmanje podložni karstifikaciji su neraščlanjeni donjokredni krečnjaci (4) i krečnjaci preko kojih postoje kvartarni sedimenti (5).

Sumiranjem ovih oleata je kreirana karta potencijala razvoja epikarsta E prema formuli 5.2.:

$$E = 2 \cdot N + Z + 2 \cdot S + 3 \cdot K \quad (5.2.)$$

Finalna karta ima 4 kategorije potencijala razvoja epikarsta: 1 – nizak, 2 – srednji, 3 – visok i 4 – izuzetno visok.

5.1.2. Petrološke metode

Definisanje stenskog sastava, na ulazu i izlazu iz karstnog izdanskog sistema, izvršeno je petrološkim analizama obavljenim u laboratoriji Departmana za mineralogiju, kristalografiju, petrologiju i geochemiju, RGF-a. Uzorci stene za petrološke analize su prikupljeni u okviru užeg istražnog prostora na istočnim padinama Suve planine, tokom izvođenja terenskih istraživanja. U postupku makroskopskog pregleda uzorci su testirani sa razblaženom hlorovodoničnom kiselinom (HCl) i urađena je brza metoda za utvrđivanje sadržaja CaCO_3 u steni – kalcimetrija. Mineralni sastav ispitivanih sedimentnih stena određivan je ispitivanjem petrografskih preparata na polarizacionom mikroskopu. Korišćena je kompleksna konfiguracija nekoliko uređaja koji su među sobom softverski povezani. To su polarizacioni mikroskop za propuštenu svetlost marke Lajka (tip DMLSP) na kome se nalazi digitalna kamera Lajka (tip DC300). Ispitivanja petrografskih preparata vezanih sedimentnih stena uključila su osim određivanja mineralnog sastava, određivanje strukture, orijentacije zrna, kao i neke od teksturnih karakteristika. Analize su poslužile kod definisanja čistoće krečnjaka, čime je bolje definisan potencijal karbonatnih stena za karstifikaciju i razvoj epikarsta, a zatim je definisana i sredina u kojoj je krečnjak formiran, radi boljeg definisanja uslova nastanka karbonata na ovom prostoru, a indirektno i uslova u kojima je nastala pećina Peč.

5.1.3. Geomorfološke i speleološke metode

Geomorfološka analiza ima značaj u određivanju hidrogeoloških karakteristika nekog karstifikovanog područja, bez obzira na tip karsta i njegov prostorni položaj. Prepoznavanje geomorfoloških oblika, njihova klasifikacija i registracija, i kasnija analiza neophodan je deo istraživačkog postupka. Geološka tj. hidrogeološka prospekcija je ujedno i faza prikupljanja podataka za geomorfološku i hidro(geo)lošku analizu. Primenjen je rad u fazama: rekognosciranje terena, analiza topografskih karata razmere 1:25000 i satelitskih snimaka, izrada 3D modela terena, terenski radovi i na kraju reambulacija podataka. Tokom terenskih radova snimanje koordinata pojava i objekata izvršeno je GPS uređajem dok su dimenzije objekata određivane pomoću merne trake i laserskog daljinomera (Leica Disto Lite 5).

5.1.4. Geofizičke metode

Postupak geoelektričnog sondiranja jedan je od najkorišćenijih postupaka geoelektričnih metoda koje se primenjuju za rešavanje problematike u mnogim oblastima geologije, pa tako i u karstu (Anđelković, 1976; Bechtel et al, 2010). Postupak vertikalnog električnog sondiranja (VES) se primenjuje pri ispitivanju horizontalnih ili subhorizontalnih slojeva. Kod postupka VES prati se promena specifične električne otpornosti (SEO) sa dubinom, što se ostvaruje tako što centar dispozitiva ostaje fiksna, a udaljavaju se spoljne (strujne) elektrode i na taj način se povećava dubinski zahvat, a kao rezultat primene ovog postupka dobija se dijagram električnog sondiranja, koji se prikazuje pomoću bilogaritamske podele gde je prividna specifična električna otpornost data u funkciji polurastojanja strujnih elektroda $AB/2$ (Reynolds, 2011).

Pri terenskim ispraživanjima primenjena je metoda VES sa simetričnim elektrodnim dispozitivom tipa Šlumberže (fra. *Schlumberger*), jer se snimanjem postigao dubinski zahvat bude do 10-50 metara. Može se smatrati da je dubina istraživanja obično od 1/3 do 1/10 rastojanja elektroda AB. VES je izveden elektrodnim dispozitivom gde je AB/2 iznosilo od 30 m do 100 m, na tri lokacije: Rakoš česma, Bukovica i Mokra. Takođe, izvršeno je poređenje i analiza novodobijenih rezultata, sa rezultatima geofizičkih istraživanja koja su sprovedena 2010. godine na lokacijama vrela Divljana i Mokra.

5.1.5. Hidrogeološke metode istraživanja

Hidrogeološka detaljna terenska istraživanja obavljena su tokom perioda decembar 2017. – februar 2019. godine, i podrazumevala su obilazak celokupnog karstnog masiva Suve planine na kvartalnom nivou, a karstna vrela na užem području istraživanja osmatrana su na mesečnom nivou. Vršeni su monitoring kvaliteta i kvantiteta hidrogeoloških pojava, uz merenje parametara na terenu i vršenje terenskih hemijskih analiza. Podaci o fizičko-hemijskim karakteristikama podzemnih voda prikupljeni su terenskim uređajima kojima raspolaže Centar za hidrogeologiju karsta, Departmana za hidrogeologiju, Rudarsko-geološkog fakulteta (CHK), vršeno je uzorkovanje podzemne vode za izradu skraćenih hemijskih analiza, uzorkovanje za izotopske analize i sl.

Hidrogeološko kartiranje obavljeno je najvećim delom tokom letnjih meseci 2018. godine, paralelno sa geomorfološkim istraživanjima. Obuhvatilo je definisanje karakteristika epikarsta, na otvorenim izdancima stena i usecima, određivanje debljine, sastava, oblasti prostiranja, i pripremu podataka za korelaciju sa podacima prikupljenim daljinskom detekcijom i geomorfološkim istraživanjima.

Za vrela Mokra i Divljana urađena je analiza recesione krive. Postoji nekoliko metoda za analizu recesione krive (Krešić, 1991; Bonacci, 1993; Fiorillo, 2014), analiza krive recesije vrela Mokra i Divljana izvršena je uz upotrebu eksponencijalne jednačine Majea (formule 5.3. i 5.4.) (Krešić, 1991):

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (5.3.)$$

Odnosno:

$$\alpha = \frac{\log Q_0 - \log Q_t}{0,4343 \cdot (t - t_0)} \quad (5.4.)$$

gde su:

Q_t – izdašnost vrela (m^3/s) u periodu $t-t_0$

Q_0 – izdašnost vrela (m^3/s) u periodu t_0

t_0 – vreme početka recesionog (mikro)perioda

t – kraj recesionog (mikro)perioda

α – koeficijent recesije

0,4343 – korekcionni faktor

Obično, dobro razvijen karstni hidrogeološki sistem može da se aproksimira sa tri recesiona mikroperioda (mikro režima) pražnjenja (Krešić, 2009). Isti autor navodi da su vrednosti koeficijenta recesije obično reda veličine 10^{-2} ili 10^{-3} , gde prvi odgovara brzom propagaciji vode kroz veće karstne kanale i pukotine (strmiji nagib recesione krive), a drugi predstavlja sporije pražnjenje kroz matriks stene, što je na grafiku prikazano blažim nagibom krive recesije. Takođe, koeficijent recesije i zapremina vode akumulirana u karstnoj izdani su obrnuto proporcionalni, pa je na taj način moguće proračunati količinu vode koja je bila akumulirana u

karstnoj izdani prema jednačini (5.5.) koja podrazumeva zbir zapremina voda akumuliranih na početku svakog mikrorožima pražnjenja:

$$V_0 = \sum_1^i V_i = \sum_1^i \frac{Q_i}{\alpha_i} \times 86400s \quad (5.5.)$$

gde su:

V_0 – zapremina istekle vode na početku recesionog perioda

V_i – zapremina istekle vode na početku mikroperioda recesije

Q_i – vrednost isticanja vrela tokom mikroperioda recesije

α_i – koeficijent recesije tokom mikroperioda pražnjenja

i – broj mikroperioda pražnjenja karstne izdani

Ukoliko se jednačina Majea (formula 5.4.) primeni na poslednju vrednost isticanja tokom recesionog perioda, moguće je proračunati zapreminu vode (V^*) koja je ostala na kraju recesionog perioda. Istovremeno, može se dobiti i zapremina istekle vode u m^3 kao razlika V_0 i V^* u periodu diskretizacije $t-t_0$. Primenom jednačine (5.3.), izračunati su koeficijenti pražnjenja (α) za oba vrela. Važno je istaći da se prvi mikrorožim pražnjenja po pravilu ne pokorava Majeovoj jednačini recesionog perioda, budući da predstavlja turbulentni režim tečenja za koji postoje drugi postupci određivanja relevantnog koeficijenta pražnjenja (Krešić, 1991; Malík, 2015).

Za ocenu bilansa vrela primenjena je opšta bilansna jednačina (formula 5.6.) (Stevanović, 1995; Stevanović, 2015):

$$P = Q + \xi \quad (\text{ulaz} = \text{izlaz} + \text{gubici}) \quad (5.6.)$$

gde su:

P – veličina padavina u slivu;

Q – izdašnost vrela (višegodišnji proseki), i

ξ – suma svih gubitaka vode u slivu (oticaaj, evapotranspiracija, podzemno isticanje).

Analizom dobijenih rezultata dobijaju se prosečne višegodišnjih vrednosti osnovnih elemenata jednačine bilansa i to: prosečne godišnje sume padavina P – (mm), prosečnih godišnjih gubitaka (evapotranspiracija, podzemni oticaj) ξ – (mm), prosečnog sloja oticaja h – (mm), prosečnog višegodišnjeg proticaja Q – (l/s), prosečne višegodišnje zapremine otekle vode W – ($10^6 m^3$), prosečne višegodišnje izdašnosti q – (l/s/km²) i prosečnog višegodišnjeg koeficijenta oticaja φ .

Za simulaciju i kratkoročnu prognozu isticanja karstnih podzemnih voda kreiran je model simulacije isticanja. Najbolje rezultate prognoze daje kombinovani autoregresivno-krosregresivni (AR-CR) model. AR-CR modeli pripadaju grupi multivarijantnih modela vremenskih serija (Krešić, 2010) i svode se na višestruku linearnu regresiju. Model daje isti težinski faktor svim vrednostima padavina, tj. izjednačava uticaj dužih i intenzivnijih letnjih padavina, dok istovremeno ne uzima u obzir npr. povećanu evapotranspiraciju i deficit vlage u nesaturisanoj zoni (u recesionom periodu) i druge faktore koji tokom letnjih meseci dodatno utiču na efektivnu infiltraciju karstne izdani (Krešić, 2010). Da bi se ovaj problem donekle amortizovao, vrši se transformacija bruto padavina pomoću filtera linearnog pokretnog preseka (MA – *engl. moving average*). Pomenuti filter transformiše bruto padavine na osnovu unapred zadatog prozora pokretnog preseka, koji se izražava u danima. Generalno gledano, primena ovog filtera smanjuje koeficijent višestruke regresije AR-CR modela. Međutim, pozitivni efekti se ogledaju u boljim rezultatima u recesionom periodu, dok su u periodu prihranjivanja izdani rezultati prilično isti kao sa bruto padavinama.

5.1.6. Hidrogeološki eksperimenti na terenu i u laboratorijskim uslovima

Upotreba trasera u terenskim hidrogeološkim istraživanjima omogućava utvrđivanje pravca i brzine cirkulacije izdanskih voda, povezanost vodonosnih horizonata, povezanost površinskih i podzemnih voda, i naravno zona prihranjivanja i isticanja (Komatina, 1984; Milanović P., 1979; Maloszewski et al. 2002; Goldscheider et al. 2008; Geyer et al. 2008). Tokom terenskog eksperimenta trasiranja je određena brzina kretanja „nadizdanskog“ toka kroz povlatu pećine Peč, pomoću inertnog obeleživača (Na-fluorescein). U ovom slučaju traser je primenjen za potrebe definisanja brzine infiltracije površinske vode/cirkulacije u nadizdanskoj zoni i zoni epikarsta na lokaciji pećine Peč, u ataru sela Bežište. Nakon opita je izvršena kvalitativna i kvantitativna analiza opita (Milanović P, 1979; Stevanović & Milanović, 2017). Tokom opita vršen je i monitoring temperature procedne vode i specifične električne provodljivost uz pomoć terenskog konduktivimetra sa temperaturnom sondom: WTW -Cond 340i/set (CHK).

U cilju definisanja sposobnosti epikarsta da „preradi“ određene zagađujuće supstance na osnovu dužine boravka vode u podzemlju, ali i na osnovu sastava ove nadizdanske zone sproveden je *in situ* eksperiment sa „lakim“ kontaminantom, radi definisanja retencionih svojstava epikarsta, funkcionisanja procesa samoprečišćavanja u epikarstu, u uslovima različitih količina procedne vode u pećini. „Laki“ kontaminant je po svom sastavu stajsko đubrivo rastvoreno u podzemnoj vodi iz kopanog bunara, za koji se sa pravom smatra da je zagađena osokom⁸ iz obližnje staje. Pošto je stajsko đubrivo prirodnog (organskog) porekla, kao kontaminant je lakog sastava, jer se u prirodnim uslovima može razgraditi na neškodljive supstance, ali da u kratkom vremenskom periodu odvijanja opita može da bude pokazatelj migracije zagađujućih supstanci. Za potrebe definisanja hemijske kontaminacije praćena je koncentracija azotne trijade (NH_3 , NO_2^- i NO_3^-), mereni su osnovni fizičko-hemijski parametri (specifična električna provodljivost, pH, Eh, TDS) pomoću terenskog uređaja: Hanna Instruments - HI98194 (CHK). Mikrobiološka kontaminacija procedne vode je praćena putem analize uzoraka radi utvrđivanja broja bakterija, analize su izrađene u Institutu za javno zdravlje Niš.

Prikupljeni podaci na terenu, tokom sprovođenja opita trasiranja i eksperimenta sa „lakim“ kontaminantom poslužili su za dizajn, izradu i tariranje fizičkog modela epikarsta za opite u laboratorijskim uslovima. Prilikom izrade laboratorijskog modela rezultati terenskih opita su poslužili da se postave odnosi između:

- a) debljina slojeva: zemljišta, epikarsta i stene do pećinske tavanice,
- b) površina i zapremina prostora obuhvaćena eksperimentom,
- c) brzina kretanja obeleživača – kontaminanta,
- d) koncentracija i količina kontaminanta na ulasku i na izlasku iz sistema,
- e) količina vode koja se proceđuju kroz osmatranu zapreminu u funkciji vremena.

Za potrebe laboratorijskog eksperimenta nabavljene su transparentne cevi $\varnothing 200/194$ mm, od klirita (pleksiglasa), dužine 2 metra. Dno je hermetički zatvoreno i ugrađene su slavine za ispuštanje vode iz sistema i uzimanje uzoraka. Iznad cevi postavljeni su sudovi poznate zapremine, preko kojih se vršilo „prihranjivanje“ sistema vodom. Nakon formiranja modela su sprovedena 2 opita, jedan je prikazao mešanje voda u okviru epikarsta, dok je drugi prikazao kako model epikarsta reaguje na uvođenje kontaminanta u vidu veštačkog azotnog đubriva.

⁸ Osoka predstavlja organsko đubrivo koje nastaje od tečnog dela stočnih ekskremenata koje ne upija prostirka

5.1.7. Izrada karte ranjivosti i definisanje zona sanitarne zaštite

Kada se ima u vidu da je karstna izdan veoma složena usled pomenute heterogenosti i anizotropije i složenih hidrodinamičkih uslova koji unutar ove specifične izdani vladaju, okonturivanje potrebnih oblasti koje treba zaštititi zahteva postepen i pravilno definisan hidrogeološki postupak. Greške pravljenе primenom određenih hidrodinamičkih modela i uopštavanjima uslova koji vladaju u sredini, bez primene detaljnih hidrogeoloških istraživanja u karstnim područjima, pokazale su kolike su greške pravljenе u postavkama i organizaciji zaštite izvorišta (Worthington et al, 2001, 2002; Worthington, 2011).

Metodika hidrogeoloških istraživanja je u uskoj vezi sa prognozom migracije zagađivača kroz vodonosnu sredinu. Naime, ako se radi o mikrobiološkom zagađenju, nasuprot jako toksičnim hemijskim zagađivačima sa uzimanjem u obzir perioda življenja mikroorganizama u podzemnim vodama i apsorpcione i disperzione moći hidrogeološke sredine u odnosu na njih, pri primeni pomenutih mera može da se ograniči znatno manja površina ZSZ u takvim uslovima. Kada se zna da izuzetno velike razmere ZSZ i uvedena ograničenja mogu da dovedu, u pogledu racionalnog iskorišćavanja teritorije, do određenih ekonomskih gubitaka, onda taj hidrogeološki činilac od koga u suštini zavise razmere ZSZ još više dobija na značaju.

Suština procesa preventivne zaštite podzemnog vodnog resursa je da se krajnjim korisnicima obezbedi sanitarno ispravna voda. S obzirom da je pretpostavka da se voda na izvoru/vrelu pojavljuje kao ispravna treba je kao takvu održati za trenutne i buduće potrebe. Određeni autori (Goldscheider, 2010) predlažu sledeći sistem održavanja kvaliteta i tretmana „sirove“ vode: Zahvat vode na izvoru → Određivanje zona sanitarne zaštite → Smanjivanje zagađivanja → Stalni monitoring kvaliteta izvorske vode → Tretman „sirove“ vode → Sanitarno ispravna voda. Predložene mere i tretmane treba ozbiljno shvatiti i primeniti da ne bi došlo do širenja zaraznih bolesti i/ili hidričnih epidemija kao na primer slučaj Boljevca, avgusta 1982. godine (Dragišić, 1994). Sličan slučaj desio se i na kaptiranom vrelu Grabovice, kod Sjenice. Početkom 70-ih godina 20. veka je došlo do „proboja“ mikrobiološkog zagađenja iz nezaštićenog zaleđa u oblast prihranjivanja vrela i došlo je do epidemije dizenterije sa oko 1300 obolelih, između ostalog zagađenje je dospelo do potrošača i zbog odsustva hlorisanja voda (Stevanović, 1986).

Propisivanje i određivanje zona i mera sanitarne zaštite i načina ponašanja (ograničavanjem antropogenog uticaja) u okviru istih, definisano je Zakonom o vodama („Sl. glasnik RS“, br. 30/10), zatim Pravilnikom o načinu određivanja i održavanja zona sanitarne zaštite objekata za snabdevanje vodom za piće („Sl. glasnik RS“, br 92/08), Pravilnikom o higijenskoj ispravnosti vode za piće („Sl. list SRJ“, br. 42/98), Pravilnikom o opasnim materijama u vodama („Sl. list SRS“, br. 31/82) i drugim važećim normativima o sanitarno-higijenskim uslovima za izvorišta vode za piće.

Sve veći uticaj ljudskog faktora na životnu sredinu, u velikoj meri je doprineo da u mnogim regionima dođe do promene karstnih ekosistema i pored ogromnog značaja ovih regiona sa aspekta vodosnabdevanja. Upravo zato su u mnogim evropskim zemljama uvedene mere koje pružaju bolju zaštitu karstnih podzemnih voda. Te mere su kasnije postale sastavni deo Evropske direktive za vodu (European Parliament (EP) and the Council of the European Union (EC), 2000; Živanović, 2011).

Potencijal prirodne zaštite je limitiran i veoma varijabilan. Različiti delovi fizičke sredine imaju različiti potencijal da zadrže ili oslabe zagađujuću supstancu. Izrada karata ranjivosti tj. osetljivosti fizičke sredine, omogućava nam da odredimo područja koja su manje ili više osetljiva na zagađivanje kada su u pitanju podzemne vode. „Ranjivost podzemnih voda možemo

definisati kao skup osobina prirodne sredine koje određuju osetljivost izdani na zagađivanje sa površine terena“ (Živanović, 2011). Kartiranje ranjivosti izdani uključuje kombinovanje nekoliko tematskih karata od izabranih fizičkih činilaca u jednu kartu koja određuje različite oblasti osetljivosti podzemnih voda na prirodne i veštačke uticaje (Petrović B, 2005 i 2016). Glavne karakteristike epikarsta su akumuliranje podzemne vode i formiranje koncentrisanih tokova. Prva karakteristika povećava prirodnu zaštitu, dok druga povećava ranjivost podzemnih voda (Živanović, 2011). Samim tim uloga epikarsta ne može biti posmatrana na samo jedan način, kao isključivo u funkciji zaštite tj. u funkciji onemogućavanja zaštite podzemnih voda.

Karte ranjivosti podzemnih voda pokazuju manje ili više subjektivno viđenje kapaciteta potpovršinskog okruženja da zaštiti podzemnu vodu, u smislu kvaliteta vode. Za razliku od geoloških karata koje čine osnovu kartama ranjivosti izdani, ove karte zavise od vremena i zahtevaju konstantno unapređivanje i dopunu, da bi pokazale promenu i osobina podzemnih voda i prirodu potencijalnih izvora zagađenja (Petrović B, 2016).

Uprkos postojanju brojnih metoda procene ranjivosti podzemnih voda, do sada nijedna nije dala neke opšte standarde za odabir i procenu parametara iako su učinjeni veliki napori u okviru Evropske Unije da se postigne taj cilj (Zwahlen, 2004).

Izbor adekvatne metode za ocenu ranjivosti podzemnih voda zavisi od više faktora, a pre svega od: raspoloživosti potrebnih podataka, prostorne distribucije podataka, razmere posmatranja, namene dobijenih rezultata i najviše od svega, od hidrogeoloških karakteristika terena. EPIK metoda daje dobre rezultate u okruženjima gde se javljaju samo karstni tereni. Kasnije su se pojavile metode koje mogu da se primene u svim hidrogeološkim sredinama, a da pri tome uzimaju u obzir specifične karakteristike svake sredine, primer su PI metoda i COP metoda.

EPIK metoda zasniva se na konceptualnom modelu koji predlaže razmatranje četiri faktora: E - Epikarst, P - Zaštitni pokrivač, I - Uslove infiltracije i K -Razvoj mreže karstnih kanala. Procena svakog faktora množi se sa odgovarajućim težinskim koeficijentom, a zatim se proizvodi zbrajaju da bi se postigao konačni rezultat. Što je rezultat veći, veća je prirodna zaštita područja, tj. manja je ranjivost (Doerfliger et al, 1999).

PI metoda je bazirana na određivanju dva faktora: P faktor – zaštitni pokrivač i I faktor – uslovi infiltracije. Zasniva se na modelu *izvor-putanja-cilj*: pretpostavlja se da je površina (tla) potencijalni izvor kontaminacije, a nivo podzemnih voda najviše pozicionirane izdani predstavlja cilj (Goldscheider et al, 2000). Putanja uključuje sve između površine i nivoa podzemnih voda. P faktor pokazuje zaštitu slojeva koji prekrivaju i samim tim štite podzemnu vodu, u funkciji njihove debljine i svojstava, a I faktor pokazuje stepen u kojem je moguće da dođe do zaobilazanja zaštitnog pokrivača, kao rezultata lateralnog površinskog i pripovršinskog toka u slivu ponora ili ponirućeg toka.

COP metoda je razvijena za procenu prirodne ranjivosti karbonatnih izdani u okviru evropske akcije COST 620 (Zwahlen, 2004) i kao takva danas predstavlja jednu od najdetaljnijih i sveobuhvatnijih metoda za ocenu ranjivosti karstnih voda. Ovom metodom se definišu tri faktora za procenu ranjivosti podzemnih voda (Vías et al, 2006): C faktor - koncentrisanost toka, O faktor - svojstva stenskih slojeva iznad nivoa podzemne vode (povlatni slojevi) i P faktor – padavine. Konceptualna osnova ove metode je procena prirodne zaštite podzemnih voda koja je određena svojstvima povlatnih slojeva i nezasićene (nadizdanske) zone, a takođe, i procena kako se ta zaštita smanjuje usled postojanja difuzne ili koncentrisane infiltracije (C faktor) i određenih klimatskih uslova (P faktor - padavine). COP metoda se može primeniti u različitim

klimatskim uslovima i na različitim vrstama karbonatnih izdani. Pored toga, metoda COP koristi parametre i faktore u skladu sa onima koji su predloženi kroz Evropski pristup (COST 620 – Zwahlen, 2004).

Cilj uspostavljanja režima zaštite putem definisanja zona sanitarne zaštite je sprečavanje zagađenja izvorišta javnog vodosnabdevanja. Situacija u istražnom području tj. u okolini SRP „Suva planina“ je dobra, jer su ZSZ definisane, a delimično i primenjene za kaptirana vrela: Mokra, Divljana, Ljuberađa, Gornji Dušnik i Golemo vrelo (Petrović & Marinović, 2019c). Pored toga, odsustvo naselja na Suvoj planini pruža gotovo savršene prirodne uslove za zaštitu podzemnih voda.

5.2. Negeološke metode

5.2.1. Hidrometeorološke i hidrološke metode

Zbog načina prihranjivanja i relativno brze vodozamene karstne izdani ove metode su veoma značajne. Definisane su količine padavina, kao i proticaji na vrelima preko kojih se izdan prazni.

U cilju analize pluviometrijskog režima i njegovog uticaja na režim podzemnih voda istražnog područja iskorišćeni su raspoloživi podaci Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije (RHMZ) za period od 1991–2018. godine. Takođe, iskorišćeni su podaci za period 1961-2010. godina (Milovanović et al, 2017) za izradu karte izohijeta, i na kraju iskorišćene su dnevne vrednosti padavina sa internet portala <http://www.meteomanz.com/>.

Prikupljeni su dnevni podaci o izdašnosti vrela Divljana i Mokra za period 2015-2018. godina (JKP „Naissus“, Niš). Podaci se odnose na količine zahvaćene vode, zatim vode koja slobodno otiče (radi održavanja biološkog minimuma u vodotocima Koritnička reka i Mokranjska reka) i vode koja se distribuira lokalnom stanovništvu sela Mokra i Divljana, tako da suma tih količina vode daje izdašnost posmatranog vrela. Vrednosti proticaja (zahvaćenih količina vode) se beleže svakoga sata, pa su podaci osrednjeni na dnevnom nivou (prosek je sračunat za period od 24 sata između 6h ujutru do 6h sledećeg dana). Analiza količine istekle vode na vrelima Mokra i Divljana, zajedno sa analizom hidrometeoroloških podataka pomogla je u definisanju međusobnog odnosa vrela Mokra i Divljana: da li je vrelo Mokra hipsometrijski niži kanal kojim se drenira isti karstni izdanski sistem, ili su to dve u potpunosti odvojene karstne izdani?

5.2.2. Pedološke metode

U okviru istraživanja zemljišnog pokrivača u laboratoriji su određeni parametri: vlažnosti zemljišta, mineralnog sastava, sadržaja organske supstance zemljišta, kao i fizičko-hemijskih procesa koji se u njemu odvijaju, a koji utiču na menjanje osobina površinskih (podzemnih) voda. Osim toga ciljevi istraživanja fizičko-hemijskog sastava zemljišta bili su da se:

- uradi tehnička analiza uzoraka i da se utvrdi količina organske supstance u uzorcima;
- utvrdi da li je zemljište kontaminirano nekim teškim metalom.

Determinacija sadržaja svih važnijih makro i mikro elemenata koji ulaze u sastav tla izvršena je u Laboratoriji za ICP-OES, Katedre za analitičku hemiju, Hemijski fakultet, Univerziteta u Beogradu (KAH, HF, UB). Za izradu tehničke analize (sadržaj vlage i pepela) korišćeni su SRPS B.H8.390/1987 i ISO 1171 standardi (Smiljković, 2019). Elementarnom analizom određen je sadržaj vodonika, azota, sumpora i organskog ugljenika. Organski ugljenik analiziran je po uklanjanju karbonata sa razblaženom hlorovodoničnom kiselinom (1:3 v/v). Priprema uzoraka

za druge analize je obavljena pomoću mikrotalasne digestije (ETHOS1-*Advanced Microwave Digestion Milestone*). Merenja su obavljena na aparatu Vario EL III, CHNOS Elemental Analyzer, GmbH. Sadržaj makro- i mikro-elemenata je određen metodom optičke emisione spektrometrije sa indukovano kuplovanom plazmom (ICP-OES) na instrumentu Thermo Scientific Cap 6500 Duo ICP (*Thermo Fisher Scientific Cambridge UK*). Tom prilikom su korišćeni standardi za pripremu standardne serije (*Multi-Element Plasma Standard Solution 4, Specpure®*; Silicon, plasma standard solution, *Specpure®, Si 1000 µg/ml*; SS-Low Level Elements ICV Stock (10 mg/l: Ag, Al, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Th, Tl, U, V, Zn).

5.2.3. Hemijske, izotopske i mikrobiološke metode

Pored geoloških i negeoloških metoda, poseban značaj istraživanju dala su istraživanja usmerena ka definisanju kvaliteta vode.

U okviru hemijskih analiza, na mesečnom i kvartalnom nivou izrađivane su skraćene terenske hemijske analize vode odabranih hidrogeoloških pojava i objekata u okviru laboratorija Departmana za hidrogeologiju i Centra za hidrogeologiju karsta. Zatim je izvršeno utvrđivanje sadržaja mikrokomponenti u određenim uzorcima voda u Laboratoriji Hidroelektrane na Trebišnjici, Trebinje; Služba za laboratorijska ispitivanja, Sektor za razvoj i istraživanje, Direkcija za proizvodnju i tehničke poslove (Laboratorija HET-a) i u Laboratoriji za ICP-OES, Hemijskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu (HF, UB).

Tokom hidrogeoloških istraživanja, a u cilju određivanja vremena zadržavanja vode u podzemlju tj. brzine izdanskog toka definisan je sadržaj stabilnih izotopa vodonika i kiseonika (^{18}O i ^2H). Prvo je izvršeno postavljanje kišnog kolektora „RainCo“. Kolektor je izrađen tako da se izbegne isparavanje vode, kao i da se onemogući izotopska frakcionacija unutar samog kolektora, što je postignuto postavljanjem nepovratnog ventila na dnu levka, kao preventivna mera sprečavanja isparavanja kišnice iz kanistera (Vasić, 2017). Kolektori „RainCo“ su postavljeni na lokaciji vrela Mokra i pećine Peč. Uzorkovanje kišnice vršeno je na mesečnom nivou za određivanje sastava stabilnih izotopa radi uspostavljanja lokalne izotopske meteorske linije -LIML (engl. *Local Meteoric Water Line*) i poređenja sa globalnom izotopskom meteorskom linijom - GIML (engl. *Global Meteoric Water Line*). U istim vremenskim presecima uzimani su i uzorci podzemne vode sa 4 karstna vrela na užem području istraživanja: Mokra, Divljana, Bežište i Gornja Koritnica. Uzorci su presipani u bočice zapremine 30 ml, koje su morale da ispune uslove hermetičnosti i inertnosti, izrađene od posebne plastike koja sprečava izotopsku frakcionaciju sa bocom, sa specijalno dizajniranim čepom koji istisne višak vazduha i vode i na taj način hermetički zatvara bocu, čime je bio sprečen kontakt uzorka vode sa vazduhom (Vasić, 2017). Izotopske analize sprovedene su u laboratoriji Atomki (*Institute for Nuclear Research – Atomki, Laboratory of Climatology and Environmental Physics - ICER*) u Debrecinu, Mađarska. Tom prilikom je definisan sadržaj stabilnih izotopa, a na osnovu rezultata je utvrđeno okvirno srednje vreme zadržavanja voda u podzemlju, poreklo podzemnih voda i uslovi cirkulacije podzemnih voda.

Mikrobiološke analize sprovedene su u Institutu za javno zdravlje Niš, tokom eksperimenta sa „lakim“ kontaminantom, tom prilikom kontrolisan je broj ukupnih koliformnih bakterija i koliformnih bakterija fekalnog porekla, aerobnih mezofilnih bakterija, streptokoka fekalnog porekla, sulfitoredukujućih klostridija, *Pseudomonas aeruginosa* i *Proteus* vrste, radi definisanja procesa samoprečišćavanja i/ili retencije u okviru epikarsta (i nadizdanske zone). Koliformne bakterije su uobičajene u našem okruženju, primarno nepatogene i normalno se nalaze u donjem intestinalnom traktu čoveka i toplokrvnih životinja, gde su odgovorne za pravilnu

probavu hrane, a izlučuju se fekalijama (Lalošević, 2011). Koliformne bakterije su najpogodnija grupa indikatorskih bakterija za vrednovanje higijenskog kvaliteta vode. U rodu *Escherichia* nalazi se nekoliko vrsta bakterija, a za humanu medicinu značajna je vrsta – *E. coli* (Grozdanović - Radovanović, 2000). To je štapičasta gram-negativna⁹ bakterija, većina na površini ima izdanke (flagele) pa su pokretne. Aerobna je i fakultativno anaerobna bakterija. Prilično otporna bakterija: mesecima može da živi u vodi i zemlji. *E. coli* predstavlja deo crevne flore i neophodna je za proces varenja i sinteze nekih supstanci, na primer vitamin K (Lalošević, 2011). *E. coli* je indikator zagađenosti voda fekalijama. Jedan je od najčešćih uzroka bakterijskih infekcija čoveka. Većina tipova *E. coli* je bezopasna za čoveka, ali neki kod ljudi mogu da izazovu različite bolesti (npr. sepsa, zaljenje pluća itd.). *Proteus* vrste su gram-negativne, koliformne bakterije fekalnog porekla i prirodni stanovnici tla. Streptokoke fekalnog porekla (npr. *Streptococcus faecalis*), spadaju u grupu koliformnih bakterija, široko su rasprostranjene u životnoj sredini. Bakterije roda *Clostridium* su gram-pozitivni anaerobni sporogeni štapići, proizvode egzotoksine, pa su patogene za čoveka i životinje. *P. aeruginosa* je gram-negativna, pokretna, štapičasta bakterija, u životnoj sredini prilično je otporna bakterija, a pokazatelj je starog fekalnog zagađenja. Aerobni mezofili su grupa mikroorganizama koja u suštini ne predstavlja opasnost po zdravlje ljudi, već je pokazatelj uspešnosti procesa prečišćavanja vode.

Tokom realizacije eksperimenta sa fizičkim modelom epikarsta u laboratorijskim uslovima vršene su analize sadržaja nitrata pomoću terenskog fotometra (The eXact® Micro 20 Dual Wavelength Advanced Photometer System), a određeni broj analiza koncentracije nitrata je izvršen u Institutu za javno zdravlje u Kragujevcu.

⁹ Podela bakterija prema sastavu ćelijskog zida i bojenju postupkom po Gramu (H. K. Gram 1884. godine). *Gram-negativne* bakterije imaju jedan sloj lipopolisaharida koji pokriva njihov ćelijski zid, usled čega se oboje crveno, dok se druge boje ljubičasto. *Gram-pozitivne* bakterije se lakše uništavaju antibioticima.

III PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

6. Opšte karakteristike istražnog područja

6.1. Geografski položaj

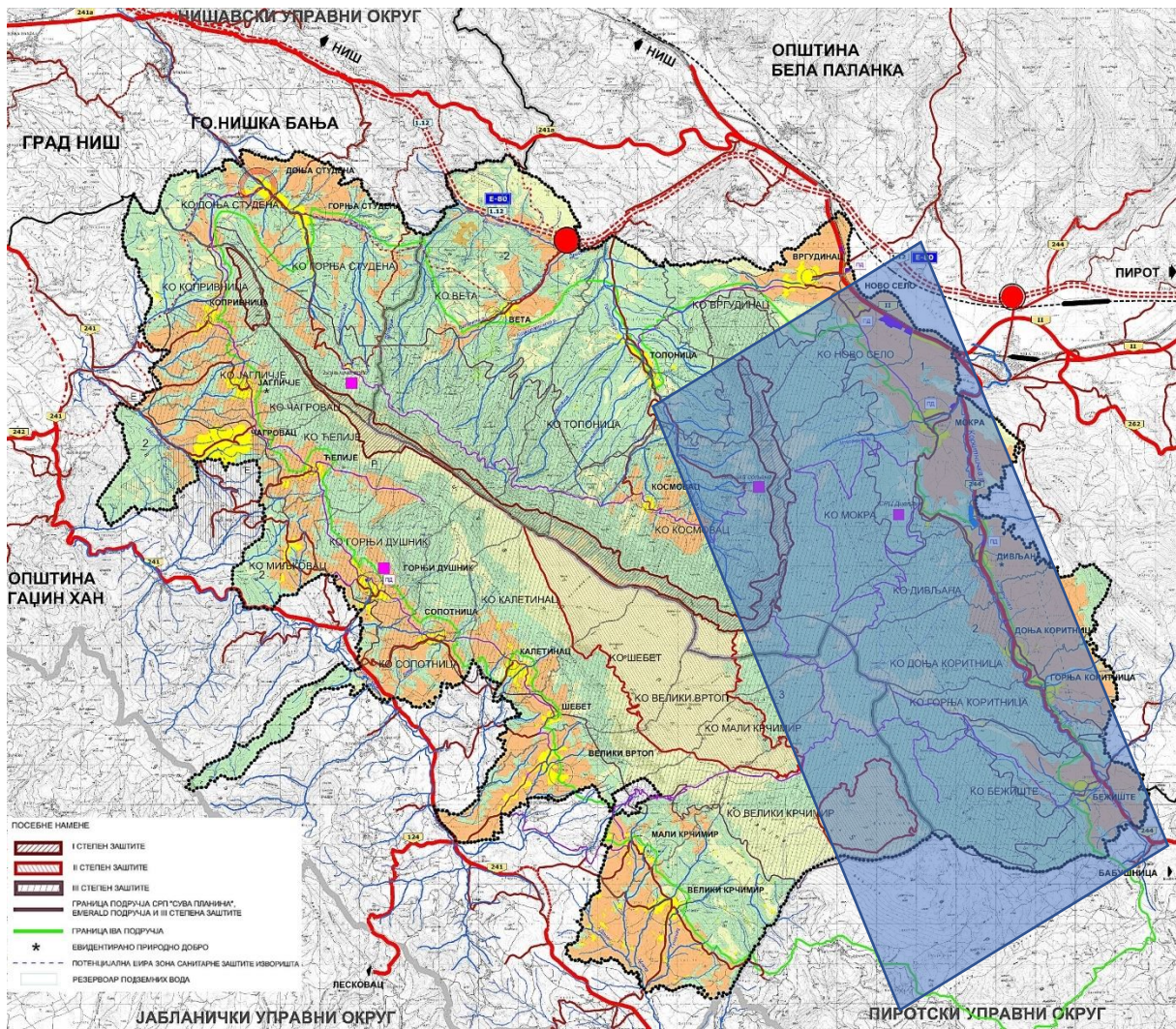
Suva planina se nalazi oko 10 km jugoistočno od grada Niša. Prostire se pravcem severozapad-jugoistok, počinje istočno od Niške Banje, a završava se jugozapadno od Babušnice u Lužničkoj kotlini kroz koju protiče reka Lužnica (Slika 6.1.), duga je oko 45 km, a široka oko 15 km. Prostire se pravcem severozapad—jugoistok u visinskim zonama od 250 m.n.m. do 1810 m.n.m. U geološkom i geografskom smislu Suva planina pripada Karpato-balkanskom lancu planina, na granici sa Srpsko-makedonskom masom. U administrativnom smislu obronci Suve planine pripadaju opštinama: Niška Banja, Gadžin Han, Bela Palanka, Babušnica i Vlasotince. Posедуje jedinstvenu fitocenu i šumski ekosistem, u okviru kojeg je zastupljeno 1261 biljna vrsta (128 endemičnih vrsta flore), stoga je prema nacionalnom zakonodavstvu (Sl. glasnik RS, br. 55/2012, br. 72/2015), proglašena za područje sa statusom rezervata prirode i objektom geonasleđa Srbije. Specijalni rezervat prirode „Suva planina”, ukupne površine 18116 ha, 68 a i 97 m² nalazi se na teritoriji opštine Niška Banja, Gadžin Han i Bela Palanka. Kako se navodi u Uredbi, SRP „Suva planina” stavljen je pod zaštitu u cilju očuvanja bioloških, predeonih, geoloških i geomorfoloških vrednosti, kao i biološke i geološke raznovrsnosti. Na površini područja ustanovljeni su režimi sva tri stepena zaštite, istražno područje uglavnom obuhvata oblasti koje su pod II i III stepenom zaštite (Slika 6.2.).

Istražni prostor karakteriše se brdsko-planinskim reljefom sa hidrografskom mrežom koja pripada slivu Nišave tj. Južne Morave. Sa severozapadne i severne strane Suva planina je ograničena rekom Nišavom (oko koje se formiraju Belopalanačka, Ostrovička i Niška kotlina), sa istočne strane Koritničkom, a sa jugoistočne i južne strane Lužničkom rekom. Prema zapadu planina se postepeno spušta u Zaplanjsku kotlinu (Slika 6.3.), a prema tokovima Nišave i Lužničke reke i okolnim duboko spuštenim kotlinama (Niškoj, Zaplanjskoj, Babušničkoj, Koritničkoj, Belopalanačkoj i Ostrovičkoj), najčešće strmo, ponegde okomito.

Uže istražno područje obuhvata slivove tj. zone prihranjivanja karstnih vrela Mokra i Divljana, Gornja Koritnica i izvora Bežište, koja se nalaze u podnožju istočnih padina Suve planine (Slika 6.4.), od sela Mokra do sela Bežište. Samim tim, granica užeg istražnog prostora se na istoku i severoistoku poklapa sa lokalnim erozionim bazisom: Mokranjskom tj. Koritničkom rekom, južnu granicu predstavlja južna granica vododelnice Koritničke reke i vrela Bežište, zapadnu tj. jugozapadnu granicu čine vododelnice vrela Mokra i Divljana, izvora Rakoš česma i Bežište, a severnu granicu predstavlja severna vododelnica vrela Mokra.



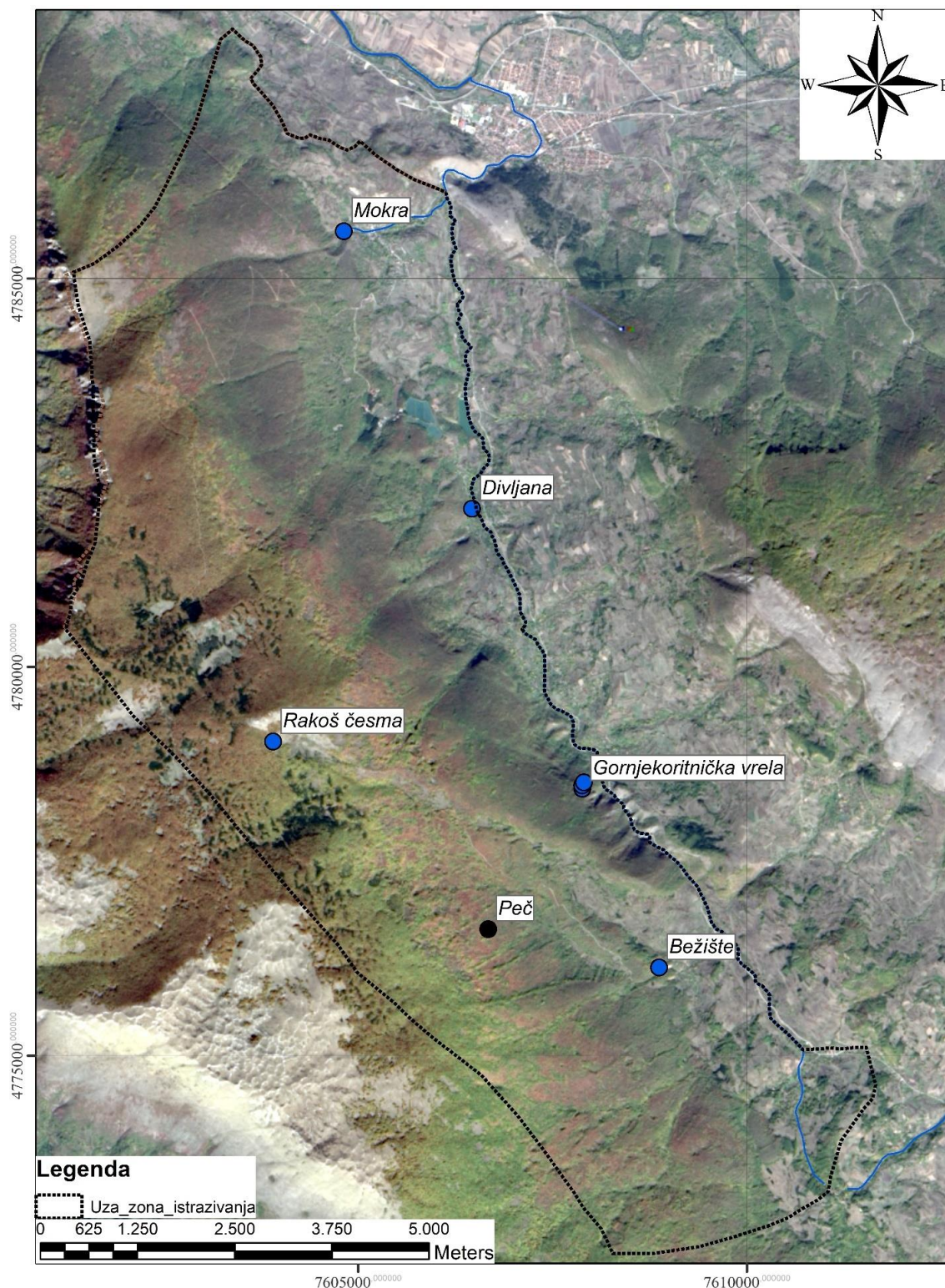
Slika 6.1. gore levo: Geografski položaj Suve planine, gore desno: položaj užeg područja istraživanja (plavi poligon) i dole: 3D model užeg područja istraživanja – source: GoogleEarth



Slika 6.2. Specijalni rezervat prirode Suva planina (preuzeto iz Sl. glasnik RS, br. 55/2012), sa užim istražnim područjem - plavi poligon



Slika 6.3. Pogled na zapadne padine Suve planine, Zaplanje



Slika 6.4. Uže područje istraživanja, istočni deo Suve planine (Landsat-8 image courtesy of the U.S. Geological Survey)

Mreža lokalnih puteva povezana je sa većim regionalnim pravcima, od kojih je najbitniji koridor Beograd-Niš-Sofija, a koji je povezan i sa međunarodnim tranzitnim pravcem Beograd-Skoplje-Atina. U ovom delu jugoistočne Srbije postoji nekoliko naseljenih mesta varošskog tipa: Bela Palanka, Babušnica, Gadžin Han, Niška Banja, a veliki gradski centri su: Niš - severozapadno od Suve planine, Piroć - istočno od Suve planine i Leskovac - jugozapadno od Suve planine.

6.2. Klimatske karakteristike

Na istražnom području zastupljena je umereno-kontinentalna klima sa karakterističnim dugim i hladnim zimama i relativno toplim letima. Deo područja na nadmorskim visinama iznad 800 m ima karakteristike planinske klime.

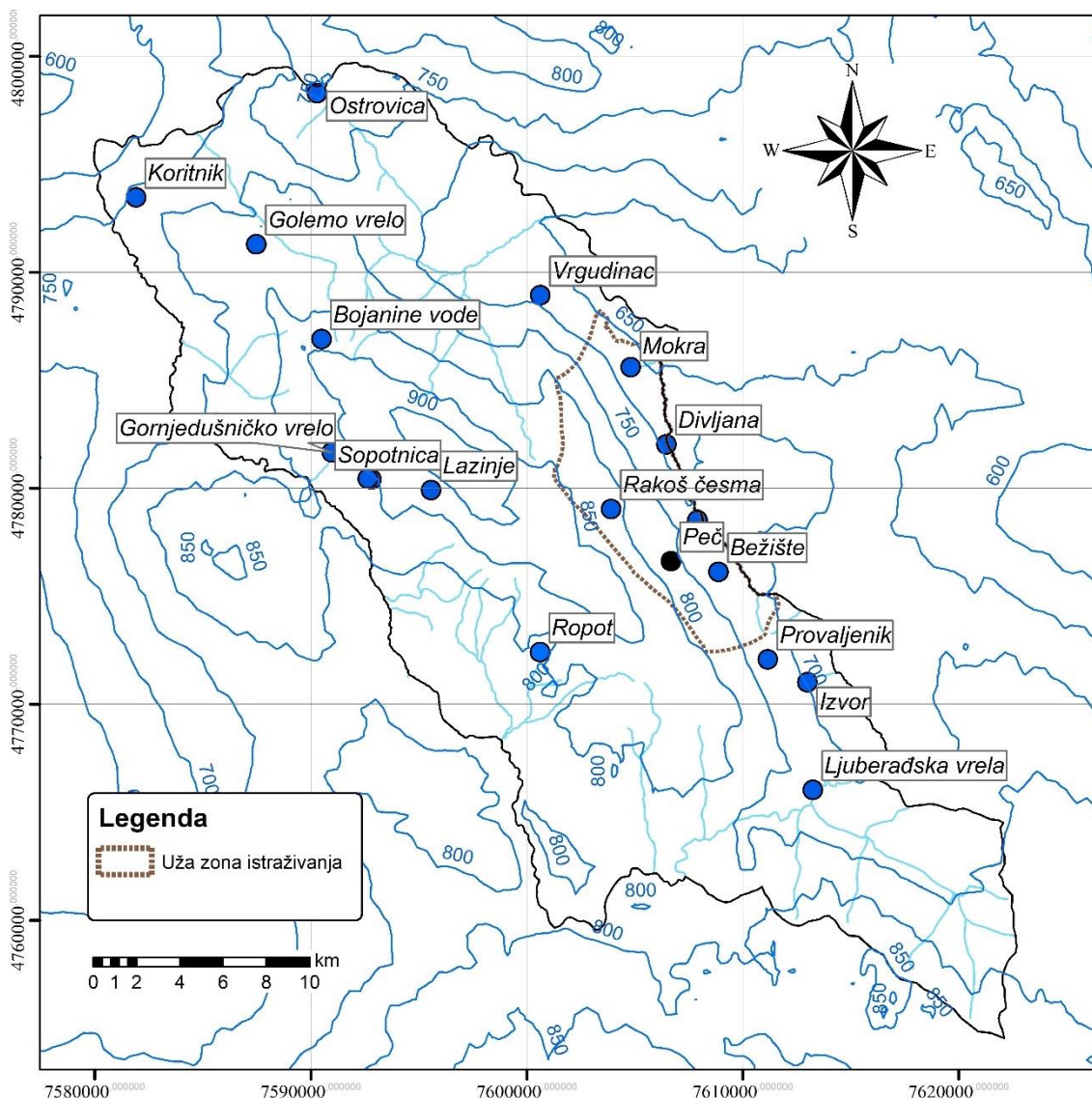
Padavine. U cilju analize pluviometrijskog režima i njegovog uticaja na režim podzemnih i površinskih voda istražnog područja korišćeni su raspoloživi podaci Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije (RHMZ) za period od 1991–2018. godine (mesečne vrednosti), sa klimatoloških stanica Babušnica i Bela Palanka koje se nalaze u neposrednoj blizini užeg istražnog terena, kao i klimatološke stanice Niš sa koje su preuzete dnevne vrednosti padavina. Takođe, iskorišćeni su podaci za period 1961-2010. godina (Milovanović et al, 2017) za izradu karte izohijeta (Slika 6.5.).

Srednje višegodišnje sume padavina za analizirani period 1991-2018. godina imaju vrednosti 680,9 mm (Babušnica), 619,6 mm (Bela Palanka) i 593,8 mm (Niš) (Tabela 6.1.).

Tabela 6.1. Ekstremne godišnje sume padavina na klimatološkim stanicama (RHMZ, Beograd), Babušnica: za period od 1991-2018; Niš: za period 1991-2018; Bela Palanka: 1992-2016.

	Klimatološka stanica	m.n.m.	Pmax	P god max	Pmin	P god min
1	Babušnica	520	995,9	2010	363,8	2000
2	Bela Palanka	333	831,2	2014	320,3	2011
3	Niš	202	942,7	2014	326,5	2000

Maksimalna srednja mesečna suma padavina u periodu 1991-2018. godine izlučuje se krajem proleća i početkom leta (maj–jun) (Tabela 6.2., Slika 6.6.), a minimalne količine padavina zavise od meteorološke stanice (nadmorske visine), pa se u Babušnici najmanje padavina u vidu kiše izluči tokom februara i marta, a u Beloj Palanci i Nišu tokom avgusta i tokom perioda januar-februar.

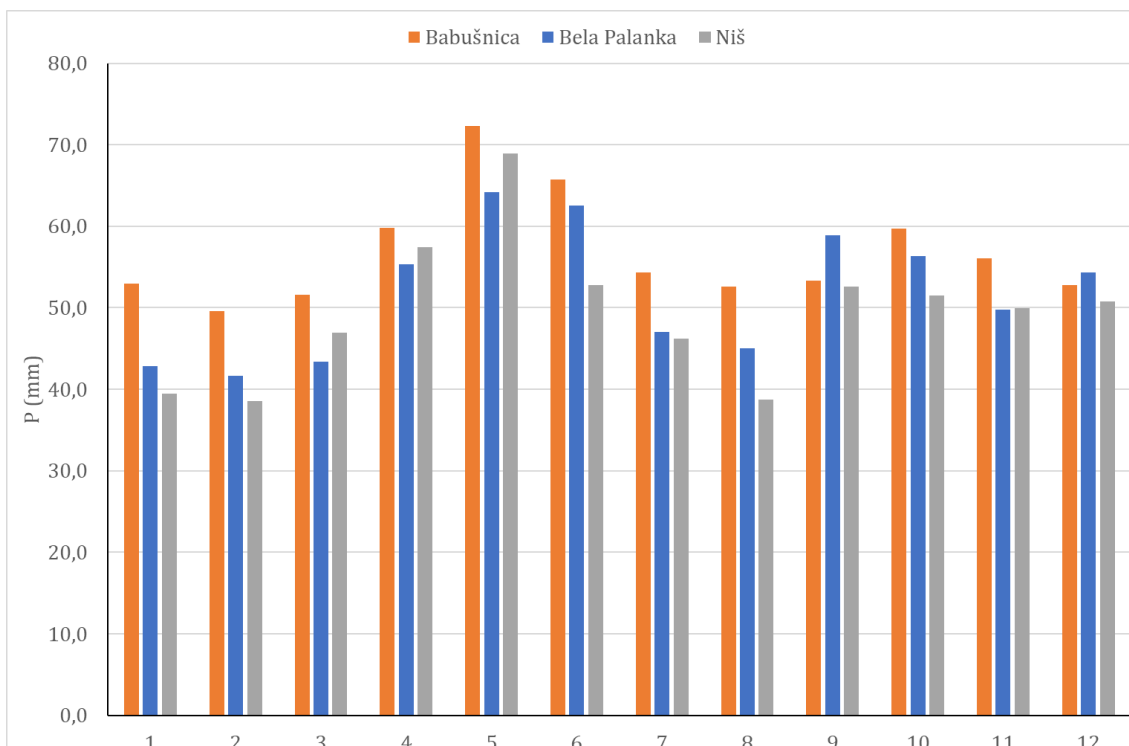


Slika 6.5. Karta izohijeta srednjih godišnjih suma padavina (mm) za period 1961-2010. godine (RHMZ, Beograd) sa lokacijama hidrogeoloških pojava

Tabela 6.2. Srednje mesečne i srednja godišnja suma padavina (mm) za period 1991-2018. godine, za klimatološke stanice „Babušnica“-1, „Bela Palanka“-2 i „Niš“-3 (RHMZ, Beograd)

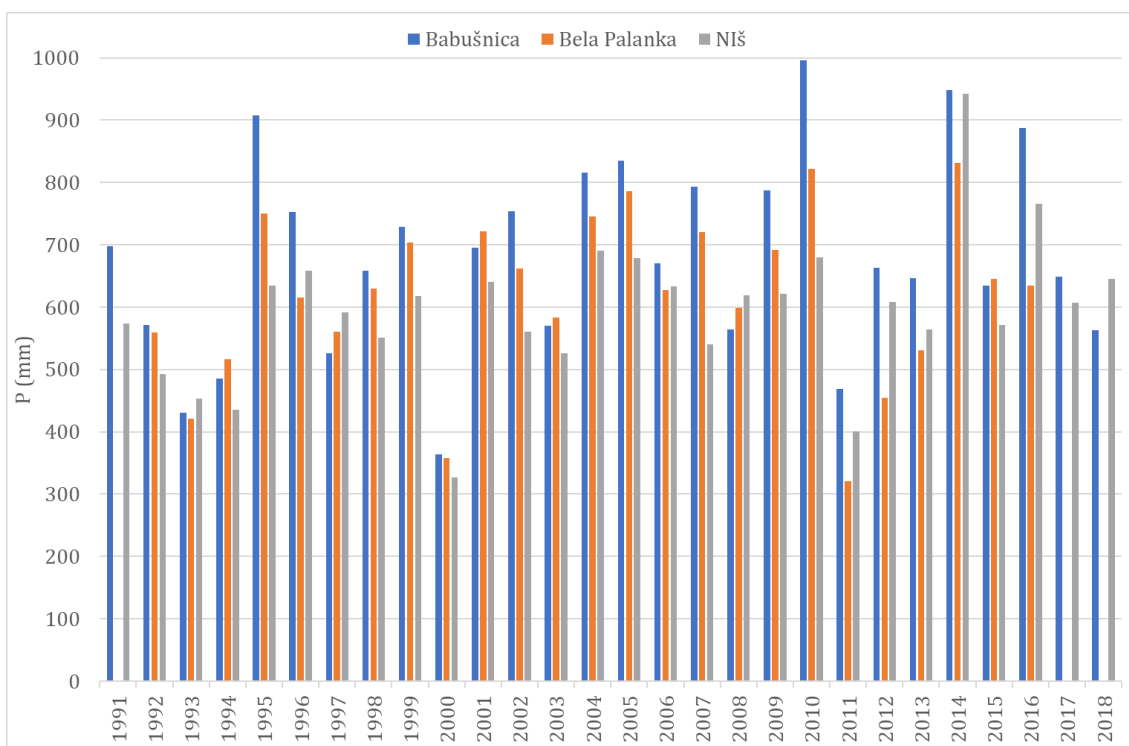
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	god
1	52,9	49,6	51,6	59,8	72,3	65,7	54,4	52,6	53,3	59,7	56,0	52,8	680,9
2*	42,8	41,6	43,4	55,3	64,2	62,6	47,0	45,0	58,9	56,3	49,7	54,3	621,3
3	39,4	38,6	46,9	57,4	68,9	52,8	46,2	38,7	52,6	51,5	50,0	50,8	593,8

*1992-2016. godine



Slika 6.6. Histogram srednje mesečnih suma padavina (mm) za period 1991-2018. godine (RHMZ, Beograd)

Posmatrano u višegodišnjem vremenskom periodu (Slika 6.7.) najmanje količine padavina su izlučene 2000 i 2011 na svim stanicama, ali je minimum u Babušnici i Nišu bio 2000. godine i iznosio je 363,8 mm i 326,5 mm respektivno, dok je u Beloj Palanci 2011. godine iznosio 320,3 mm.



Slika 6.7. Histogram godišnjih suma padavina (mm) za referentni period 1991-2018. godine, za klimatološke stanice „Babušnica“, „Bela Palanka“ i „Niš“ (RHMZ, Beograd)

Može se uočiti da ne postoji neki određen trend u poslednjih 20 godina u smislu opadanja ili povećavanja količine padavina na ovom području, ali postoji smenjivanje kišnijih godina i onih sa manjom količinom padavina svake treće godine.

Temperatura vazduha. Za analizu temperaturnih odlika korišćeni su podaci RHMZ Srbije sa istih klimatoloških stanica za period 1991-2018. godine. Srednje mesečne i godišnje vrednosti temperatura vazduha za period od 1991-2018. godine date su u Tabeli 5.3.

Tabela 6.3. Srednje mesečne i godišnje vrednosti temperature vazduha (°C) za period 1991-2018. godine, za klimatološke stanice „Babušnica“-1, „Bela Palanka“-2 i „Niš“-3 (RHMZ, Beograd)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	god
1	-0,4	1,4	5,8	10,9	15,7	19,5	21,3	21,1	16,1	11,0	5,7	0,8	10,7
2*	0,5	2,3	6,5	11,6	16,3	19,9	21,9	21,8	16,6	11,7	6,7	1,9	11,5
3	1,2	3,3	7,7	12,7	17,5	21,2	23,2	23,3	18,3	13,1	7,8	2,4	12,6

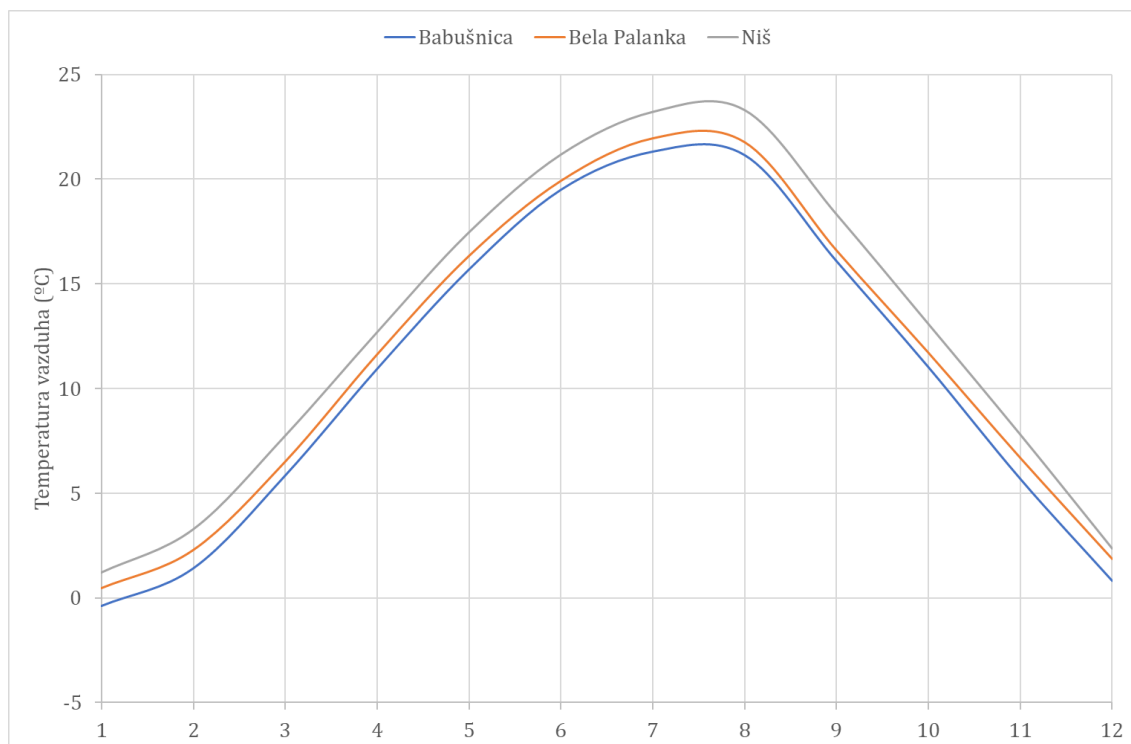
*1992-2016. godine

Srednja višegodišnja temperatura vazduha, za klimatološku stanicu Babušnica, za period od 1991-2018. godine iznosi +10,7°C. U ovom periodu najniža srednje godišnja temperatura je izmerena 2005. godine (+9,3°C), dok je najviša izmerena 2018. godine (+12,6° C). Najhladniji mesec je januar sa srednjom mesečnom temperaturom za višegodišnji period od -0,4°C. Najtopliji mesec je avgust sa prosečnom srednjom mesečnom temperaturom za višegodišnji period od +21,3°C.

Srednja višegodišnja temperatura vazduha, za klimatološku stanicu Bela Palanka, za period od 1992-2016. godine iznosi +11,5°C. U ovom periodu najniža srednje godišnja temperatura je izmerena 2005. godine (+10,4°C), dok je najviša izmerena 2007. godine (+12,3°C). Najhladniji mesec je januar sa prosečnom srednjom mesečnom temperaturom za višegodišnji period od +0,5°C. Najtopliji mesec je avgust sa prosečnom srednjom mesečnom temperaturom za višegodišnji period od +21,9°C.

Srednja višegodišnja temperatura vazduha, za klimatološku stanicu Niš, za period od 1998-2017. godine iznosi +12,6°C. U ovom periodu najniža srednje godišnja temperatura je izmerena 1991. godinu (+10,6°C), dok je najviša izmerena 2007. godine (+13,8°C). Najhladniji mesec je januar sa prosečnom srednjom mesečnom temperaturom za višegodišnji period od +1,2°C. Najtopliji mesec je septembar sa prosečnom srednjom mesečnom temperaturom za višegodišnji period od +23,3°C.

Generalno, za celo područje se može izvesti zaključak da u toku jedne kalendarske godine temperatura vazduha ima stalni rast (Slika 6.8.) od najhladnijeg meseca januara, pa do najtoplijeg jula, a zatim opada do decembra.

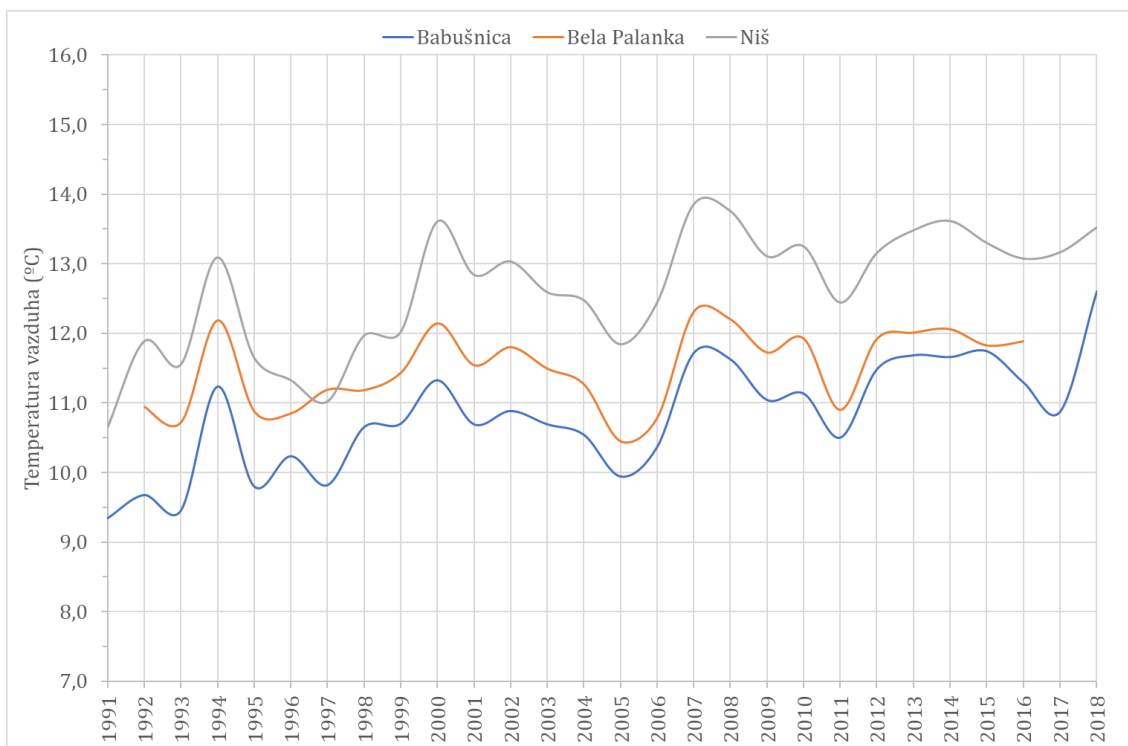


Slika 6.8. Srednje mesečne vrednosti temperature vazduha (°C) za period 1991-2018. godine, za klimatološke stanice „Babušnica“, „Bela Palanka“ i „Niš“ (RHMZ, Beograd)

Posmatrano u višegodišnjem periodu (Slika 6.9.) najmanja prosečna godišnja temperatura zabeležena u Babušnici je +9,9°C, dok je u Beloj Palanci 10,4°C i u Nišu 11,8°C, iste 2005. godine. Najviša prosečna temperatura zabeležena u Babušnici je +11,7°C, 2007. i 2015. godine, u Beloj Palanci je iznosila +12,3°C 2007. godine, a u Nišu su najtoplije bile 2007. i 2008. godina sa 13,8°C.

Maksimalna srednjemesečna temperatura u navedenom periodu od 27 godina u Babušnici je zabeležena avgusta 2012. godine +24,8°C, u Beloj Palanci najtopliji mesec bio je, takođe avgust 2012. godine sa zabeleženih +24,8°C, u Nišu je takođe najtopliji bio avgust 2012. godine sa 26,4°C. Najhladniji mesec u Babušnici bio je januar 2000. godine -4,7°C, a jako hladan bio je i decembar 2001. godine sa prosekom od -4,5°C, u Beloj Palanci najmanja srednjemesečna temperatura -3,5°C, bila je zabeležena decembra 2001. godine i ponovo februara 2012. godine, a u Nišu najhladniji mesec je bio januar 2017. godine sa prosekom od -4,5°C.

Možemo uočiti da postoji porast srednje godišnje temperature vazduha (Slika 6.8.) na sve tri merne stanice, koji nije zanemarljiv (u proseku za oko 1,5°C) u toku referentnog perioda 1991-2018. godine.



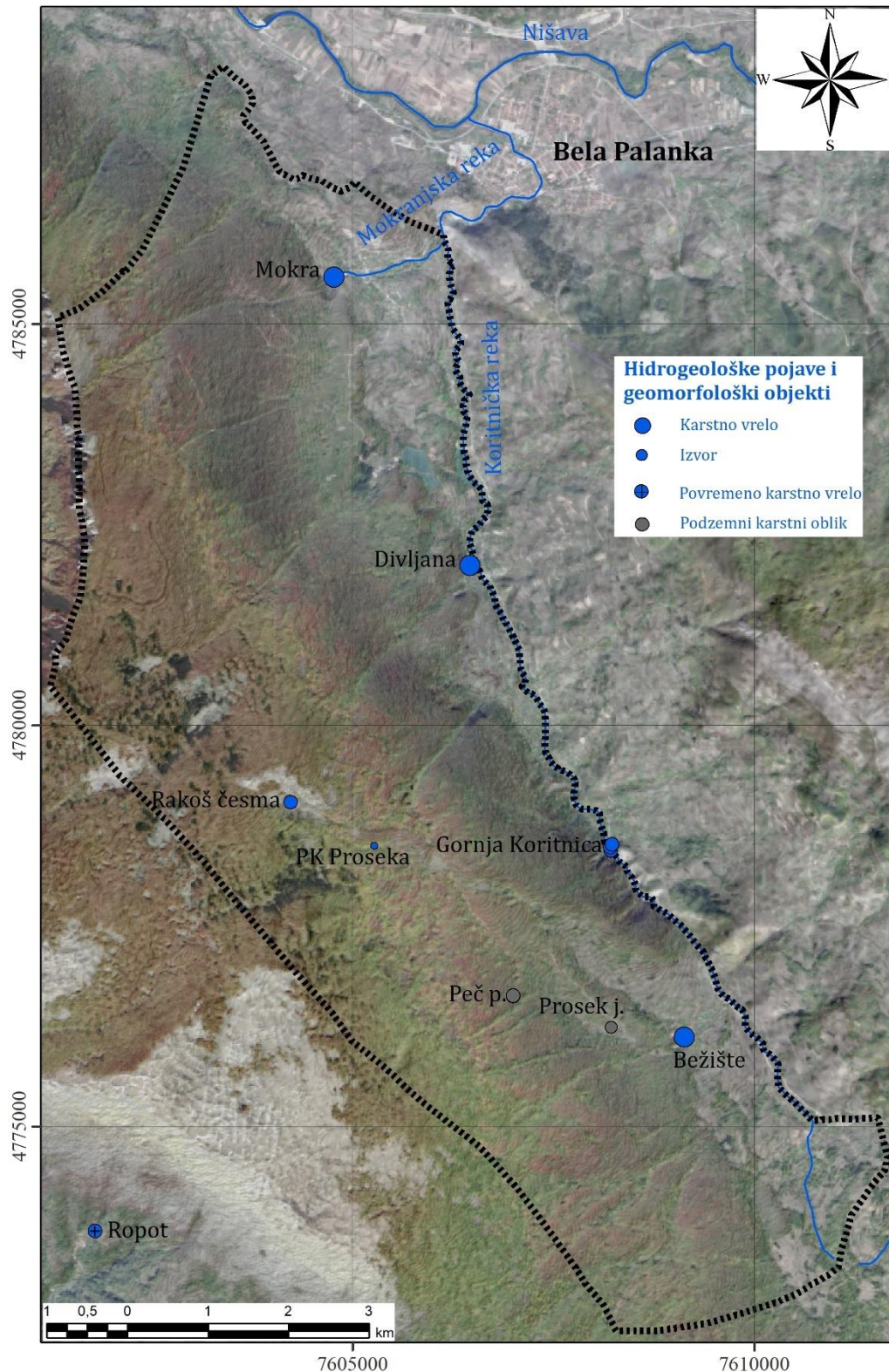
Slika 6.9. Dijagram prosečnih godišnjih temperatura (°C) za period 1991-2018. godine, za klimatološke stanice „Babušnica“, „Bela Palanka“ i „Niš“ (RHMZ, Beograd)

6.3. Hidrološke karakteristike

Rečna mreža je razvijena samo u podnožju Suve planine, dok na njoj površi nema stalnih rečnih tokova. U okviru užeg područja istraživanja (Slika 6.10.) postoje samo 2 stalna površinska toka, Mokranjska reka i Koritnička reka. Postoji nekoliko povremenih tokova koji su (svi) aktivni samo za vreme dužih i obilnijih prolećnih padavinskih epizoda, kombinovanih sa otapanjem snega.

Prihranjivanje površinskih rečnih tokova na račun pražnjenja karstne izdani uslovalo je i formiranje karstnog režima površinskih tokova na istražnom terenu. Izražena amplituda između minimalnih i maksimalnih proticaja u toku godine, kao i karakteristični bujični tokovi i pojave poplavnih talasa u periodima otapanja snežnog pokrivača ili pri jakim pljuskovima, glavne su karakteristike ovog režima.

Koritnička reka, nastaje od nekoliko povremenih tokova u podnožju Suve planine u ataru sela Resnik, oko 12 km južno od Bele Palanke. Nakon nastanka teče pod nazivom Bežiška reka na severozapad (Kostić, 1953). Gornji tok reke usečen je u epigenetsku klisuru Bežiško Ždrelo, gde je reka usekla meandre u donjokrednim krečnjacima i duž kojih za vreme leta presuše/ponire. Ponovo se pojavljuje od mesta izviranja Gornjekoritničkih vrela, ovog puta kao stalni vodotok sve do ušća tj. spajanja sa Mokranjskom rekam, nizvodno od sela Mokra. Koritnička reka ima najveći vodostaj tokom aprila, dok je sporedni maksimum vodostaja u novembru. Najmanji vodostaj je avgusta i septembra (manje od 1 m³/s), kao i u zimskim mesecima. Glavne pritoke tj. priliv vode u reku potiče od karstnih vrela i izvora sa njene leve strane: Bežište, Gornja Koritnica, Divljana i Mokra, i sa desne strane od povremenog Šljivovičkog potoka (koji se formira od povremenih izvora ispod Šljivovičkog visa) u visini sela Bežište. Vode reke su se ranije koristile za pogon valjalica, mlinova i strugara. Vode reke se koriste i za navodnjavanje povrtarskih kultura, ali u jako ograničenoj količini.



Slika 6.10. Hidrografska mreža užeg istražnog prostora (Landsat-8 image courtesy of the U.S. Geological Survey)

Koritnička reka naziva se Mokranjska reka nakon što sa leve strane prihvati vodu iz vrela Mokra, nizvodno od istoimenog sela (Kostić, 1953), i menja smer tečenja u severoistočni, probija se kroz još jednu epigenetsku klisuru – Mokranjsko Ždrelo, i nakon oko 1500 metara, na samom ulazu u Belopalanačku kotlinu prihvata i vode Belopalanačkog vrela. Još jednom menja smer tečenja u severozapadni i uliva se u reku Nišavu na severnom obodu Bele Palanke.

Na reci Koritnici predložene su za izgradnju 2 derivacione mini-hidroelektrane (MHE)¹⁰ koje treba da „iskoriste“ hidropotencijal ove rečice (Tabela 6.4.). MHE „Donja Koritnica“ je izgrađena 2016. godine. „Tirolski“ zahvat vode je pozicioniran na mestu gde vodotok ulazi u Bežiško Ždrelo, nizvodno od sela Bežište, dok je zgrada MHE uzvodno od sela Donja Koritnica. Druga MHE je „u izgradnji“, zahvat treba da bude lociran nizvodno od sela Donja Koritnica, a zgrada MHE da bude izgrađena nizvodno od spajanja Koritnice i Mokranjske reke, u okviru Mokranjskog Ždrela.

Tabela 6.4. Osnovni podaci o MHE na reci Koritnici (Katastar MHE, www.elektrosrbija.rs)

Broj u katastru MHE	Naziv MHE	Instalisani proticaj (m ³ /s)	Pad (m)	Snaga (kW)	godišnja proizvodnja (kWh)	tip turbine	broj turbina
155	Bela Palanka	1,050	75,5	660	2.836.000	Francis	2
156	Donja Koritnica	0,764	137,0	750	3.201.000	Pelton	2

6.4. Geomorfološke karakteristike

Prve podatke o pećinama i podzemnoj hidrografiji Suve planine dao je *Cvijić J.* (1895), koji je detaljno opisao podzemne tokove istočne Srbije i na stranama Suve planine konstatovao brojne karstne izvore, i neke od njih detaljno opisao. Suvu planinu je *Cvijić J.* (1912) podelio na tri dela: potkovičasti greben, obluk Crvene reke i površ Valožja, ali i prvi put spominje „male obluke, koji su slični glacijalnim cirkovima“, koji mu sa kasnijim otkrićima iz Bugarske (planina Rila) omogućili donošenje zaključaka o postojanju glacijacije i na prostorima Balkana. Na Suvoj planini je *Nikolić R.* (1913) je opisao izvesne oblike koji podsećaju na glacijalne, pa je na osnovu toga pretpostavljao da je ova planina „u glacijalna doba bila zaglečerenana“.

Petrović J. (1958), a zatim i *Milić Č.* (1959, 1960, 1962 i 1970) daju doprinos poznavanju geomorfoloških odlika pojedinih delova Suve planine (Slika 6.11.), a pre svega procesa karstifikacije, zatim erozije zemljišta i nastanka površinskih i podzemnih oblika, uz navođenje hidrogeoloških pojava i njihovih osnovnih karakteristika, u okviru svojih radova u kojima se bave regionalnom problematikom. *Petrović J.* (1974) analizira uslove nastanka karsta, hidrološke pojave i odlike, i površinske i podzemne pojave i oblike reljefa istočne Srbije, a isti autor (1976) izdvaja pećine i jame Srbije pa tako u slivu Nišave, na Suvoj planini izdvaja 4 značajnija podzemna oblika. *Stevanović Z.* (1991) daje opšti pregled geomorfoloških odlika terena Suve planine (Trem, 1810 m.n.m.) i erozionih i akumulacionih oblika nastalih kao posledica karstnog procesa, i navodi važnije hidrogeološke pojave.

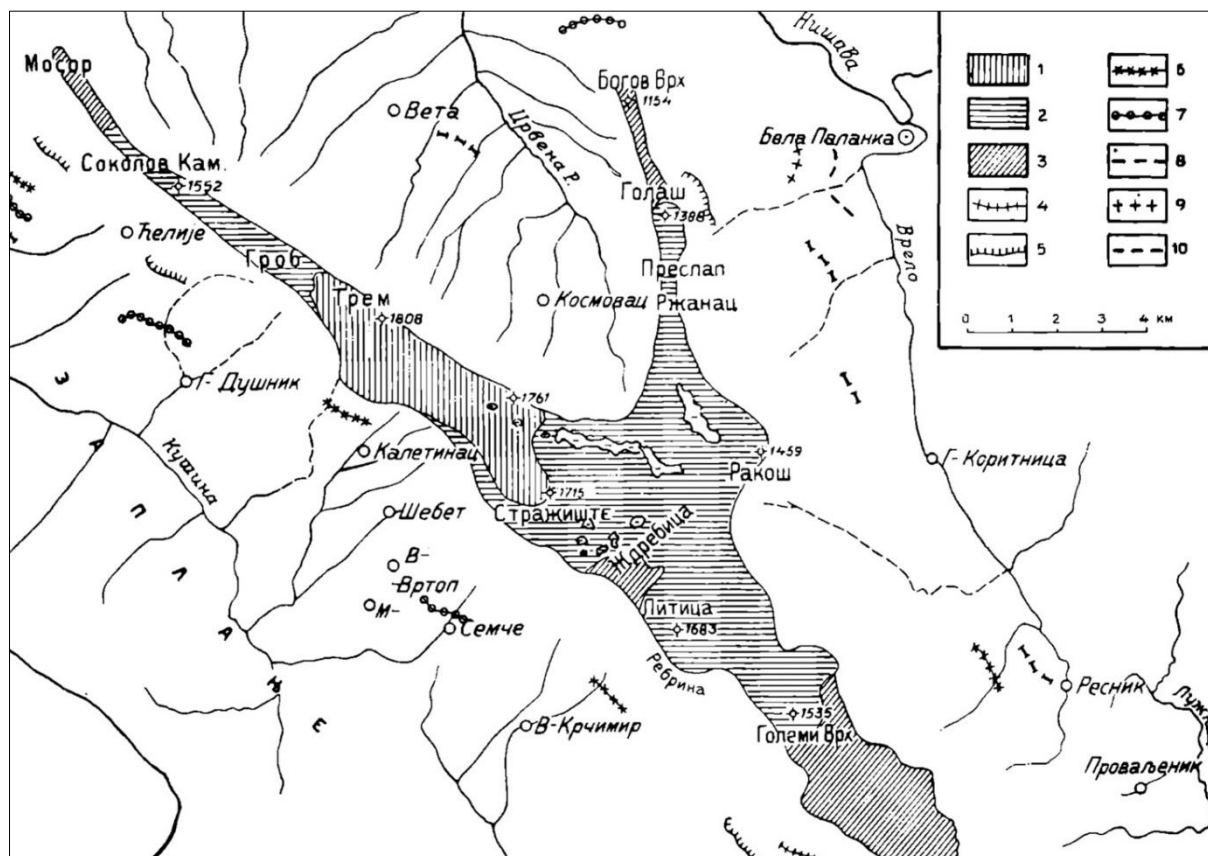
Južni deo planine čini visoravan sa puno nižih vrhova na nadmorskoj visini od 1000 m.n.m do 1600 m.n.m. Ova visoravan je pretežno obešumljena, prekrivena pašnjacima, a na pošumljenim delovima obrasla je mešovitom šumom.

Suva planina se u vidu potkovice (lučno) prostire počev od sela Ljuberađa (Opština Babušnica) ka severozapadu u dva smera: severnim krakom do Crvene Reke i severozapadnim krakom do Niške Banje. Na severozapadnom delu planine, na njenoj „sredini“ nalazi se visoravan Rakoš,

¹⁰ U ovom trenutku postoji velika polemika oko upotrebne vrednosti MHE, i njihove „zelene“ energije, tj. negativnih efekata koje ova postrojenja imaju na ekosisteme koji zavise od predmetnih vodotokova, pa je većina projekata suspendovana ili otkazana od strane lokalnih uprava.

nadmorske visine od 1250 m do 1450 m. Na Rakošu, na nadmorskoj visini od 1260 m, ispod vrha Trešten (1470 m.n.m.) nalazi se najznačajniji izvor na samoj planini, Rakoš česma. Nakon Rakoša ka severu, Suva planina se račva na dva dela:

1. severni krak koji se prostire do sela Crvena Reka na teritoriji opštine Bela Palanka. Vrhovi ovog kraka su visine oko 1450 m.n.m.,
2. severozapadni krak koji se prostire do Niške Banje i predstavlja najviši deo Suve planine (Trem 1810 m.n.m.).



Slika 6.11. Jedna od prvih geomorfoloških karata Suve planine (Milić, 1962, prema Cvijić, 1912), Legenda: 1-paleoreljef, 2-površ Valožja, 3-Nišavska eroziona površ, 4-površ od 900-950 m, 5-površ od 800-840 m, 6-površ od 690-750 m, 7-površ od 590-640 m, 8-površ od 540-560 m, 9-površ od 490-520 m, 10-površ od 420-440 m

Lučni greben Suve planine predstavlja ostatke krila velike antiklinale od valendskih i otrivskih krečnjaka (Milić, 1962). U toku kontinentalne faze razvoja reljefa, krajem gornje krede do donjeg miocena, rečni tokovi su se razilazili od temena ove antiklinale. Dolazi do erozije krednih i jurskih krečnjaka i otkrivanja paleozojskog jezgra antiklinale. U donjem miocenu formiraju se slatkovodna jezera u Jelašničkom, Lužničkom i Koritničkom basenu, kada dolazi do taloženja sedimenata koji danas čine osnovu ovih basena (tercijarni profil kod manastira Sv. Dimitrija). Površ Valožja predstavlja poslednju etapu donošenja crvenog alogenog materijala koja je prethodila novim intenzivnijim tektonskim pokretima, koji izdižu površ i onemogućuju dalju fluvijalnu eroziju, pa je stoga na površi dobro razvijen proces karstifikacije.

Planinski deo terena se karakteriše jako razuđenim reljefom sa velikim visinskim razlikama, što je uslovljeno geološkom građom.

Koritnička kotlina ima morfološki blaži reljef, pruža se sa severoistočne strane Suve planine paralelno sa planinskim grebenom. Nadmorska visina kotline se kreće između 300 i 600 m, dok je najniža tačka na ulasku u Belopalanačku kotlinu. Koritnička kotlina je dugačka 9 km, a najveća

širina iznosi 2,5 km, pruža se pravcem jugozapad-severoistok. Kotlina počinje na izlazu iz tzv. Bežiškog Ždrelo, a završava se na ulazu u Mokranjsko Ždrelo (Kostić, 1953). Sastoji se iz gornjeg dela koji je u vidu klisure i donjeg erozionog proširenja. Reka Koritnica koja se probila kroz klisuru i formirala dolinu nema pritoka, osim Šljivovičkog potoka i Mokranjske reke.

Epigenetska klisura Bežiško Ždrelo povezuje Bežiško-resničko proširenje i donji deo Koritničke kotline i razdvaja padine Suve planine i Šljivovičkog vrha. U ždrelo su usečena tri uklještena meandra (Milić, 1962). U gornjem delu ždrelo pad u koritu je veći, zbog čega reka nosi velike količine drobinskog materijala, koji se taloži na izlazu iz klisure. Na taj način često budu zasuta Gornjekoritnička vrela.

6.4.1. Površinski karstni oblici

Površinski karstni oblici prisutni su na skoro svim delovima istočne padine Suve planine, uprkos postojanju guste šumske (visoke i niske) vegetacije.

Izdanci krečnjačkih stena su na površini karstifikovani, a ivice ublažene korozivnim delovanjem vode. Na nekoliko lokacija krečnjak je karstifikovan u vidu izraženih škrapa – žlebova (hridi). U pitanju je oblik čija visina i do 3x prevazilazi širinu, a površine su uglačane dejstvom vode i obrasle mahovinom (Slika 6.12.).



Slika 6.12. Izdanci krečnjaka u vidu izraženih škrapa – žlebova (hridi), visina i do tri puta veća od širine, uglačane površine i obrasli mahovinom

Najčešće su vrtače obrasle žbunastom i visokom šumskom vegetacijom, koja je prisutna na celoj istočnoj padini, ali postoje i vrtače koje su na „otvorenom“ i čije su strane i dno obrasle travom (Slike 5.13. i 5.14.).



Slika 6.13. Vrtača na istražnom terenu obrasla gustom šumskom vegetacijom



Slika 6.14. Vrtače delimično ili potpuno srasle ($R > 20$ metara), travnati pokrivač (foto: Geograf208, Wikimedia)

6.4.2. Podzemni karstni oblici

Petrović J. (1976) izdvaja pećine i jame Srbije prema slivovima reka u kojima su formirane, pa tako u slivu Nišave, a na Suvoj planini izdvaja pećinu Peč u Barskom Hridu i pećinu Orlovicu u Ostrovici, severno od područja koje je bilo predmet detaljnih istražnih radova, kao i 2 jame: Jama u Konjskom i Ledenica u Ždrebici (na zapadnoj padini Suve planine). Podzemni karstni oblici su na istočnim padinama Suve planine prisutni, ali ne kao na severnim i zapadnim okomitim krečnjačkim liticama.

Peč u Barskom Hridu (Cvijić, 1895; Petrović J., 1976) nalazi se u ataru sela Toponice, veličina otvora pećine je 9,5 x 8 m, a ukupna dužina istraženih kanala je 80 metara. Pećina ima 3 nivoa kanala od čega se glavni kanal pruža ka istoku i na samom kraju savija na severoistok.

Ulaz u pećinu Orlovica (Petrović J., 1976) nalazi se na vertikalnoj litici ispod Oblika, širok je oko 3 metra, a visok preko 6 metara. Kanal je jednostavnog izgleda i brzo se sa dužinom sužava, ispitan je do dužine od 17 m.

Jama u Konjskom (Petrović J., 1976), nalazi se južno od Preslapa, u ataru sela Divljana, na visini od 1280 m.n.m. Dubina iznosi 48 metara, a ukupna dužina ispitanih kanala 106 metara. Ulaz se nalazi pri vrhu skaršćene doline (uvale), eliptičnog je oblika dužine 4,8 m, a širine 2,8 metara.

Ledenica u Ždrebici (Cvijić, 1895, Petrović J., 1976) nalazi se u jugozapadnom delu Valožja, na visini od 1400 m.n.m. u ataru sela Veliki Krčimir. Ukupna dubina jame je oko 24 metara. Jama ima tri otvora, prečnika od 11, 5 i 1,5 metara.

Podzemni karstni oblici su na istočnim padinama Suve planine prisutni, ali ne kao na severnim i zapadnim okomitim krečnjačkim liticama. Podzemni karstni oblici otkriveni na užem prostoru istraživanja su jama Prosek i pećina Peč, u ataru sela Bežište. Ulaz u jamu Prosek se nalazi na visini 710 m.n.m. nedaleko od povremenog toka Bukovice (Slika 6.15. levo), na oko 1100 metara jugozapadno od centra sela. Dimenzije otvora jame su 1,5x0,5 metara, dok je dubina jame oko 2 metra. Ulazni otvor pećine Peč nalazi se na visini od 885 m.n.m. (Slika 6.15. desno), na oko 2300 metara zapadno do sela Bežište. Pećinski kanal je jednostavnog tunelastog oblika, dug oko 20 metara, a na najvišem delu dvorana je visoka 10,43 metara.



Slika 6.15. Ulaz u jamu Prosek (levo) i ulaz u pećinu Peč (desno)

6.5. Geološke karakteristike

6.5.1. Pregled ranijih geoloških istraživanja

Grupa autora Saveznog Geološkog Zavoda SFRJ (SGZ-SFRJ) (Vujisić et al, 1971, Rakić et al, 1973, Petrović et al, 1973) izradila je listove OGK SFRJ sa Tumačem, razmere 1:100.000: Bela Palanka, Niš i Vlasotince i na njima je data, do sada, najdetaljniji pregled geološke građe i tektonskih karakteristika područja Suve planine i šire okoline. Međutim, kako su i sami autori ovih listova karte i pratećih tumača napomenuli, podaci o terenu koji je obuhvaćen detaljnim istraživanjima, istočne padine Suve planine, mogu se naći u radovima većeg broja geologa. Mali broj autora, međutim, neposredno i detaljnije obrađuje ovaj prostor, dok je znatno veći broj onih koji se ovog terena dotiču u okvirima regionalnih prikaza znatno šire oblasti.

Prema Tumaču za OGK SFRJ list Bala Palanka (Vujisić et al, 1971) prve podatke o krečnjacima Suve planine je publikovao *Boue A.* (1836, 1840, 1870), za koje smatra da su trijaske starosti. Zatim *Viquesnel A.* (1842) na svojoj „Carte d'une partie de la Servie et de l'Albanie" obuhvata tercijar Zaplanja, a istočni obod, odnosno Suvu planinu, definiše kao kredu. *Hochstetter F.* (1872) prikazuje Suvu planinu kao trijas i juru. *Toula F.* je u dva maha proputovao ove terene i ostavio prikaze pojedinih lokalnosti na Suvoj planini (1857, 1889), na kojoj je prvi paleontološki dokumentovao kredu.

Od domaćih istraživača *Žujović J.* (1889, 1893) prvi u „Osnovama za geologiju Srbije" i „Geologiji Srbije" piše o Zaplanju, Suvoj planini, Belavi i Lužnici. Na Suvoj planini je izdvojio azojske i paleozojske škriljce, crvene pešcare perma, trijas, juru i kredu, slatkovodni tercijar sa ugljem, kvartarne terase i bigar. Iz perioda pre prvog svetskog rata priloge o geologiji ostavio je i *Antula D.* (1900, 1908, 1910). *Cvijić J.* je pisao o karstu Suve planine (1912). O mogućem postojanju glečera na Suvoj planini pisao je *Nikolić R.* (1913). Najviše podataka o ovom terenu pružio je *Petković K.* (1929, 1930, 1932, 1937, 1938, 1949, 1950, 1953, 1961, 1965). Na Suvoj planini *Petković K.* je izdvojio i opisao: kristalaste škriljce, paleozoik, karbonske škriljce, crvene pešcare perma, trijas, lijas, valend, otriv, barem, apt, senon, gornjeoligocenko-donjomiocenske sedimente, kao i neogen uopšte, a od eruptivnih stena andezite, mikro - granite, bazalte i mikrogranulite (Slika 6.16.). Početak glavnog ubiranja vezuje za kraj gornje krede, sa kretanjima usmerenim na severoistok. Pored priloga o različitim problemima geologije istočne Srbije, kada se doticao i ovoga terena, *Petković K.* je pisao i o zoogeno-sprudnim krečnjacima Suve planine kao titon-valendijskim (1950).

Čičulić M. (1961) u sklopu paleontoloških istraživanja, koje vrši Zavod za geološka i geofizička istraživanja, određuje starost sedimenata Zaplanjskog basena kao miocensko-pliocensku. *Danilova A. i Anđelković J.* (1968) su na SI padinama Suve planine mikropaleontološki potvrdili prisustvo svih katova gornje jure i donje krede zaključno sa baremom.

Tektonski sklop ovoga terena su obrađivali brojni autori u okviru razmatranja tektonike istočne Srbije (SGZ, 1971). *Petković K.* (1961) na svojoj tektonskoj karti Jugoslavije u okviru ovoga prostora izdvaja moravsku navlaku, ridanjsko-krepoljinsku zonu (kraljušt) i zonu Rtnja i Kučaja (navlaku). *Grubić A. i Antonijević I.* (1966) izdvajaju: srpsko-makedonski masiv, golubačko-penkovsku strukturnu jedinicu, gornjačko-suvoplaninski antiklinalni pojas, rtanjsko-kučajsku horstantiklinalnu zonu, timočko-srednjegorsku eruptivnu zonu i tupižničko-knjaževačku sinklinalu. *Anđelković M.* (1967) je u istom prostoru izdvojio moravsku, lužničku, gornjačko-suvoplaninsku, kučajsko-svrljišku, timočku i tupižničko-tepošku zonu.



Slika 6.16. Jedna od prvih geoloških karata Suve planine (autor K. V. Petković, 1930)

Legenda: 1-peščari karbona, 2-crveni permski peščari, glinci i konglomerati, 3-peščari trijasa, 4-konglomerati, peščari, laporci i krečnjaci lijasa, 5-krečnjaci valenda, 6-krečnjaci i laporci otriva, 7-krečnjaci barema, 8-peščari i krečnjaci apta, 9-sedimenti oligocena, 10-sedimenti pliocena

6.5.2. Geološka građa terena

Geološka građa Suve planine je kompleksna i posledica je višestrukih tektonskih događaja, koji su doveli do nastanka antiklinale pravca pružanja severozapad-jugoistok i kasnijeg izdizanja njenog severozapadnog dela (Prilog 1). Prikaz geološke građe na geološkoj karti dat je prema Tumačima za OGK SFRJ, listovi Bela Palanka (Vujisić et al, 1971), Niš (Rakić et al, 1973) i Vlasotince (Petrović et al, 1973).

Izdizanje antiklinale dovelo je do erodovanja „pokrovnih“ karbonatnih sedimenata gornjojurske i donjokredne starosti i otkrivanja jezgra antiklinale koje je izgrađeno od devonskih i permskih klastičnih sedimenata. Antiklinala Suve planine je u celini deformisana uzdužnim i poprečnim rasedima, naročito njen SZ deo. Karbonatni sedimenti, najčešće krečnjaci različitog stepena čistoće i dolomiti, izgrađuju krila antiklinale, čiji pad slojeva je ka severoistoku i jugozapadu.

Jezgro Suve planine grade silur-devonske i karbonske stene. Njihovi predstavnici su liditi, gvožđeviti škriljci, krečnjaci, argilošisti, silifikovani filiti, kvarciti i peščari. Iznad njih leže debele naslage permskih peščara, karakterističnih po svojoj crvenoj boji. Ove pokrivaju donjojurski (lijaski) konglomeratični peščari i laporci, a zatim srednjajurski fliš.

Gornju polovinu planine čine skoro isključivo krečnjaci titon-valendijske starosti. Nešto manje zastupljeni su i drugi odeljci iz perioda donje (otriv i barem) i gornje (santon) krede. Od tercijarnih vulkanita zastupljeni su daciti i andeziti, kao i alkalne gabroidne stene. Amfibolski andeziti i njihovi tufovi se nalaze u miocenskim sedimentima, a aglomerati dacita u miopliocenskim, što određuje i njihovu starost. Ostali vulkaniti probijaju starije sedimente, ali im se, takođe, pretpostavlja miocenska starost.

Laporoviti i silifikovani krečnjaci na jednom delu Suve planine javljaju se sporadično i na malim površinama. Krečnjaci su višestruko ubirani, navlačeni i razlamani, tako da su ispresecani brojnim rasednim i drugim pukotinama koje polaze od površine, a završavaju se na dnu krečnjačke mase. Pojave uglja ukazuju da su za vreme trajanja neogenog jezera planine bile pod šumskim biocenozama. O kratkom trajanju šumskih zajednica u ovoj oblasti svedoči mala debljina lignita (uglja) na severnim padinama Suve planine.

Na užem području istraživanja (Slika 6.17.) koje obuhvata istočne padine Suve planine mogu se izdvojiti sledeće litostratigrafske jedinice (Vujisić et al, 1971).

Perm (P)

U antiklinali Suve planine permski sedimenti leže diskordantno preko devonskih. Crveni peščari počinju arkoznim konglomeratima i konglomeratičnim i krupnozrnim arkozama, dok se u višim delovima javljaju slojeviti, ređe bankoviti sitnozrni liskunoviti crveni peščari i alevroliti. Završni deo čine rumeni krupnozrni kvarcni peščari koji gradaciono prelaze u sivocrvene i sive sitnozrne kvarcne konglomerate i peščare. Mogu dostići debljinu do 1000 m. Povlatu im grade donjotrijaski ili srednjojurski sedimenti.

Mezozoik

Trijas (T)

Trijaski sedimenti imaju neznatno učešće u geološkoj građi terena koji je obuhvaćen detaljnim istraživanjima. Otkriveni su samo na krilima antiklinale Suve planine i javljaju se ili u vidu nekoliko kraćih uzanih isprekidanih zona između formacija crvenih peščara i dogerskih sedimenata.

Kampilski slojevi (T₁²)

Pločasti i slojeviti krečnjaci, često peskoviti, zatim dolomiti i arkozni peščari srednjeg zrna. Ispod fosilonosnog dogera prostiru se žućkasti i beličasti dolomiti bez faune. Debljina ovih slojeva iznosi oko 20 metara.

Jura (J)

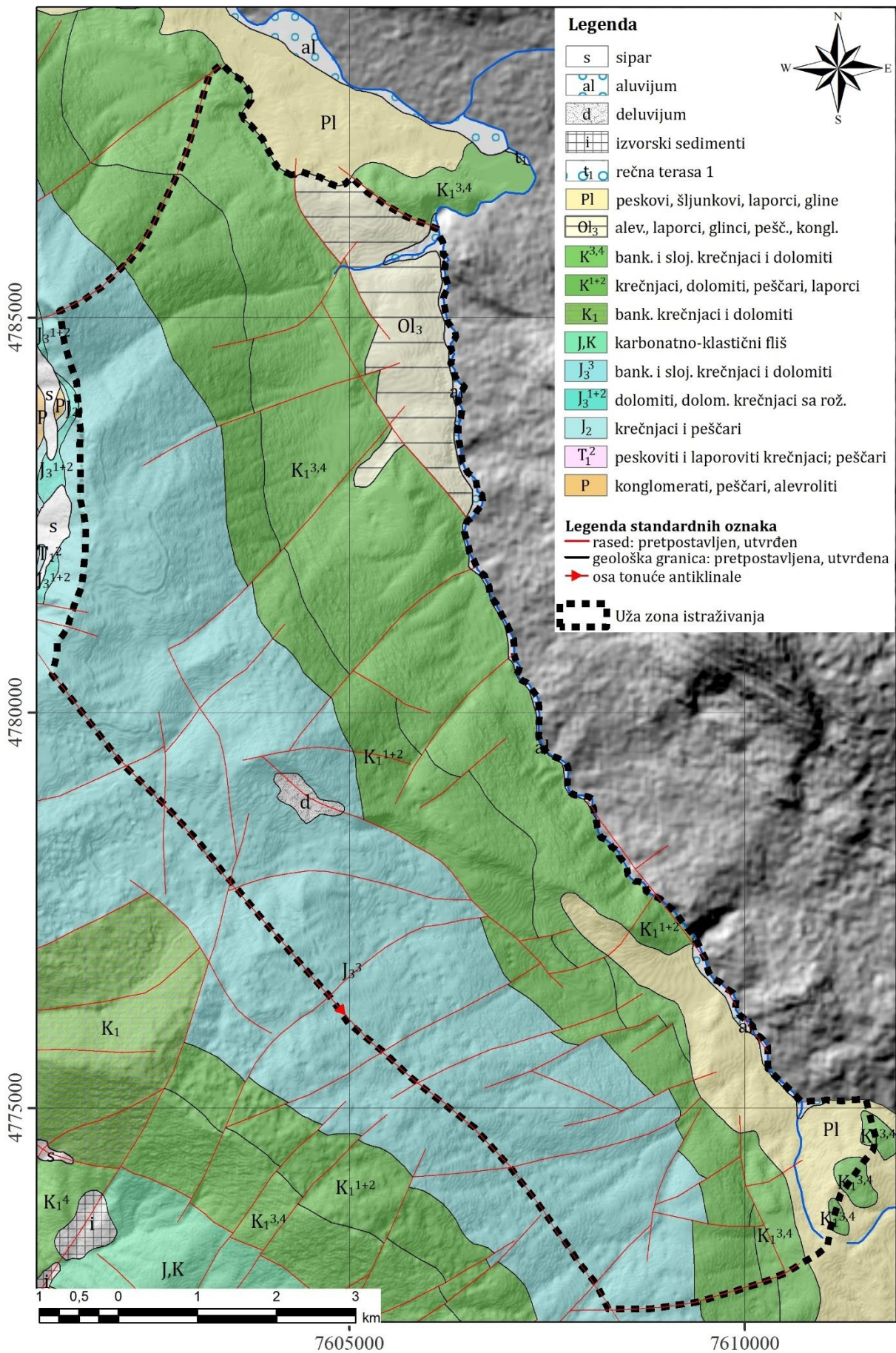
Tvorevine jure izgrađuju znatan deo terena Suve planine. Najviše su zastupljeni karbonatni sedimenti i donekle heterogeni klastični sedimenti.

Srednja jura (J₂)

Sedimenti dogera se pružaju u vidu nekoliko dugih, a uzanih zona duž istočnog krila antiklinale Suve planine (Prilog 1, Slika 6.20.). Srednjoj juri pripadaju peščari i peskoviti intrabiospariti, a ređe i laporoviti i glinoviti krečnjaci koji se međusobno nepravilno smenjuju, a koji su faunistički dokumentovani. Debljina tvorevina srednje jure iznosi oko 20 m.

Oksfordski i kimeridž (J₃¹⁺²)

Dogerski sedimenti redovno prelaze u dolomitično-krečnjačke tvorevine oskudne faunom, posebno makro formama. Sloj počinje dolomitima i jako dolomitičnim krečnjacima, bankovitim ili slojevitim, a iznad njih su krečnjaci, obično intrabiosparitskog tipa, sa proslojcima dolomita koji lokalno sadrže i mogle roznaca. Ukupna debljina ovih slojeva najčešće iznosi 80-100 m.



Slika 6.17. Geološka karta užeg područja istraživanja (prema Vujisić et al, 1971)

Titon (J₃³)

Gornjojurske tvorevine titona, na terenu koji je obuhvaćen ovim istraživanjem uglavnom čine sprudni i subsprudni krečnjaci ili plitkovodni algalno-foraminiferski krečnjaci i dolomiti, koji su naročito razvijeni u višim horizontima, duž ose antiklinale. Debljina sedimenata titonskog kata iznosi prosečno oko 350 metara. Sprudni i subsprudni, bankoviti do slojeviti, krečnjaci su uglavnom razvijeni u JI delu Suve planine. Sadrže faunu gastropoda, obično nerineida (*Nerinea nodosa*, *N. joanjani*, *Ptygmatis carpathica*, *Pt. bruntrutana*, *Pt. staszycii*), diceratida (*Diceras arietinum*, *D. pyriformis*) i drugi lamelibranhijata (*Pecten globosus*), zatim brahiopoda, korala (iz roda *Calamoseris* i *Trochophyllia*), hidrozoo, briozoo i dr. Ovi krečnjaci sadrže i bogatu mikrofosilnu asocijaciju, u kojoj se ističu *Tubiphytes morronensis*, *Conicospirillina basiliensis*, *Mercierella dacica*, girvanele i krupne kodiaceje.

Titon-valendijski fliš (J,K)

Flišni sedimenti se javljaju u vidu jedne šire zone duž jugozapadnog oboda Suve planine, počev od sela V. Krčimir pa na jugoistok. Podina fliša nije otkrivena, a povlatu mu čine postflišni sedimenti donje krede.

Kreda (K)**Donja kreda (K₁)**

U području Crnog bučja, na JZ padini Suve planine, jedan manji deo krečnjačkog kompleksa donjokredne starosti nije mogao biti račšlanjen usled nedostatka faune i nepovoljnog tektonskog položaja. Pretežno bankoviti i deblje uslojeni krečnjaci se nalaze u tektonskom kontaktu prema susednim krečnjacima i dolomitima titona i barem-apta, kao i prema klastičnim sedimentima apta.

Valendijski i otrivski kat (K₁¹⁺²)

Između fosilonosnih titonskih krečnjaka u podini i barem-aptskih u povlati nalaze se fosilima siromašni karbonatni sedimenti koji odgovaraju valendijskom i otrivskom katu. U donjem delu ove dosta homogene jedinice pretežno su mikriti i intrabiospariti, ređe oospariti, dok u višem delu (koji je obično bolje stratifikovan) prevladavaju biomikriti, a česti su i oospariti. Donja granica krede je izvučena aproksimativno u delu stuba gde se još pojavljuju ređe forme *Clypeina jurassica*, a asocijaciji pripadaju *Cayeuxia anae*, druge dazikladaceje, koproliti i aberantne tintinine (*Tintinnopsella dalmatica*, *T. skadrica*, *T. carpathica*, *Campbelliella milesi milesi* i dr). U višem delu javljaju se *Cayeuxia moldavica*, *C. fruticulosa*, *Actinoporella podolica*, ostrakodi i druge forme koje čine asocijaciju poznatu u neokomu istočne Srbije. Debljina valendijskog i otrivskog kata iznosi do 250 m. Kod sela Bežište otkriveni su fosilonosni heterogeni peskoviti i laporoviti krečnjaci sa proslojcima krečnjačkih konglomerata sa peščarskim cementom, kao i laporci. Nalaze se u tektonskom kontaktu sa krečnjacima i dolomitima barem-apta, ili su zaplavljeni terciarnim sedimentima.

Baremski i aptski kat (K₁^{3,4})

Sedimenti haremskog i aptskog kata su plitkovodne tvorevine predstavljene pretežno zoogeno-sprudnim i subsprudnim ili, mnogo ređe, laporovito-peščarskim sedimentima. Neritski zoogeno-sprudni i subsprudni krečnjaci izgrađuju veliki deo Suve planine, čitav njen SI. Predstavljani su najčešće bankovitim ili slojevitim, ređe masivnim krečnjacima urgonske facije, koji se kontinualno razvijaju iz neokoma. Oni sadrže sprudne rekvijenije (*Reguienia ammonia*, *R. lonsdalei*, *R. cf. gryphoides*) i monopleure, zatim *Cardium costata*, kao i brahiopode (*Terebratulla sella*, *Rhynchonella multiformis*) itd. Od mikrofosila su u foraminiferskim krečnjacima nađeni baremski orbitolinidi *Orbitolinopsis flandrini*, *O. elongatus*, *O. cf. kiliani*, *Meyendorffina (Paracos kinolind) jourdanensis*, *M. sunnilandensis* i drugi foraminiferi, ili

mezozojsko-algalna asocijacija sa barem-aptskim orbitolinidima (*Orbitolina cf. discoidea*), zatim *Choffatella decipiens*, *Sabaudia cf. minuta*, raznovrsne *Corallinaceae* i dr. Litološka i biostratigrafska svojstva barem-aptskih zoogeno-sprudnih i subsprudnih sedimenata ne omogućavaju na terenu utvrđivanje njihove međusobne granice, pa ni njihovo detaljnije raščlanjavanje. Njihova prosečna debljina iznosi oko 450 metara.

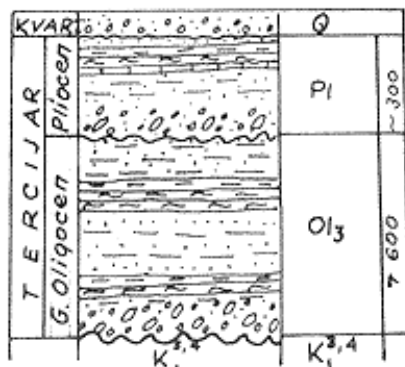
Paleogen (Pg)

Gornji oligocen (Ol₃)

Gornjooligocenski sedimenti su otkriveni u Koritničkom basenu. Leže transgresivno preko sedimenata donje krede, dok su na obodima basena u tektonskom odnosu sa ovim sedimentima. Predstavljani su pločastim i listastim laporcima i glincima, zatim alevrolitskim peščarima i ređe konglomeratima, koji se javljaju u nižim delovima jedinice. U laporcima se nalaze mnogobrojni paleofloristički ostaci, kao i fosilne ribe. Gornjooligocenska starost određena je na osnovu bogate fosilne flore (preko 70 rodova i vrsta) među kojima su: *Quercus neriifolis*, *Acacia soztkiana*, *Bumelia minor*, *Libocedrus salicicornioides*, *Zizyphus zizyphoides*, *Eucalyptus oceanica*, *Apocynophyllum sp.* i druge forme. Debljina ove jedinice iznosi verovatno 300 m (Slika 6.21.), dok se u centralnim delovima basena procenjuje i na više od 600 m.

Pliocen (Pl)

Sedimenti najmlađeg dela neogena imaju rasprostranjenje u samom jugoistočnom delu istražnog područja. Najvećem delu ovih slojeva nije mogla biti određena uža starost, pa su uglavnom na osnovu litologije, paralelizacije sa susednim terenima i literaturnih podataka uvršćeni su u pliocen uopšte (Slika 6.18.). Pliocen leži transgresivno preko gornjooligocenskih ili donjokrednih tvorevina. Predstavljen je krupnozrnim žutim peskovima sa sočivima peskovito-laporovitih krečnjaka u donjem delu, dok se u višim delovima nalaze sivoplave gline, liskunoviti trošni peščari, peskovite gline i šljunkovi. Debljina jedinice nije bila određena, ali verovatno nije manja od 300 m.



Slika 6.18. Geološki stub tercijarnih basena: Babušničkog i Koritničkog (Vujisić et al, 1971)

Kvartar (Q)

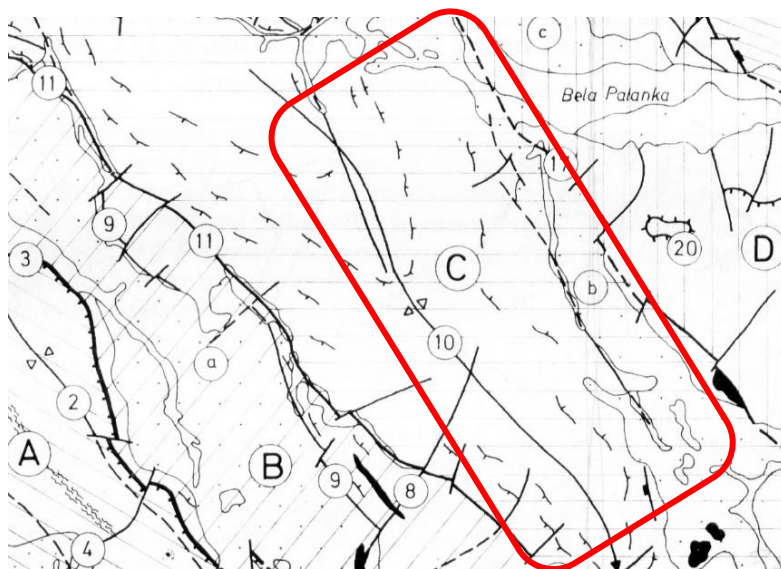
Stvaranje kvartarnih sedimenata vezano je za procese erozije i denudacije na strmim planinskim padinama i duž većih rečnih tokova. Od genetskih tipova izdvojene su koluvijalne naslage (deluvijum), izvorski sedimenti, aluvijalne naslage. Sipari (s) se nalaze ispod strmih otseka Suve planine. Izgrađeni su od nezaobljenih komada mezozojskih krečnjaka. Na više mesta na Suvoj planini imaju znatnu debljinu, i do 40 metara. Izvorski sediment (i) - bigar konstatovan je ispod Gornjedušničkog vrela, na krajnjem jugozapadu terena prikazanog na karti (Slika 6.17.). Aluvijum (al) je rasprostranjen u dolini Koritničke (Mokranjske) reke i u dolini Nišave. Sastoji se od šljunkova, peskova i glina male debljine. Deluvijum (d) je izdvojen

na samo jednoj lokaciji, ispod vrha Trešten u oblasti Rakoša. Izgrađen je od ostataka i odlomaka jurskih krečnjaka i dolomita. Terasni sedimenti (t_1) su razvijeni u dolini Nišave, na krajnjem severu istražnog terena. Nanosi terasa su predstavljeni uglavnom šljunkovima, među kojima preovlađuju krečnjački valuci.

Tektonika terena

Tektonski procesi na Suvoj planini su se odigrali za vreme kaledonske, hercinske i, po posledicama veoma značajne, alpske orogene faze (Vujisić et al, 1971), što je dovelo do stvaranja okolnih kotlina: Zaplanjske, Jelašničke, Ostrovičke, Koritničke, Babušničke i Niške (Slika 6.19.). Osim toga, na niškobanjskom, ostrovičkom i belopalanačkom rasedu formirane su termalne podzemne vode Niške Banje, Ostrovičke banjice, Banjice i druge.

U seizmološkom pogledu teritorija Suve planine u celini spada u red trusnih oblasti na području Srbije. Svi obodni delovi kao i sam planinski masiv na seizmološkoj karti hazarda¹¹, region Suve planine za povratni period od 475 godina nalazi se u zoni VII^o MCS skale.



Slika 6.19. Pregledna tektonska karta istražnog područja i bliže okoline (Vujisić et al, 1971); crveni poligon – uže područje istraživanja

Tektonske jedinice (zone): A - moravska, B - lužnička, C - gornjačko-suvoplaninska, D - kučajsko-svrljiška;
Tercijarni baseni: a - zaplanjski, b - koritničko-babušnički, c - belopalanački. Strukturni oblici: 2 - kruševačko-babička sinklinala, 3 - moravska dislokacijaj, 4 - jarsenovački rased, 8 - ropotski rased, 9 - dubravski rased; 10 - antiklinala Suve planine, 11 - suvoplaninska dislokacija, 17 - lužnička dislokacija, 20 - tektonski prozor Kremenice

6.6. Hidrogeološke karakteristike

6.6.1. Pregled ranijih hidrogeoloških istraživanja

Jovan Cvijić (1895) u svom radu „Pećine i podzemna hidrografija u Istočnoj Srbiji“ daje primere pećina (pravih pećina: rečnih, periodično izvorskih i suvih; okapina; ledenica) koje je otkrio i opisao i na prostoru Suve planine i Svrljiških planina i njihovog neposrednog okruženja. U radu „Izvori, tresave i vodopadi u Istočnoj Srbiji“ (1896) isti autor daje opis Suve planine kao i susednih: Svrljiških planina, Belave i Lužničkog Stola, kao i vrele (na padinama Suve planine) koje je uočio i čije osnovne karakteristike je izmerio: Golemo vrelo (D. Studena), Mokranjsko

¹¹ http://www.seismo.gov.rs/Seizmicnost/Karte_hazarda_1.htm

vrelo, Belopalanačko vrelo, Dušničko vrelo (G. Dušnik), Ropot, Ždavina, i slabija vrela kod G. Koritnice. Takođe, *Cvijić* se još jednom osvrće na Suvu planinu i njene geomorfološke i hidrogeološke karakteristike u svom delu „Suva planina i karst Valožja“ (1912), gde daje detaljniji opis geomorfoloških oblika uočenih na površi Valožje i nekih hidrogeoloških pojava.

Kasnije, između I i II svetskog rata istraživanja na ovim terenima se izvode retko, sporadično i jedino za rešavanje problema vodosnabdevanja, mada autori *M. Luković* i *K. Petković* pokušavaju da reše problematiku nastanka i pojave termo-mineralnih voda Niške banje (1933).

Nakon II svetskog rata istraživanja su malo intenzivnija i okrenuta osim stručnom i naučnom pristupu i boljem upoznavanju hidrogeoloških karakteristika ovog dela Srbije. Tako, *Kostić M.* (1953), *Petrović J.* (1953, 1958), zatim *Milić Č.* (1960, 1962), *Kostić M. i Martinović Ž.*, (1967) osim informacija o geografskim, geološkim, geomorfološkim i pedološkim karakteristikama oblasti, navode i prikazuju obimnu prikupljenu građu o hidrogeološkim pojavama Suve planine u njenom podnožju i bliskoj okolini.

Tokom istraživanja nekih karstnih vrela Karpato-balkanida u periodu 1977-1979. godine (petodnevna merenja), koje je sproveo „Geozavod“ prikupljeni su podaci o režimu izdašnosti, prikazani u okviru „Osnovnih hidrogeoloških istraživanja režima podzemnih voda u Srbiji (van AP)“ (Đalović P. & Protić D, 1979). Određeni podaci o hidrogeologiji ovog terena se mogu naći i u monografiji „Geologija Srbije, VIII-1 Hidrogeologija“ iz 1976. godine. Nekih podataka o rezervama podzemnih voda i uslovima vodosnabdevanja ima i u radu *Komatine M.* (1975). *Stevanović Z.* (1981) tretira delom hidrogeološku problematiku područja jugoistočne Srbije u radu „Mogućnosti iskorišćavanja podzemnih voda za vodosnabdevanje u Srbiji“. Isti autor u kasnijim radovima (1987, 1988) analizira kvalitativna svojstva karstnih izdanskih voda istočne Srbije. Zatim *Čubrilović P.* (1984) piše o uticaju geostrukturnih odnosa na hidrodinamički režim karstnih izdani u slivu Nišave i Lužnice.

Institut „Jaroslav Černi“ izrađuje „Studiju definisanja slivnih područja izvorišta za vodosnabdevanje Niša sa aspekta ocene pouzdanosti i sigurnosti u eksploataciji“, koja je urađena na osnovu terenskih snimanja kao i korišćenjem podataka prikupljenih od strane „Geozavoda“, Beograd. U periodu od 1981. do 1984. godine za potrebe vodosnabdevanja grada Niša kaptirana su karstna vrela: Krupac, Mokra, Divljana i Ljuberada. Tim radovima prethodila su obimna geološka, hidrogeološka, inženjersko-geološka, hidrološka, meteorološka i druga istraživanja koja su obuhvatila šire prostore navedenih vrela. Ova multidisciplinarna i kompleksna istraživanja pratila je izrada obimne projektne dokumentacije u vidu Projekata, Izveštaja, Elaborata i Studija (fondovska dokumentacija JKP „Naissus“ Niš):

- Idejni Projekat vodosnabdevanja grada Niša sa izvora: Krupac, Bela Palanka, Mokra, Divljana i Ljuberada, Knjiga 1. Analize (Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, 1980);
- Idejni Projekat vodosnabdevanja grada Niša sa izvora: Krupac, Bela Palanka, Mokra, Divljana i Ljuberada, Knjiga 2. Tehničko rešenje (Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, 1980);
- Izveštaj o rezultatima geofizičkih ispitivanja na vrelima: Krupac, B. Palanka, Mokra, Divljana i Ljuberada („Geoinstitut“, Beograd, 1980);
- Izveštaj o rezultatima detaljnih hidrogeoloških i inženjersko-geoloških istražnih radova na zahvatima karstnih vrela Ljuberade, Divljana, Mokra, Bela Palanka i Krupac i trasi cevovoda od Ljuberade preko pomenutih vrela do Niša; Sveska 4: Izveštaj o rezultatima istražnih radova na vrelu Mokra (Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, 1981);
- Izveštaj o rezultatima detaljnih hidrogeoloških i inženjersko-geoloških istražnih radova na zahvatima karstnih vrela Ljuberade, Divljana, Mokra, Bela Palanka i Krupac i trasi cevovoda

od Ljuberađe preko pomenutih vrela do Niša; Sveska 5: Izveštaj o rezultatima istražnih radova na vrelu Divljana (Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, 1981.);

- Studije definisanja slivnih područja izvorišta za vodosnabdevanje Niša sa aspekta ocene pouzdanosti i sigurnosti u eksploataciji, Hidrogeološke podloge (Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, 1997.).

Analiza hidrogeoloških karakteristika pojava (izvora i vrela) Suve planine, Svrliških planina, kao i Belave sa Vlaškom planinom (kvantitet i kvalitet), kao i hidrogeološka rejonizacija i klasifikacija ležišta podzemnih voda formiranih u karstu na ovim terenima, definisanje rezervi karstnih izdanskih voda uz preporuke u pogledu daljeg vodosnabdevanja naselja u ovoj oblasti (pre svega grada Niša), i na kraju preporuke o aktivnostima koje treba sprovesti radi očuvanja odličnog kvaliteta karstnih izdanskih voda mogu se naći u radovima *Stevanović Z.* (1986, 1991, 1992, 1994, 1995) i *Stevanović i Filipović* (1994).

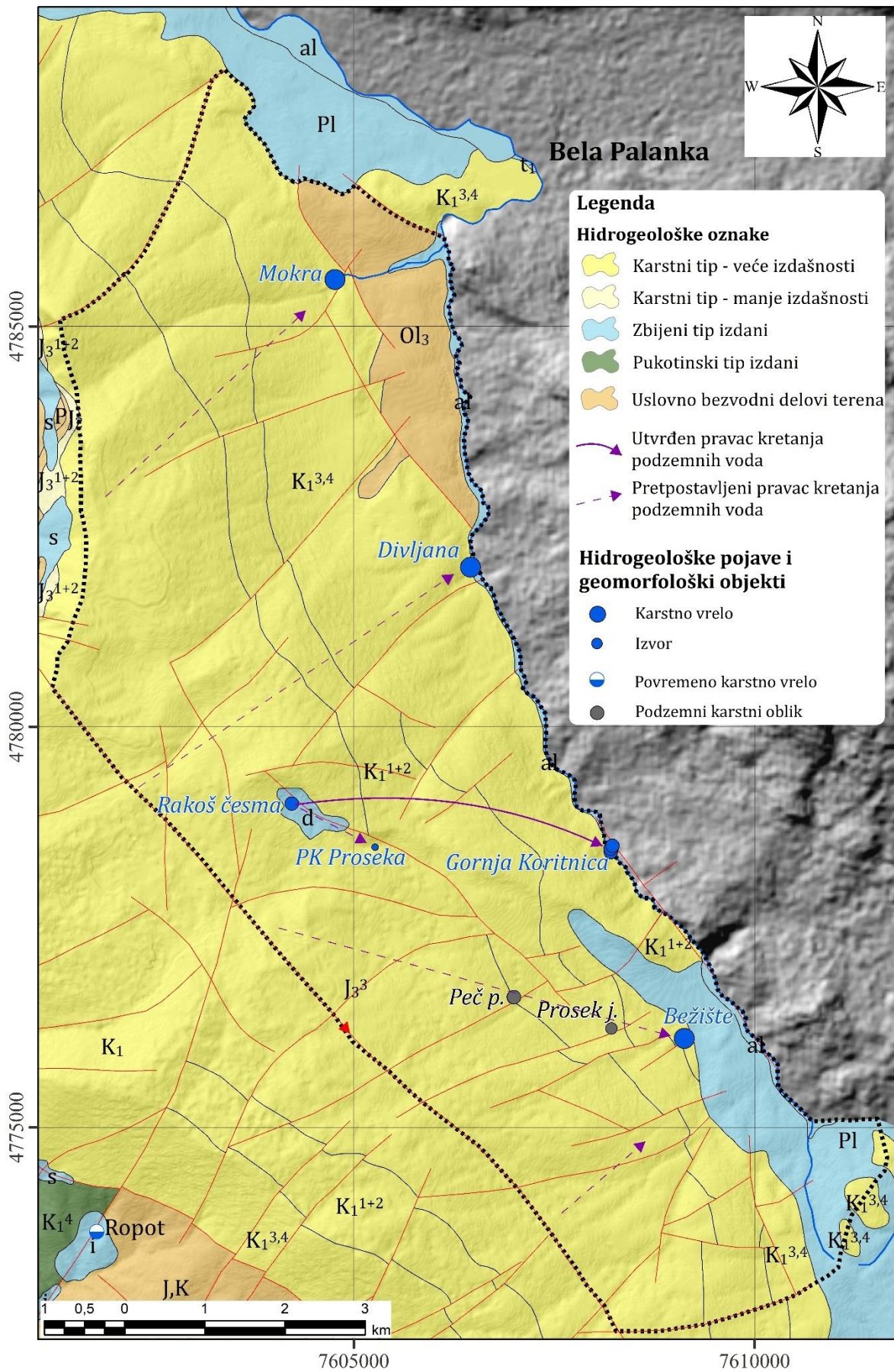
Stručnjaci kompanije Geofizika-ING iz Beograda su 2010. godine u Elaboratu o rezervama i kvalitetu podzemnih voda kaptiranog vrela Divljana kod Bele Palanke, i Elaboratu o rezervama i kvalitetu podzemnih voda kaptiranog vrela Mokra kod Bele Palanke obradili osnovne geološke, geomorfološke, hidrogeološke i druge važne karakteristike ova dva vrela.

6.6.2. Hidrogeološke karakteristike terena

Na području Suve planine izdvojena su 4 tipa izdani prema tipu poroznosti: zbijena, pukotinska, karstna izdan i hidrogeološki kompleks (složena izdan), kao i „uslovno bezvodni delovi terena“ (Prilog 2).

Na istočnim padinama Suve planine koje su detaljno istražene za potrebe izrade ove disertacije (Slika 6.20.) izdvojeni su karstni tip izdani veće izdašnosti u okviru titonskih i donjokrednih krečnjaka (dominantan na terenu), na obodu užeg istražnog prostora izdvojena je karstna izdan manje izdašnosti u okviru sedimenata oksford-kimeridža. Pukotinska izdan izdvojena je na delovima terena koji se nalaze van užeg istražnog područja u okviru klastičnih i magmatskih stena: baremskih peščara i laporaca i amfibolskih andezita. Zbijena (intergranularna) izdan formirana je u klastičnim sedimentima kvartarne (s, al, i) i neogene (Pl) starosti i uglavnom ima lokalni značaj. Permski peščari, jursko-kredni fliš i oligocenski sedimenti (alevroliti, laporci, glinci, peščari) okarakterisani su kao uslovno bezvodni delovi terena.

Na teritoriji Suve planine, ali izvan užeg istražnog područja, nastala je složena izdan u okviru srednjemiocenskih sedimenata (peskovi, glina, šljunkovi i konglomerati u čestoj vertikalnoj smeni).



Slika 6.20. Hidrogeološka karta užeg istražnog područja, istočne padine Suve planine (podloga OGK list Bela Palanka, Vujisić et al, 1971)

6.6.2.1. Karstni tip izdani

Tektonski sklop i čistoća krečnjaka uticali su i na stepen karstifikacije karbonatnih stena donjotrijaske (T_1), gornjojurske (J_3^{1+2} и J_3^3) i donjokredne starosti (K_1^{1+2} и K_1^{3+4}), pa se u okviru njih mogu izdvojiti karstni tip izdani manje i karstni tip veće izdašnosti. Na delu terena koji se nalazi u okviru užeg istražnog područja (Slika 6.20.) izdvojen je isključivo karstni tip izdani veće izdašnosti.

Prihranjivanje karstne izdani na Suvoj planini vrši se isključivo infiltracijom atmosferskih padavina (u vidu kiše i otopljenih snežnih padavina) ili slabo prisutnih površinskih voda (koje se opet formiraju jedino nakon olujnih padavina i naglog topljenja snežnog pokrivača) kroz vrtače, pukotine većih i manjih dimenzija.

Glavni pravac kretanja podzemnih voda u okviru ovog karstnog masiva je od centralnih delova prema obodu, drugim rečima od ose antiklinale Suve planine prema istočnom i zapadnom krilu, duž rasednih površi. Ovaj pravac je uslovljen geološkom građom terena, hidrogeološkim uslovima, tektonikom, kao i stepenom razvoja karstifikacije. Takođe, na pravac kretanja uticaj ima i položaj vodonepropusne barijere, na čijem se kontaktu uglavnom završava podzemna cirkulacija u vidu izvora veće ili manje izdašnosti. Na Suvoj planini izveden je samo jedan (dokumentovani) opit obeležavanja (Petrović J, 1958). Opit je izveden pomoću Na-fluoresceina 27.4.1954. godine, traser je ubačen u povremeni tok koji nastaje od Rakoš česme, i koji nestaje nekoliko desetina metara nakon izvora. Utvrđena je veza sa Gornjekoritničkim vrelima, pravolinijsko rastojanje od 4,5 km podzemna voda je prevalila brzinom od 0,048 m/s, uz prilično strm gradijent pada od 18%. Ova brzina je u skladu sa vrednostima koje su dobijene za karstnu izdan na prostoru Karpato-balkanida na teritoriji Srbije (Stevanović, 1991), koje se kreću od 0,0045 m/s (karstna izdan JI Kučaj) do 0,222 m/s (Ozren).

Isticanje podzemnih voda iz karstne izdani se vrši preko izvora, koji se nalaze na kontaktu karbonatnih stena sa vodonepropusnom sredinom, što je kod Suve planine i slučaj sa najvećim brojem pojava, ali najverovatnije postoji i podzemno isticanje u susedne (pre svega intergranularne) izdani. Dreniranje karstne izdani se odvija na najnižim tačkama erozionog bazisa, ali visina na kojoj dolazi do isticanja varira i kreće se od 850 m.n.m. do 230 m.n.m. Određene pojave, koje se mogu tretirati kao mesta dreniranja plitke izdani (formirane i u epikarstu) javljaju se na visini od 875 m.n.m. (Bojanine vode) i 1260 m.n.m. (Rakoš česma).

Snažna karstna vrela javljaju se duž oboda masiva Suve planine, najčešće, kao što je već rečeno na kontaktu sa vodonepropusnom barijerom. Možemo posmatrati pojave prema tome koji deo planine tj. karstne izdani dreniraju. Tako možemo izdvojiti pojave duž istočnog oboda (Prilog 2, Slika 6.20.): Mokra, Divljana, Gornjekoritnička vrela, Bežište, Provaljenik, Vrelo, dok su na južnim padinama dominantna Ljuberađska (Lužnička) vrela (Prilog 2), koja ujedno i predstavljaju glavni dren ovog dela planine (Stevanović, 1991). Zatim na zapadnim padinama uočavamo veći broj hidrogeoloških pojava povremenog karaktera (najznačajnija je Ropot) i pojava čija je minimalna izdašnost ispod 1 l/s (u selima Veliki Krčimir, Semče i Šebet). Međutim postoji i nekoliko značajnijih vrela: Gornji Dušnik, Sopotnica I, Sopotnica II i Lazinje (Prilog 2). Na severnim padinama tj. severnom obodu Suve planine, koji je značajno razuđen, postoji nekoliko važnih hidrogeoloških pojava od kojih su neke i termalne, pa možemo izdvojiti severozapadne i severoistočne padine. Severozapadni deo Suve planine (Prilog 2) drenira se preko Golemog vrela, vrela u Ostrovici i na izvoru Koritnik, moguće je da mali deo podzemnih voda formiranih u karstu, završava i u termalnim pojavama Niške banje, na krajnjem SZ planine, koja se odlikuju povišenom temperaturom i mineralizacijom (Petrović B., 2014a i 2014b).

Severoistočni obod se drenira na nekoliko manjih pojava, a najznačajnije je vrelo u selu Vrgudinac.

Ukoliko posmatramo samo uže istražno područje, istočne padine Suve planine, uočavamo prisustvo stena karbonatnog sastava i dominantnu zastupljenost karstne izdani (>80%). Prisutne su određene manje oblasti sa prisustvom (u pogledu debljine naslaga, $d > 5$ metara) kvartarnih sedimenata, u kojima je formiran zbijeni tip izdani, ali se može smatrati značajnim jedino za lokalne potrebe vodosnabdevanja (pojedinačnih korisnika). Istočnu granicu užeg istražnog prostora čine neogene naslage, koje u ovom slučaju i u kombinaciji sa rasednim površima pravca pružanja SZ-JI predstavljaju i barijeru kretanju podzemnih voda karstne izdani, dok je na severu kretanje podzemnih voda iz karsta dirigovano postojanjem pliocenskih sedimenata sa kojima verovatno postoji i određeni stepen hidrauličke povezanosti. Zapadna granica užeg istražnog prostora definisana je na osnovu topografske vododelnice Suve planine, s obzirom na to da je ceo teren izgrađen od krečnjaka, i da bi se jedino serijom opita trasiranja pouzdano utvrdila tačna raspodela voda koja sa ove površine (Valožje) završi na istočnim, a koja na zapadnim izvorima i vrelima. Sličan problem sa definisanjem istražnog prostora je bio i prema jugu, pa je primenjen sličan princip kombinovanja topografske vododelnice (granice slivova Bežiške reke ka severu i Lužnice ka jugu) i geoloških uslova (postojanje lokalnih raseda pravca pružanja I-Z).

Isticanje podzemnih voda karstne izdani na istočnim padinama Suve planine javlja se u podnožju, osim izvora Rakoš česma i nekih manjih pojava koje su povremenog karaktera (npr. PK Proseka, Slika 6.23.) koje se nalaze na samom masivu Suve planine. Pojave preko kojih se drenira najveći deo karstne izdani istočnih padina Suve planine (Tabela 6.5.) se nalaze na kontaktu karbonatnih i nekarbonatnih stena, uz postojanje i rupturnih oblika u neposrednoj blizini.

Tabela 6.5. Izvori i vrela na istočnim padinama Suve planine

	<i>naziv hidrogeološke pojave</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	
1	<i>Mokra</i>	<i>4785653,542</i>	<i>7604399,182</i>	<i>352</i>	<i>kaptirano</i>
2	<i>Divljana</i>	<i>4782100,793</i>	<i>7606080,657</i>	<i>360</i>	<i>kaptirano</i>
3	<i>Bežište</i>	<i>4776132,660</i>	<i>7608869,100</i>	<i>567</i>	<i>kaptirano</i>
4	<i>Gornjekoritničko vrelo IV</i>	<i>4778610,582</i>	<i>7607844,242</i>	<i>457</i>	<i>nekaptirano</i>
5	<i>Rakoš česma</i>	<i>4779040,050</i>	<i>7603902,940</i>	<i>1283</i>	<i>kaptirano</i>
6	<i>PK Proseka</i>	<i>4778497,270</i>	<i>7604941,780</i>	<i>1128</i>	<i>kaptirano</i>

1. Vrelo Mokra

Vrelo Mokra nalazi se u neposrednoj blizini sela Mokra, u podnožju Suve planine, ispod njenih severoistočnih padina (Tabela 6.5.). Predstavlja izvorište Mokranjske reke, koja čini levu najnižvodniju pritoku Koritničke reke uzvodno od Bele Palanke. Ovo vrelo je nekada bilo veštački ujezereno. Oblast prihranjivanja vrela čine padine Golaša, tj. središnji deo severoistočnog venca Suve planine. Izdašnost ovog vrela je velika, prema J. Cvijiću (1896): „...iz omanjeg jezera ističe Mokranjska reka široka oko 5 m, a raspolaže istom količinom vode kao i Mlava pri izlasku iz Žagubičkog jezera“. Položaj vrela Mokra određen je geološkim sastavom okoline i odnosom sa dve krupne tektonske jedinice – antiklinalom Suve planina i tercijarnog sinklinalnog područja koje se pruža paralelno sa dolinom Koritničke reke. Vrelo je kaptirano i spojeno na vodovodni sistem Ljuberađa-Niš (Slika 6.21.). Količina vode koja se zahvata kaptadžom je u proseku 200 l/s. Maksimalne vrednosti izdašnosti se kreću preko 4 m³/s, međutim tokom letnjih meseci izdašnost značajno opadne i iznosi oko 100 l/s.



Slika 6.21. Kaptaza vrela Mokra i unutrašnjost

2. Vrelo Divljana

Vrelo Divljana nalazi se u istoimenom selu, na levoj obali Koritničke reke (Tabela 6.5. i Slika 6.22.). Voda vrela Divljana, izbija iz krečnjačkog masiva Suve planine u nivou Koritničke reke. Kretanje podzemnih voda uslovljeno je rasedom koji se pruža pravcem SI-JZ, a izbijanje na površinu nailaženjem na prepreku u vidu gornjooligocenskih naslaga, u kombinaciji sa postojanjem površi raseda duž kojeg je formirana Koritnička reka (dolina). Oblast prihranjivanja vrela čine severoistočne padine Rženca i visova koji se protežu ka vrhu Smrdan i ka Rakošu. Kao i vrelo Mokra i ovo vrelo je kaptirano za potrebe vodosnabdevanja i spojeno na vodovodni sistem Ljuberađa-Niš. Količina vode koja se zahvata kaptazom je u proseku 160 l/s. Maksimalne vrednosti izdašnosti se kreću preko 6 m³/s, međutim tokom letnjih meseci izdašnost značajno opadne i iznosi oko 75 l/s.



Slika 6.22. Kaptaza vrela Divljana i unutrašnjost

3. Vrelo u Bežištu

Vrelo se nalazi u selu Bežište, kaptirano je (Tabela 6.5.), ali godinama nije bilo korišćeno i sada je u lošem stanju (Slika 6.23.). Dugo se koristilo samo za napajanje stoke na pojilu (Slika 6.24., levo). Međutim, zbog prekida vodosnabdevanja iz centralizovanog vodovodnog sistema Ljuberađa-Niš, ponovo se koristi za vodosnabdevanje stanovnika sela Bežište (Slika 6.24., desno).



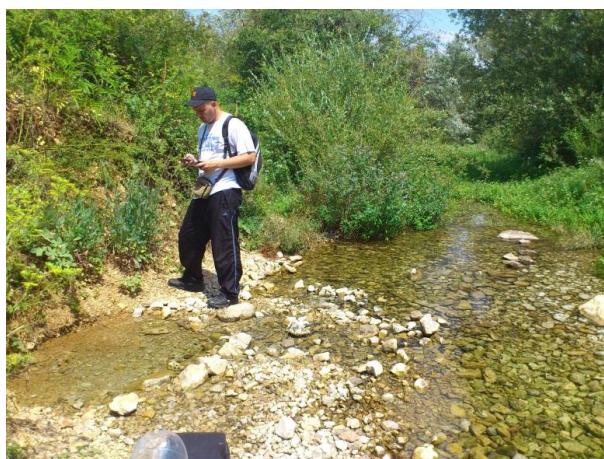
Slika 6.23. Kaptaža vrela u Bežištu



Slika 6.24. Pojilo (levo) i česma (desno) u Bežištu

4. Gornjekoritnička vrela

Gornjekoritnička vrela (Tabela 6.5.) izbijaju neposredno ispod završetka klisure Bežiško ždrelo, na visini od oko 460 m.n.m. Razbijeno izвориšte sačinjavaju dva stalna i nekoliko periodičnih i povremenih izvora. Oblast prihranjivanja vrela je veoma složena. Na vrelima izbijaju vode ponornice Bežiške reke, ali se prihranjivanje vrši i infiltracijom padavina sa severoistočnih padina Suve planine. Opitom trasiranja je dokazana veza sa ponirućim tokom koji nastaje od Rakoš česme. Prvo koncentrično isticanje podzemnih voda se uočava na levoj obali Koritničke reke (Slika 6.25.), na ulasku u selo Gornja Koritnica. Lokalno stanovništvo je od odlomaka stena i šljunka iz korita napravilo primitivnu ustavu, radi lakšeg zahvatanja vode. U intervalima od 5-10 sekundi mogu se na dnu ove primitivne ustave uočiti i izdvajanja mehurića gasa.



Slika 6.25. Prvo jasno koncentrično isticanje podzemnih voda na levoj obali Koritničke reke

Jedina stalna pojava isticanja podzemnih voda na desnoj obali reke je primitivno kaptirana u vidu bunaraste otvorene kaptiže (Slika 6.26.). Lokalno stanovništvo i nju koristi za vodosnabdevanje, dok ne dođe do opadanja nivoa podzemnih voda u jesenjim mesecima, kada se koristi samo pojava na levoj obali reke.



Slika 6.26. Bunarasta kaptiža na desnoj obali Koritničke reke

5. Rakoš česma

Voda Rakoš česme ističe u gornjem delu slabo naglašene udoline (uvale), pri dnu većeg sipara, na jugoistočnoj padini Suvoplaninskog vrha Trešten (Tabela 6.5. i Slika 6.27.). Ispod slojevitih i bankovitih krečnjaka Treštena javljaju se silifikovani i laporoviti krečnjaci, koji su slabije podložni procesu karstifikacije, pa samim tim donekle imaju ulogu hidrogeološkog izolatora. Izdašnost Rakoš česme varira od 0,05 do 2 l/s, a merenja su vršena u avgustu 2013. godine, oktobru 2016. godine, oktobru 2017. godine, avgustu i oktobru 2018. godine. Istraživanjima tokom 60-tih godina XX veka je dokazana veza vode sa Rakoš česme, koja nedaleko odatle ponire, sa Gornjekoritničkim vrelima. Voda se koristi za napajanje stoke tokom letnje ispaše (Slika 6.31.), ali je koriste i pastiri, drvoseče i planinari, jer je predstavlja jedini stalni izvor na masivu Suve planine, barem u njenom severnom delu. Međutim, poslednjih nekoliko godina je primećeno da česma presušuje na kraju letnjeg perioda.



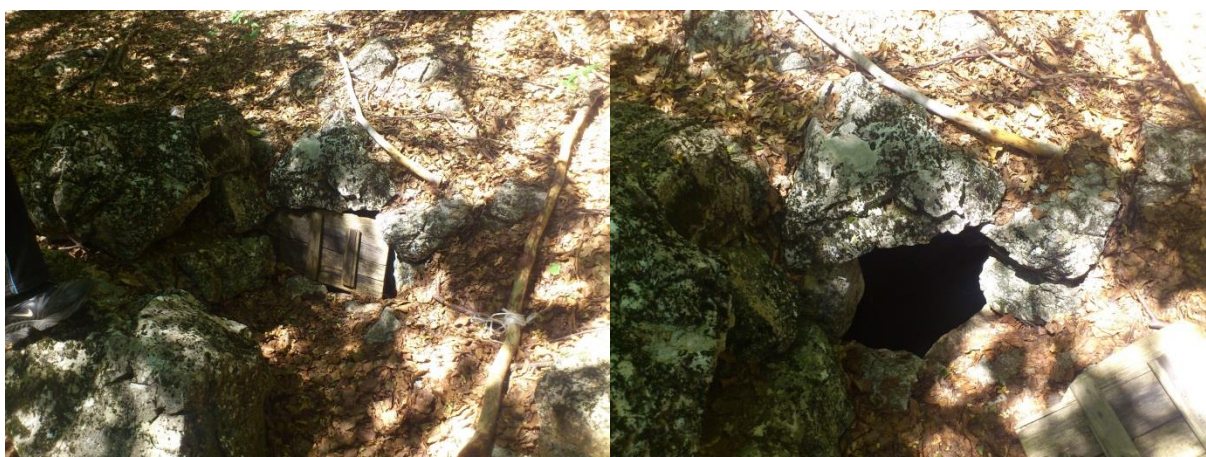
Slika 6.27. Rakoš česma



Slika 6.28. Pojilo formirano ispod Rakoš česme

6. PK Proseka

Ispod padina vrha Trešten, na oko 1 km jugoistočno od Rakoš česme se javlja izvor, na desnoj obali jaruge Proseka, primitivno je kaptiran. Jaruga je nastala duž lokalnog raseda pravca pružanja SZ-JI. Ukazuje na pravac kretanja podzemne vode sa Rakoš česme ka Gornjokoritničkim vrelima. Kaptaža je primitivna, bunarastog oblika, a otvor je osim kamenom pločom odozgo, zaštićen i jednostavnim drvenim vratima (Slika 6.29.). Pored izvora se nalazi i oznaka planinarske staze, tako da se voda izvora verovatno redovno koristi, a nedaleko je i malo vikend naselje (vikendice i pastirske kolibe).



Slika 6.29. Primitivna kaptaža izvora na desnoj obali jaruge Prosek

6.6.2.2. Režim karstne izdani

Za potrebe proučavanja režima funkcionisanja karstne izdani Suve planine, odnosno, istočnog dela celokupnog karstnog izdanskog sistema, korišćeni su podaci o povremenim i kontinualnim merenjima izdašnosti karstnih vrela Mokra i Divljana. Pored ranijih podataka o režimu podzemnih voda Suve planine (Stevanović, 1991), korišćeni su još i podaci monitoringa kvantiteta koji vrši JKP „Naissus“ na dnevnom nivou.

Ukoliko razmatramo dvogodišnji period osmatranja izdašnosti novembar 1977 - oktobar 1979. godine (Slika 6.30; podaci „Geozavoda“, preuzeto iz Stevanović 1991), izdašnost vrela Mokra bila je u rasponu od 130 do 470 l/s (mada isti autor navodi da je 14.4.1985. godine izmereno oko 1700 l/s). Maksimalne izdašnosti su bile početkom proleća 1978, dok su maksimumi bili u još dva navrata tokom zime: decembar 1978. i januar 1979. godine. Vrelo je okarakterisano složenim režimom pražnjenja tokom 1978. godine jednačinom tarismana (formula 6.1):

$$Q=0,325 \cdot e^{-0,0151t} + 0,175 \cdot e^{-0,00495t} \quad (6.1)$$

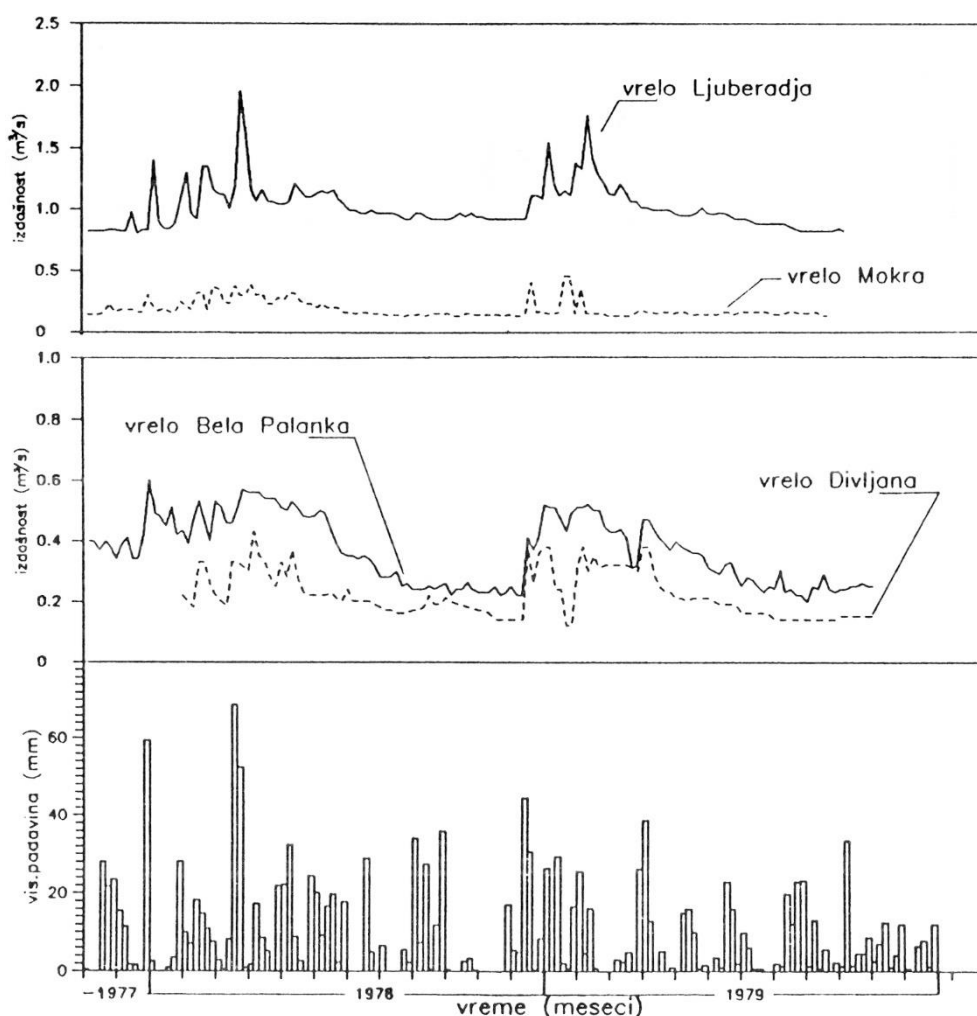
Padavine su se reflektovale za manje od 5 dana tokom perioda visokih voda, dok se tokom letnjih meseci padavine samo delimično odražavaju na povećanje izdašnosti vrela.

Prema podacima „Geozavoda“ (Stevanović, 1991) izdašnost vrela Divljana, u periodu osmatranja novembar 1977 - oktobar 1979. godine, kretala se od 140 do 440 l/s (mada je autor merenjima u aprilu 1985. godine registrovao izdašnost od 600 l/s). Maksimalne izdašnosti su bile tokom početka proleća 1978. godine, dok su maksimumi bili u još dva navrata tokom zime (decembar 1978. i januar 1979. godine). Primenom metode tarismana za obe godine dobijeni su relativno analogni rezultati (formule 6.2. i 6.3.):

$$Q_1 = 0,37 \cdot e^{-0,0112t} + 0,20 \cdot e^{-0,00226t} \quad (1978) \quad (6.2.)$$

$$Q_2 = 0,87 \cdot e^{-0,0104t} + 0,16 \cdot e^{-0,00154t} \quad (1978) \quad (6.3.)$$

Vrela Suve planine (Mokra, Divljana i Ljuberađa) karakterišu se u periodu 1977-1979, u proseku režimom izdašnosti koji ima odnos $Q_{\max} : Q_{\min} = 1 : 3$ (Stevanović, 1991).



Slika 6.30. Uporedni dijagram izdašnosti vrela: Mokra, Divljana, Belopalančkog i Ljuberađa i padavina KS Babušnica (Stevanović, 1991)

Na osnovu uporednog hidrograma izdašnosti karstnih vrela Mokra i Divljana u periodu 2015-2017. godina i histograma padavina (Slika 6.31.), može se uočiti da se najveći proticaji, odnosno maksimalne izdašnosti javljaju: 1) nakon većih izlučivanja padavina i otapanja snega u proleće, i 2) nakon obilnijih (i često olujnih) jesenjih padavina. Obilnije letnje padavine ne utiču mnogo

na izdašnost vrela Mokra, dok se tokom letnjih meseci padavine samo delimično odražavaju na povećanje izdašnosti vrela Divljana. Možemo izdvojiti 3-4 perioda maksimalnih izdašnosti vrela u toku svake godine, međutim, moramo primetiti da se sezonske promene izdašnosti ova dva vrela iz godine u godinu ne javljaju u isto vreme. Sa druge strane, periodi maksimuma i minimuma se na oba vrela javljaju u sličnim ili istim vremenskim intervalima.

Ekstremne vrednosti izdašnosti vrela Mokra i Divljana u periodu 2015-2017. godina prikazane su u Tabeli 6.6, a srednje mesečne vrednosti izdašnosti u Tabeli 6.7.

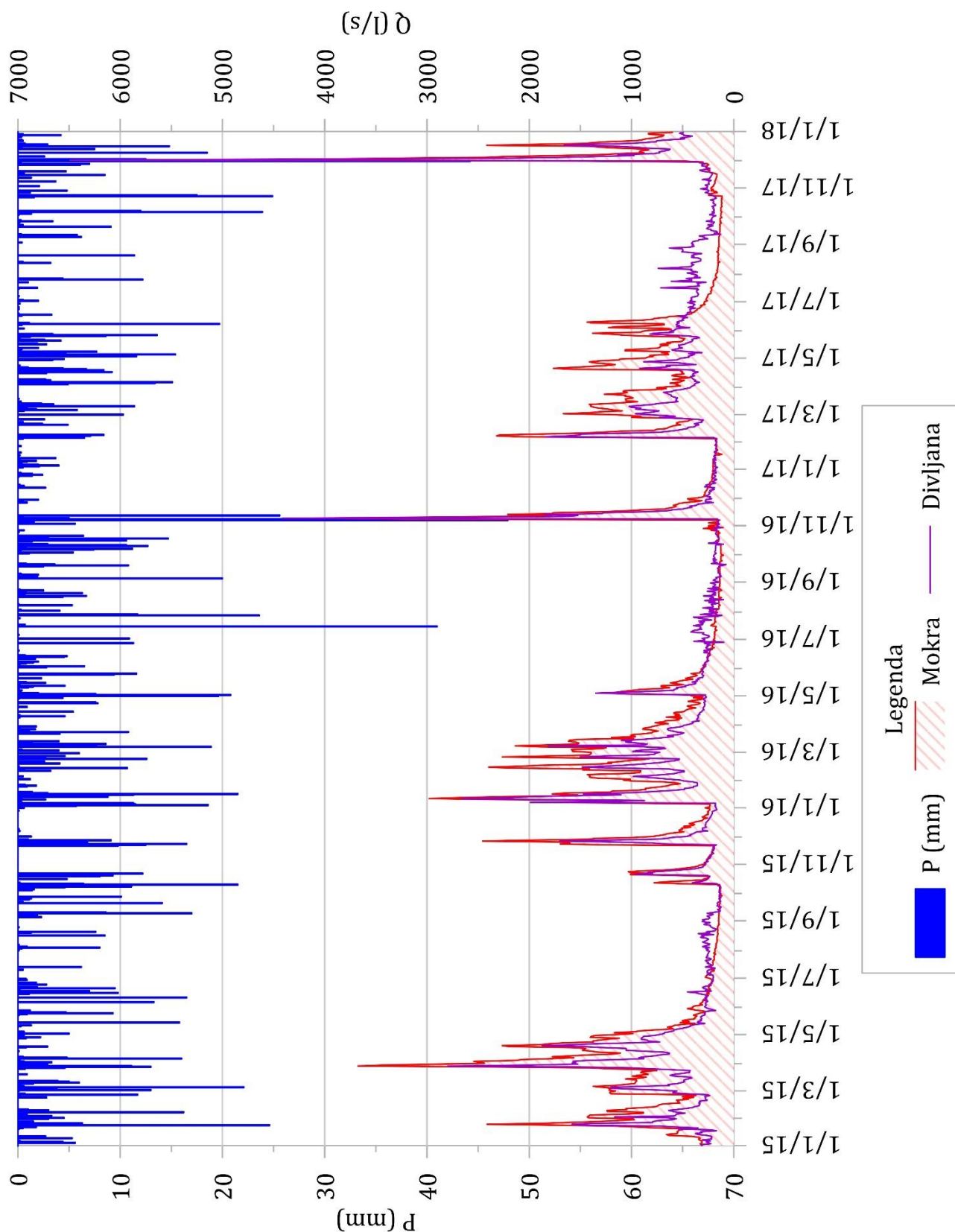
U navedenom trogodišnjem periodu srednja vrednost izdašnosti vrela Mokra bila je 605 l/s, dok je srednja vrednost izdašnosti vrela Divljana 476 l/s.

Tabela 6.6. Ekstremne izdašnosti vrela Mokra i Divljana u periodu 2015-2017. godina (JKP „Naissus“)

2015					
Mokra			Divljana		
Q _{max}	3,674 m ³ /s	28. mart 2015.	Q _{max}	2,795 m ³ /s	28. mart 2015.
Q _{min}	0,128 m ³ /s	6. oktobar 2015.	Q _{min}	0,124 m ³ /s	16. septembar 2015.
2016					
Mokra			Divljana		
Q _{max}	4,062 m ³ /s	9. novembar 2016.	Q _{max}	4,412 m ³ /s	9. novembar 2016.
Q _{min}	0,101 m ³ /s	30. septembar 2016.	Q _{min}	0,075 m ³ /s	20. septembar 2016.
2017					
Mokra			Divljana		
Q _{max}	4,062 m ³ /s	2. decembar 2017.	Q _{max}	6,491 m ³ /s	1. decembar 2017.
Q _{min}	0,107 m ³ /s	12. septembar 2017.	Q _{min}	0,128 m ³ /s	12. septembar 2017.

Tabela 6.7. Srednje mesečne vrednosti izdašnosti vrela Mokra i Divljana, za period 2015-2017. godina

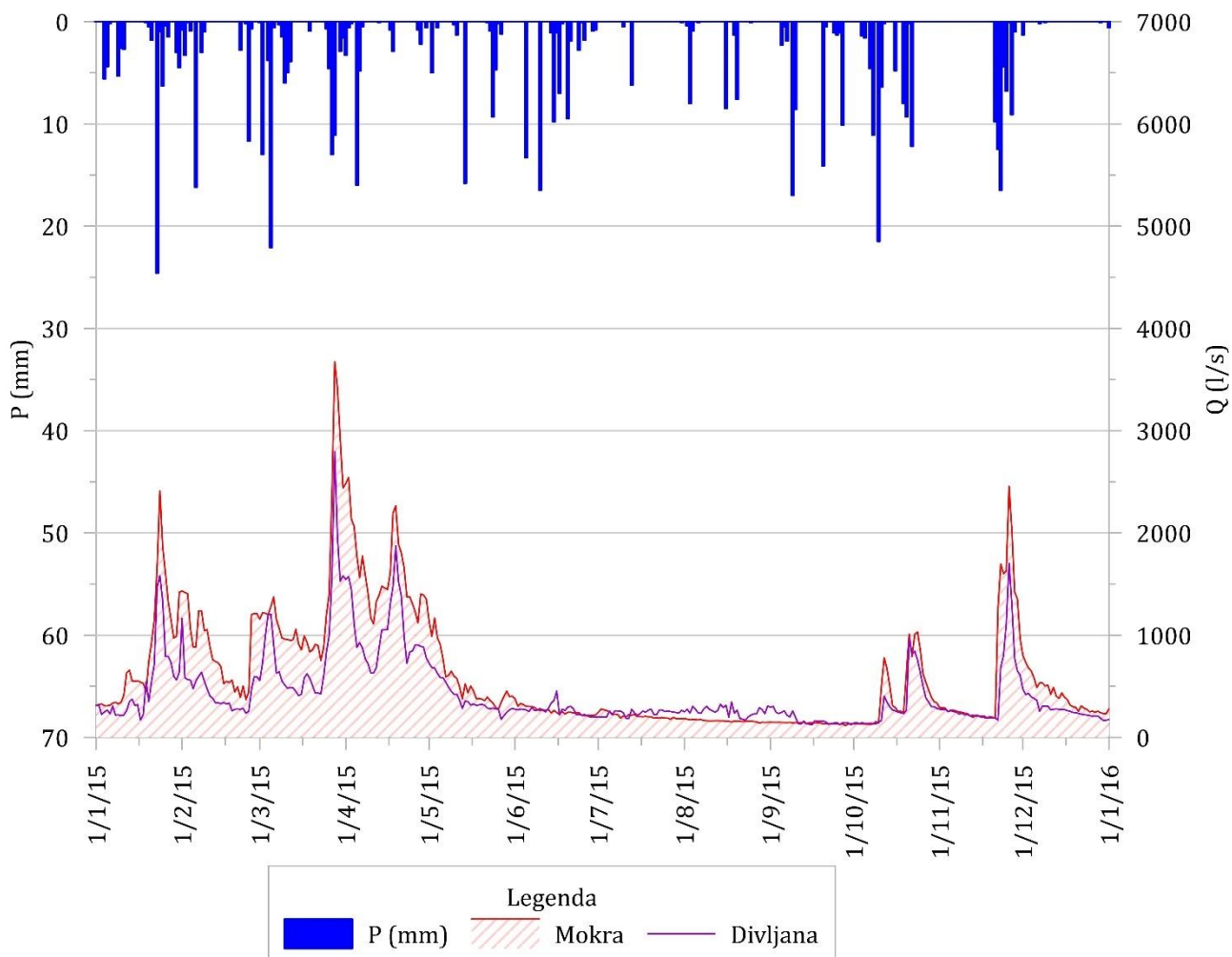
Mokra													
	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec	sr.
2015	785,7	854,5	1348,1	1623,5	546,0	262,9	212,0	161,7	140,5	425,9	643,9	408,7	617,8
2016	1127,2	1411,8	1222,0	484,7	578,5	241,4	185,8	145,6	134,0	153,0	1025,5	243,1	579,4
2017	181,5	884,7	1124,8	863,1	774,8	631,9	217,6	153,9	137,5	143,9	226,8	1445,1	565,5
cp. ep.	683,2	1037,1	1536,8	1139,0	568,3	386,0	295,0	175,6	141,7	214,5	503,2	579,5	605,0
Divljana													
	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec	sr.
2015	498,7	446,1	842,7	1037,8	395,2	267,4	239,7	256,3	176,4	331,1	419,1	276,0	432,2
2016	842,4	831,5	760,2	319,6	460,5	261,7	294,5	204,4	162,1	169,1	737,0	212,9	438,0
2017	179,8	612,3	696,6	484,6	496,8	470,0	393,7	426,9	258,4	211,7	302,3	1183,2	476,4
cp. ep.	554,5	633,0	1067,0	735,7	421,2	334,3	344,6	310,8	222,7	226,9	396,7	463,1	475,9



Slika 6.31. Uporedni dijagram izdašnosti karstnih vrela Mokra i Divljana sa histogramom padavina na kiš. st. Niš za period 2015-2017. godine, dnevne vrednosti (podaci JKP „Naissus“ i www.meteomanz.com)

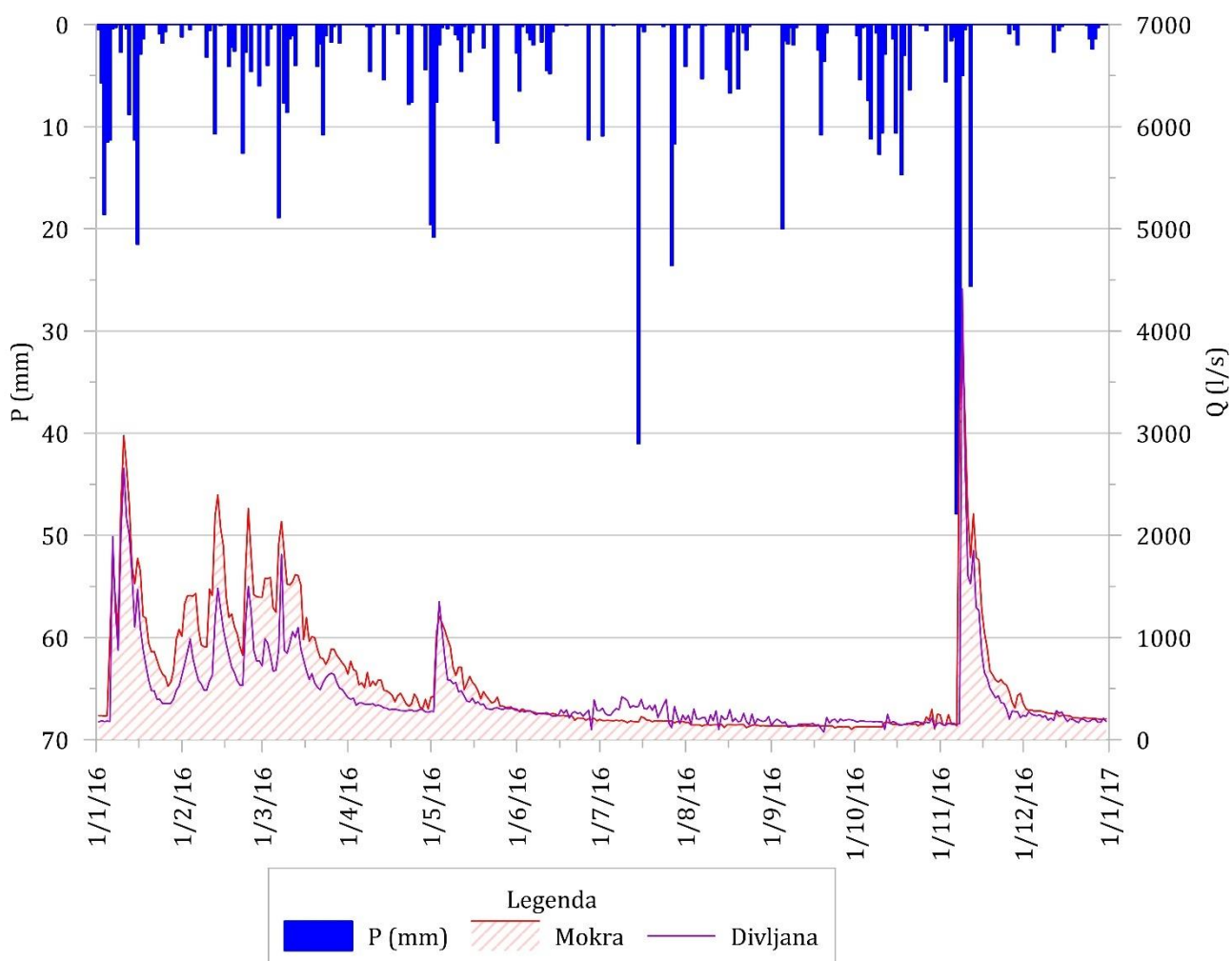
Na vrelu Mokra i Divljana se 2015. godine mogu izdvojiti 3 perioda maksimalne izdašnosti (Slika 6.32.), od kojih svaki ima 2 talasa (2 uočljiva pika u razmaku od oko mesec dana). Prvi period maksimuma tokom 2015. godine je zabeležen krajem januara i po intenzitetu je treći po redu. Prvi pik se javlja krajem januara, a drugi početkom marta meseca. Drugi po redu

maksimum izdašnosti, kada na izdašnost oba vrela najverovatnije utiče otapanje snega i veće količine kiše, takođe, ima dva distinktivna pika: prvi pik, koji predstavlja i ekstremnu maksimalnu izdašnost, dešava se na samom kraju marta (28.3.2015.), a drugi pik je krajem aprila. Treći po redu maksimum (drugi prema ukupnom intenzitetu) zabeležen je sredinom jeseni i verovatno je posledica jesenjih pljuskova, sa dva uočljiva pika kratkog trajanja, odnosno brzo je došlo do njihovog opadanja: prvi pik je po intenzitetu manji i zabeležen je krajem oktobra, dok je drugi pik veći i zabeležen je 26.11.2015. godine.



Slika 6.32. Dijagram izdašnosti karstnih vrela Mokra i Divljana 2015. godina (podaci JKP „Naissus“)

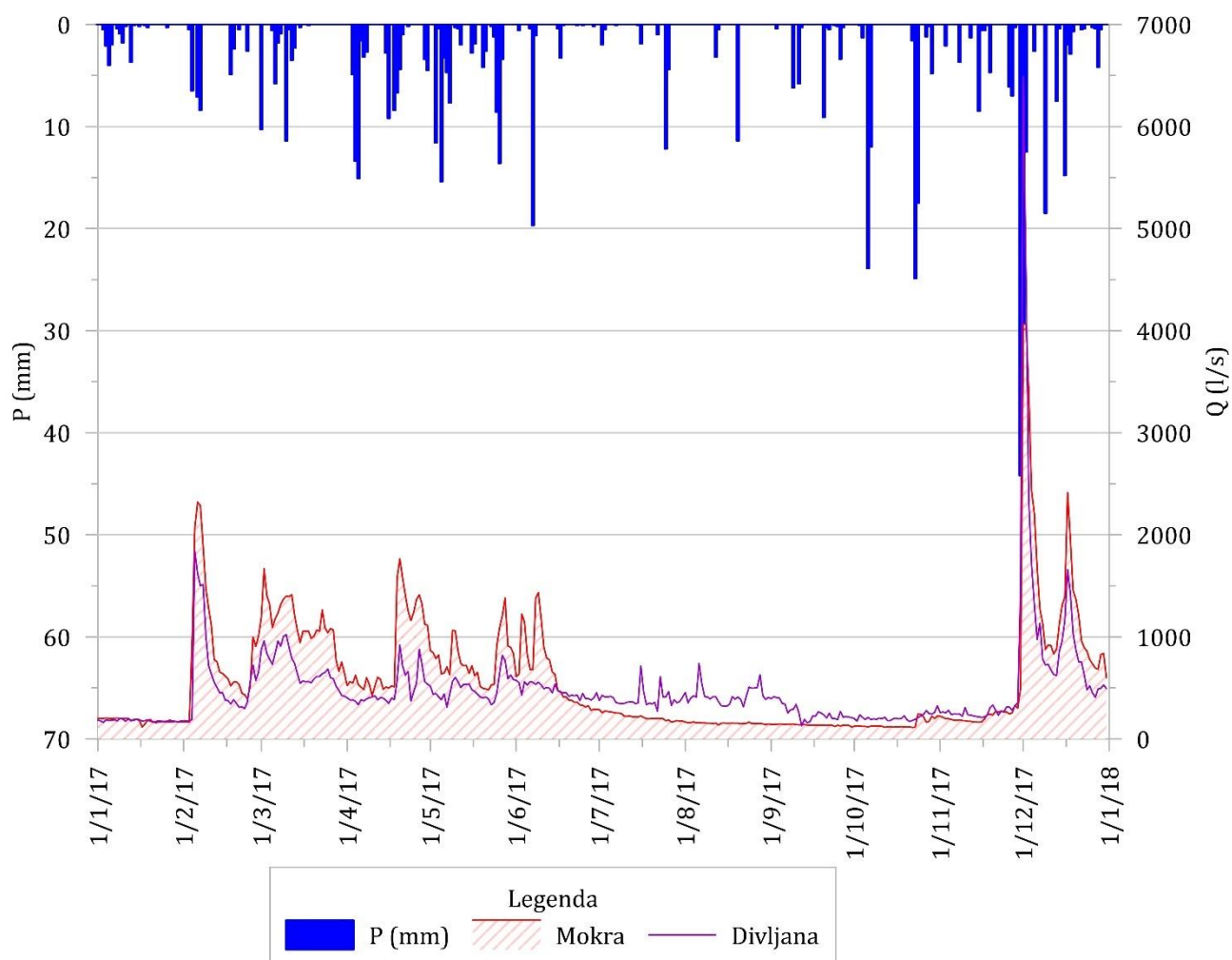
Tokom 2016. godine na vrelima Mokra i Divljana mogu se izdvojiti 4 perioda sa maksimalnim izdašnostima (Slika 6.33.). Prvi po redu maksimum dešava se odmah na početku godine, sredinom januara, verovatno usled veće količine padavina u vidu kiše. Sledeći II period maksimalne izdašnosti se dešava od sredine februara do sredine marta u vidu smene nekoliko pikova porasta i opadanja izdašnosti, uzrok ovom maksimumu može se naći u otapanju snežnih padavina i izlučivanju kiše. Treći po redu period maksimalne izdašnosti na vrelima Mokra i Divljana odigrao se početkom maja, sa jednim distinktivnim pikom, koji je po intenzitetu ipak najmanji te godine. Najveći maksimum izdašnosti se dešava 9. novembra 2016. godine, kao direktna posledica obilnih padavina (oko 90 mm za 2 dana). Kao i prethodne godine u istom ovom periodu pik je kratkog trajanja, odnosno brzo je došlo do opadanja izdašnosti jer je veći deo padavina potrošen na popunjavanje dela isteklih dinamičkih rezervi, tokom perioda recesije (Stevanović, 1991; Ristić, 2007, Stevanović *et al*, 2015).



Slika 6.33. Dijagram izdašnosti karstnih vrela Mokra i Divljana 2016. godina (podaci JKP „Naissus“)

Na vrelima Mokra i Divljana u toku 2017. godine mogu se izdvojiti četiri perioda sa maksimalnim izdašnostima (Slika 6.34.). Prvi po redu maksimum je zabeležen, sa jednim pikom na početku meseca februara. Nakon tog lako uočljivog maksimuma sledi period koji traje od 26. februara do 9. juna, a koji se ne može definisati ni kao maksimalni niti kao minimalni, kada dolazi do česte smene pikova maksimuma i minimuma, koji su prema intenzitetu istaknutiji kod vrela Mokra. Onda na samom kraju jeseni 1.12.2017. godine imamo izuzetno izražen pik maksimalne vrednosti, koji u osmatranom periodu (2015-2017) predstavlja i apsolutni maksimum na oba vrela, s tim što je na vrelu Divljana maksimum 1,5 puta veći nego na vrelu Mokra. Nakon toga sledi naglo opadanje izdašnosti na manje $1 \text{ m}^3/\text{s}$, u roku od samo 7 dana, a nakon toga se javlja novi (poslednji) pik maksimalne izdašnosti, koji je ovog puta veći kod vrela Mokra.

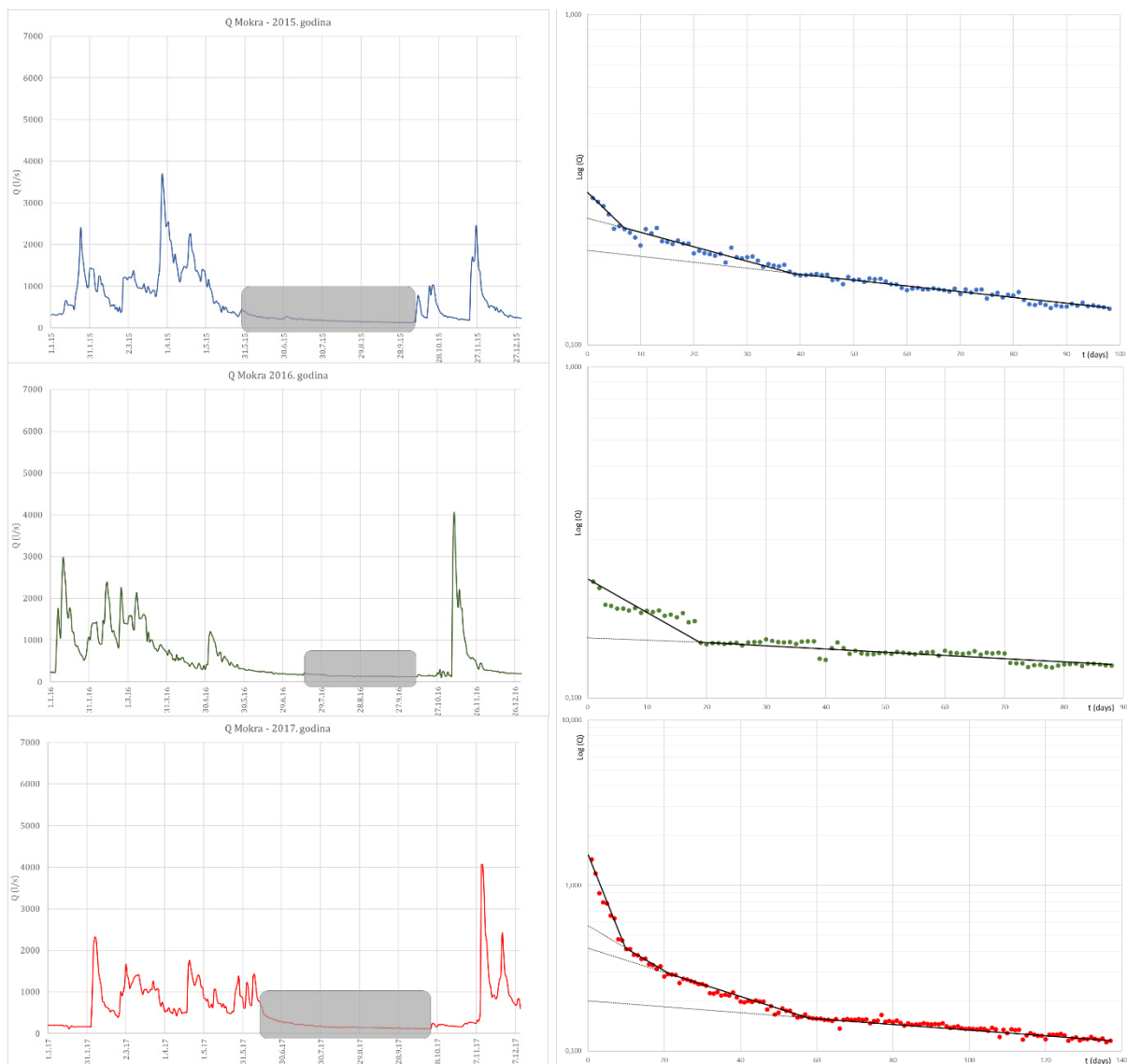
Na oba vrela, zabeleženi su veći maksimumi tokom kraja jeseni 2016. i 2017. godine, nego tokom proleća istih tih godina.



Slika 6.34. Dijagram izdašnosti karstnih vrela Mokra i Divljana 2017. godina (podaci JKP „Naissus“)

Pored izdvojenih perioda sa maksimalnim izdašnostima karstnih vrela, karstna izdan istočnih padina Suve planine se odlikuje sa nekoliko perioda minimalnih izdašnosti (Slike 6.34. do 6.37.). Prvi je najčešće vezan za zimski period (januar), osim 2016. godine, 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 i prati ga kolebanje izdašnosti, koje je opisano u prethodnom tekstu. Treći, najizraženiji minimum vezan je za period recesije, kada su i beležene minimalne padavine, a karakteriše ga konstantno opadanje izdašnosti vrela. Period recesije u osmatranom periodu može da traje i preko 100 dana u slučaju vrela Mokra. Takođe, treba napomenuti da pravi recesioni period bez aktivnog prihranjivanja zapravo i ne postoji, budući da je tokom perioda recesije bilo kišnih epizoda koji su svakako imale uticaj na izdašnost posmatranih vrela. Ali, one se mogu uglavnom zanemariti jer je sa hidrograma (Slike 6.34. i 6.37.) uočljivo da nisu uticale na bitno povećanje izdašnosti, već su išle na popunjavanje isteklih dinamičkih rezervi (tzv. „stabilizaciju“).

Recesioni periodi vrela Mokra i Divljana sa dijagramima pražnjenja za period 2015-2017. godine predstavljani su na Slikama 6.35. i 6.36.



Slika 6.35. Recesioni periodi vrela Mokra i dijagrami pražnjenja za godine 2015-2017; sivi pravougaonici predstavljaju period recesije vrela (Petrović & Marinović, 2018; Petrović & Marinović, 2019a)

Analiza vrela Mokra (Slika 6.35. i Tabela 6.8.) pokazala je postojanje 3 mikro režima pražnjenja u 2015. godini, koji su ukupno trajali 98 dana, 2 mikro režima pražnjenja u 2016. godini (trajala 88 dana) i 4 mikro režima pražnjenja u 2017. godini, koji su ukupno trajali 137 dana (Petrović & Marinović, 2018). Količina istekle podzemne vode tokom recesije bila je $1,93 \cdot 10^6$ m³ u 2015. godini, $1,56 \cdot 10^6$ m³ u 2016. godini i $4,28 \cdot 10^6$ m³ u 2017. godini.

Majeova jednačina (formula 4.3.) može se razviti u redove ukoliko recesioni period ima više mikro režima pražnjenja, kao što je u slučaju vrela Mokra, tako da se dobijaju finalne jednačine pražnjenja celokupnog recesionog perioda za 2015, 2016 i 2017. godinu posebno (formule 6.4. - 6.6.):

$$Q_t = 0,278e^{-0,031044t} + 0,219e^{-0,009809t} + 0,162e^{-0,004112t} \quad (6.4.)$$

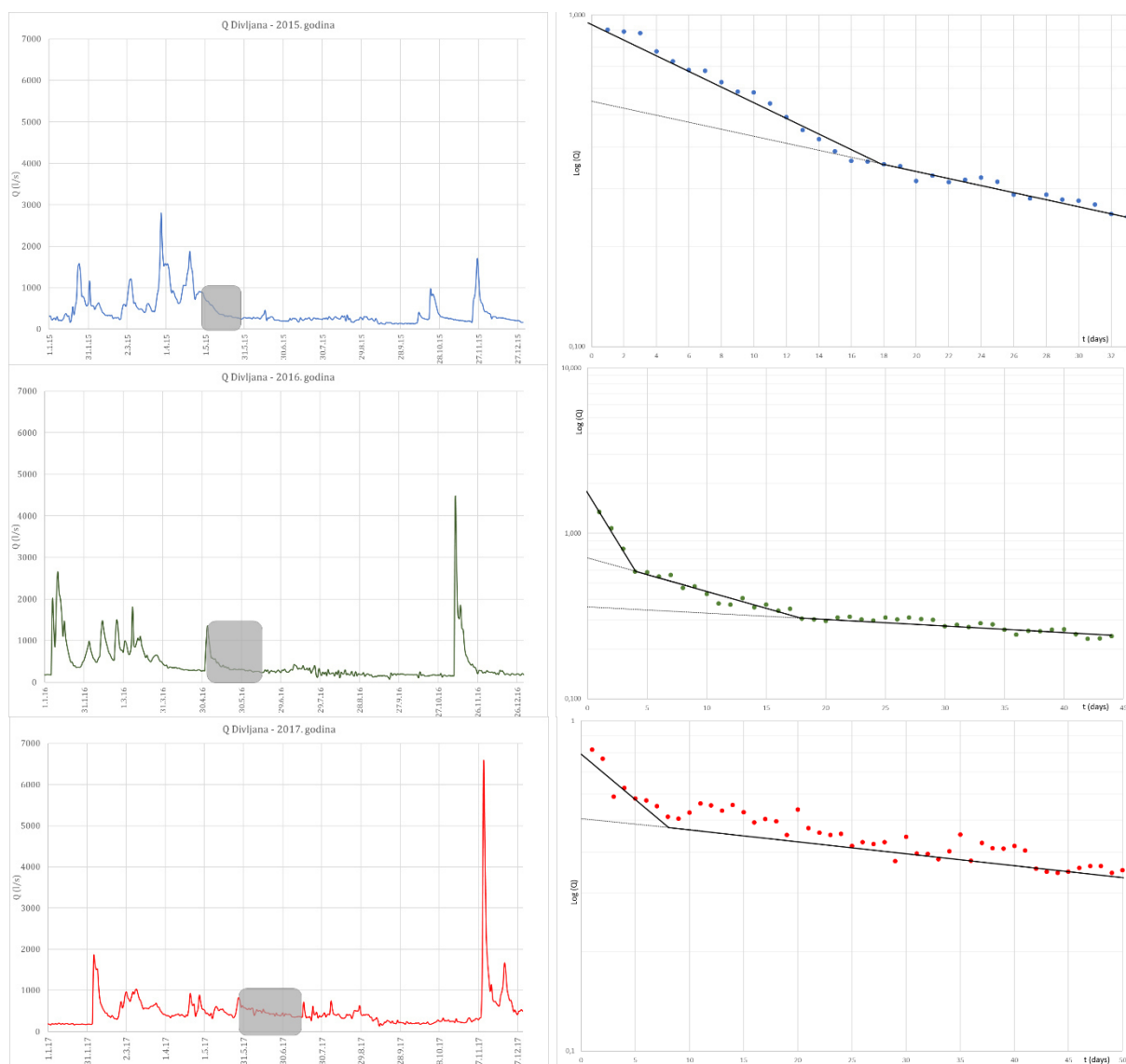
$$Q_t = 0,225e^{-0,022512t} + 0,145e^{-0,002292t} \quad (6.5.)$$

$$Q_t = 1,434e^{-0,124829t} + 0,412e^{-0,029623t} + 0,287e^{-0,016611t} + 0,157e^{-0,003932t} \quad (6.6.)$$

Tabela 6.8. Recesiona analiza za vrelo Mokra period januar 2015 – decembar 2017 (Petrović & Marinović, 2018; Petrović & Marinović, 2019a)

godina	Koeficijent recesije (α)		Vreme trajanja mikro-režima (dani)
2015	α_1	0,031044	7
	α_2	0,009809	32
	α_3	0,004112	59
	Recesioni period: 2.7. – 7.10.2015.		$\Sigma = 98$
	Količina istekle podzemne vode tokom recesije $V^* = 1,93 \cdot 10^6 \text{ m}^3$		
2016	α_1	0,022512	19
	α_2	0,002292	69
	Recesioni period: 16.7. – 11.10.2016.		$\Sigma = 88$
	Količina istekle podzemne vode tokom recesije $V^* = 1,56 \cdot 10^6 \text{ m}^3$		
2017	α_1	0,124829	10
	α_2	0,029623	12
	α_3	0,016611	36
	α_4	0,003932	79
	Recesioni period: 9.6. – 23.10.2017.		$\Sigma = 137$
	Količina istekle podzemne vode tokom recesije $V^* = 4,28 \cdot 10^6 \text{ m}^3$		

S druge strane, recesiona analiza vrele Divljana (Slika 6.36. i Tabela 6.9.) pokazuje da je recesija u 2015. godine imala 2 mikro režima koja su trajala ukupno 33 dana, 2 mikro režima koja su trajala 44 dana u 2016. godini i 3 mikro režima koji su trajali 50 dana u 2017. godini. Količina istekle podzemne vode tokom perioda recesije iznosila je $1,64 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ u 2015. godini, $2,10 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ u 2016. godini i $2,21 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ u 2017. godini.



Slika 6.36. Recesioni periodi vrela Divljana i dijagrami pražnjenja za godine 2015-2018, sivi pravougaonici predstavljaju period recesije vrela (Petrović & Marinović, 2018)

Ukoliko Majeovu jednačinu razvijemo u redove, jer recesioni period ima više mikrorožima pražnjenja i u slučaju vrela Divljana, dobijamo finalne jednačine pražnjenja celokupnog recesionog perioda za 2015, 2016 i 2017. godinu posebno (formule 6.7. - 6.9.):

$$Q_t = 0,904e^{-0,051950t} + 0,350e^{-0,025965t} \quad (6.7.)$$

$$Q_t = 1,350e^{-0,208543t} + 0,582e^{-0,046844t} + 0,301e^{-0,008020t} \quad (6.8.)$$

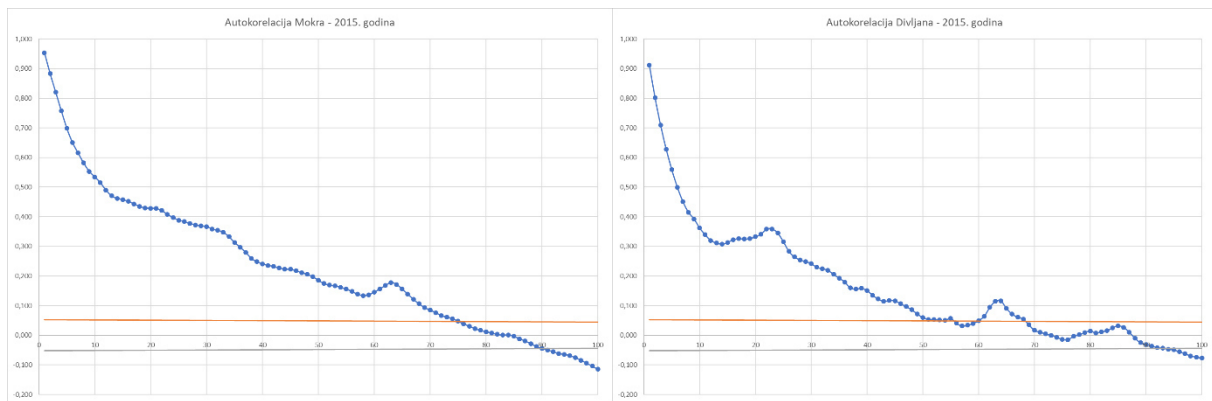
$$Q_t = 0,819e^{-0,058444t} + 0,505e^{-0,008910t} \quad (6.9.)$$

Tabela 6.9. Recesiona analiza za vrelo Divljana period januar 2015 – decembar 2018 (Petrović & Marinović, 2018)

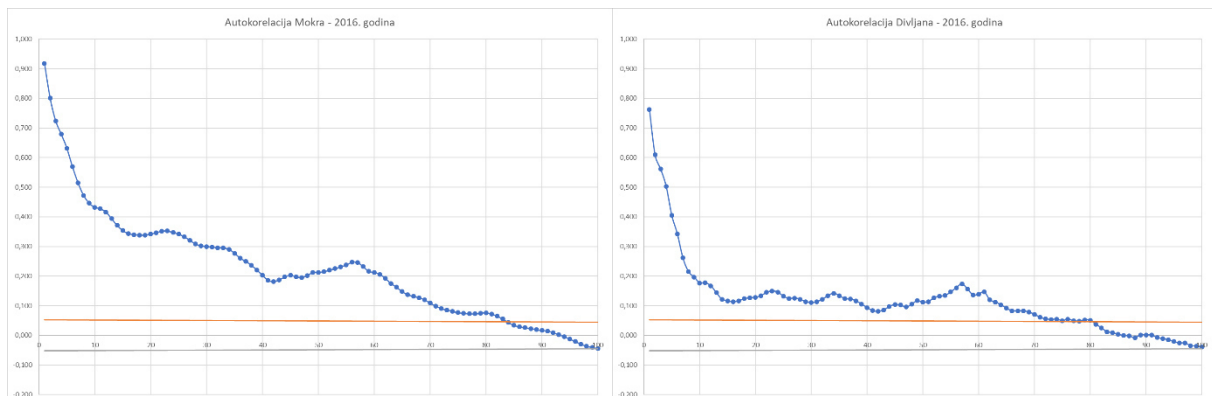
godina	Koeficijent recesije (α)		Vreme trajanja mikro-režima (dani)
2015	α_1	0,051950	18
	α_2	0,025965	15
	Recesioni period: 27.4. – 29.5.2015.		$\Sigma = 33$
	Količina istekle podzemne vode tokom recesije $V^* = 1,64 \cdot 10^6 \text{ m}^3$		
2016	α_1	0,208543	4
	α_2	0,046844	14
	α_3	0,008020	26
	Recesioni period: 4.5. – 16.6.2016.		$\Sigma = 44$
	Količina istekle podzemne vode tokom recesije $V^* = 2,10 \cdot 10^6 \text{ m}^3$		
2017	α_1	0,058444	8
	α_2	0,008910	42
	Recesioni period: 27.5. – 15.7.2017.		$\Sigma = 50$
	Količina istekle podzemne vode tokom recesije $V^* = 2,21 \cdot 10^6 \text{ m}^3$		

Duža recesija vrela Mokra mogla bi se objasniti pretpostavkom da je izdan koja se preko ovog vrela drenira veće zapremine. Na sporije pražnjenje podzemne vode na vrelu Mokra može uticati i činjenica da je vrelo Mokra za 8 metara hipsometrijski niže u odnosu na vrelo Divljana. Pri hipotetički istom nivou podzemnih voda u obe karstne izdani (u oba podsliva, ako su razdvojeni) izdan koja se drenira na vrelu Mokra je za 8 metara deblja i samim tim raspolaže sa većom zapreminom prostora koji može da popuni podzemna voda. Analiza perioda recesije na oba vrela, pokazala je da vrelo Mokra ima bolje retencione karakteristike u odnosu na Divljanu. Činjenica koja to potvrđuje je trajanje poslednjeg mikro režima tokom perioda recesije. Poslednji mikro režim vrela Mokra je svake godine duži od ukupne recesije vrela Divljana, što indikuje sporije i duže pražnjenje dela karstne izdani.

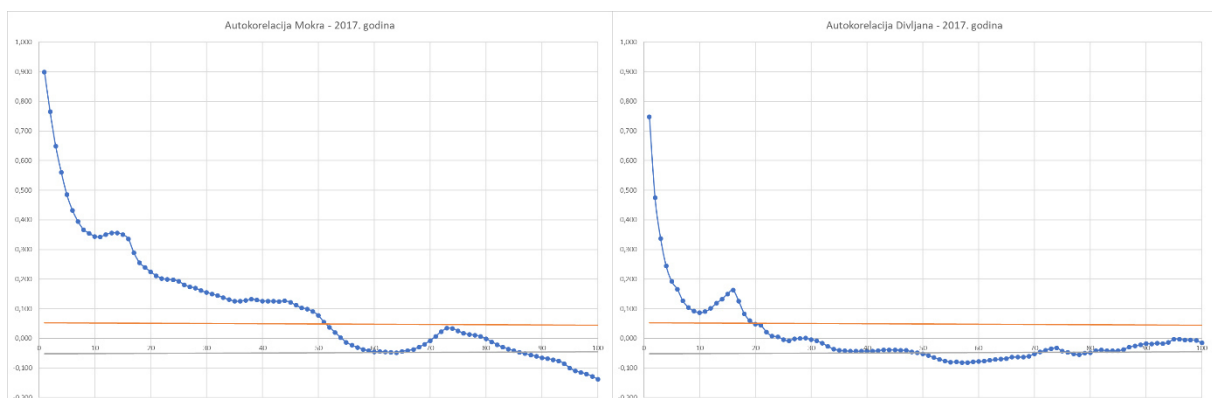
Sa kreiranih autokorelograma izdašnosti vrela Mokra i Divljana (Slike 6.37.-6.39.) možemo videti da vrelo Mokra ima mnogo dužu „memoriju“ tj. da postoji mnogo bolja retencija podzemnih voda i da su karstni kanali bolje razvijeni i povezani. Sa autokorelograma izdašnosti vrela Mokra se vidi da je memorija sistema oko 40 dana (osim 2017. godine, 22 dana), nakon čega se gubi autokorelativnost serije, odnosno slučajno promenljive vrednosti postaju nezavisne. Međutim, mogu se uočiti pikovi 45. i 56. dana (2016. godine), koji mogu biti posledica otapanja snega i nove infiltracije vode u izdan. Autokorelogrami izdašnosti vrela Divljana pokazuju da je memorija sistema izrazito različita od memorije karstnog sistema Mokre, 2015. godine memorija izdani je 35 dana, zatim ispod 10 dana 2016. i 2017 godine, nakon čega se gubi autokorelativnost serije, odnosno slučajno promenljive vrednosti postaju nezavisne. Međutim, mogu se uočiti pikovi: 2015. godine (63. dana), 2016. godine (23., 34. i 57. dana) i 2017. godine (16. dana) koji su verovatno posledica otapanja snega i zakasnele infiltracije vode u izdan.



Slika 6.37. Autokorelogrami izdašnosti Mokre i Divljane za 2015. godinu

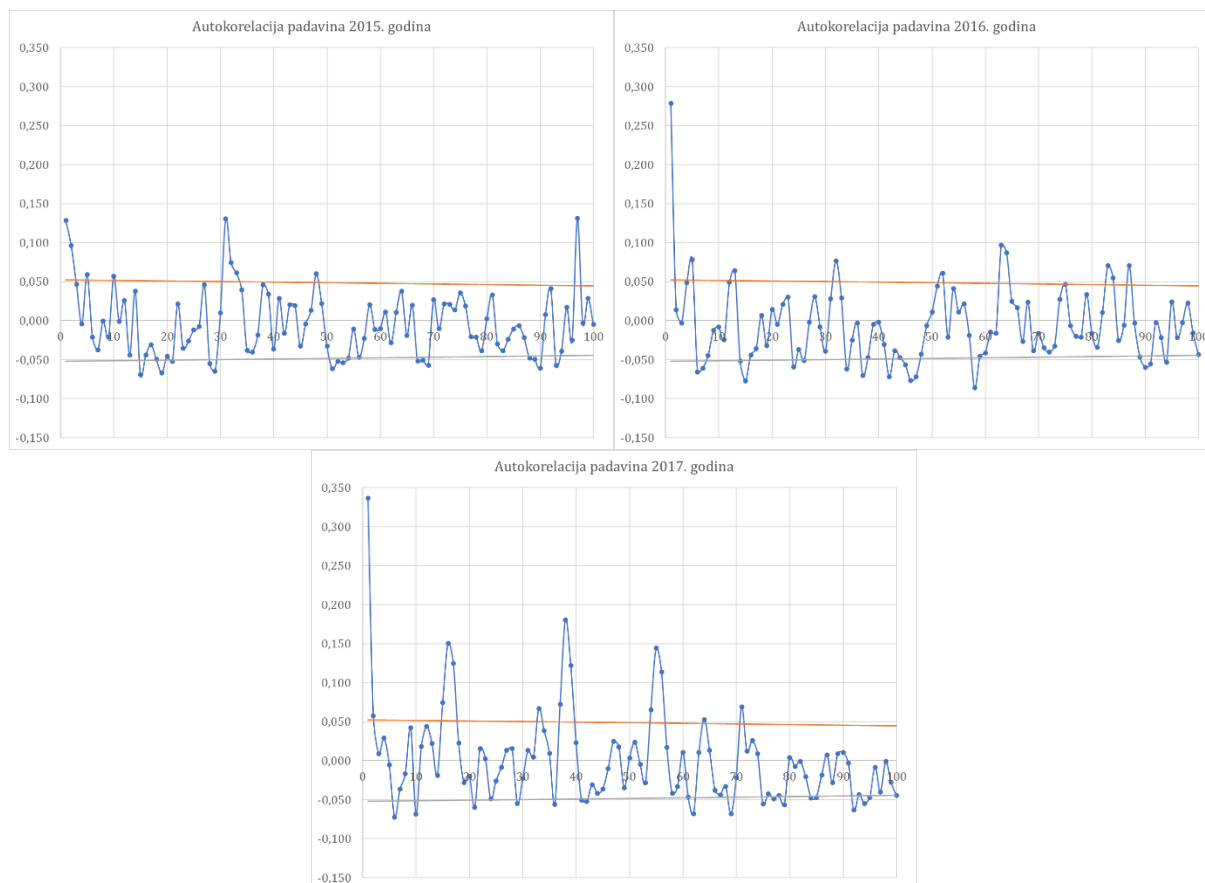


Slika 6.38. Autokorelogrami izdašnosti Mokre i Divljane za 2016. godinu



Slika 6.39. Autokorelogrami izdašnosti Mokre i Divljane za 2017. godinu

Sa druge strane, autokorelacija padavina sa klimatološke stanice Niš pokazuje memoriju sistema od samo 1-2 dana (Slika 6.40.), što je razumljivo imajući u vidu slučajni karakter ove promenljive.



Slika 6.40. Autokorelacija padavina sa KS Niš za period 2015-2017. godine

6.6.2.3. Bilans karstne izdani

U analizi bilansa (formula 5.6.) podzemnih voda vrela Mokra i Divljana iskorišćena je vrednost prosečne količine padavina koje se izluče u na meteorološkoj stanici Niš (1961-2010. RHMZ Srbije).

Na osnovu rezultata osmatranja padavina i količina vode koja je istekla na vrelima za dati period, na zajedničkom slivu vrela Mokra i Divljana, prosečno je u godišnjem ciklusu izlučeno 775 mm vodenog taloga, od toga 339 mm ispari ili podzemno i površinski otekne, a ostatak od 436 mm otekne kroz vrela. Veličina od 436 mm je određena preko podataka o osrednjennoj količini vode koja je istekla na vrelima tokom perioda 2015-2017. godine (podaci JKP „Naissus“) i za prethodno definisanu zajedničku površinu sliva oba vrela od 78 km² (Stevanović, 1991).

Tabela 6.10. Pregled osnovnih elemenata vodnog bilansa sliva vrela Mokra i Divljana u hidrološkoj godini

sliv	F (km ²)	P (mm)	ξ (mm)	h (mm)	Q (l/s)	W (10 ⁶ m ³)	q (l/s/km ²)	φ (%)
Mokra i Divljana	78	775	339	436	1080	34.058,9	13,85	56,2

U proseku kroz oba vrela istekne:

$$Q = 1080 \text{ l/s}$$

Što odgovara zapremini otekne vode u jednom godišnjem ciklusu, u iznosu od:

$$W = 34.058,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

Srednji godišnji moduo isticanja iznosi:

$$q = 13,85 \text{ l/s/km}^2.$$

Koeficijent oticaja, u iznosu od:

$$\varphi = 0,562$$

ukazuje da 56,2 % padavina palih na sliv istekne kroz vrela Mokra i Divljana, što je donekle u skladu sa rezultatima ispitivanja ležišta karstnih izdanskih voda u karstu Karpato-balkanida Srbije koji prema Stevanoviću (1991) može da iznosi od samo 1,3% (sliv Visočice) do preko 50% (sliv Krupajskog, Krupačkog i Ljuberačkih vrela). Isti autor nalazi da se za celokupno ležište „Suva planina“ (slivovi vrela: Golemo, Gornjedušničko, Ljuberađska, Divljana i Mokra) prosečna sumarna izdašnost vrela izražena kao procentualno učešće u padavinama kreće oko 44%.

6.6.2.4. Kvalitet karstnih izdanskih voda

Podzemne vode iz vrela na istočnom, južnom i zapadnom obodu Suve planine imaju sve odlike voda iz karsta (Petrović B, 2014a i 2014b): mala mineralizacija, temperatura vode koja odgovara lokalnim klimatskim uslovima, „neutralna“ pH vrednost. Sa druge strane podzemne vode severnog oboda (Ostrovica, Koritnik, Niška Banja) uglavnom imaju povišenu temperaturu i/ili mineralizaciju.

Tokom preliminarnih istraživanja (hidrogeološko rekognosciranje), koja su prethodila detaljnim terenskim istraživanjima, definisane su neke osnovne fizičko-hemijske karakteristike podzemnih voda šireg prostora Suve planine (Tabele 6.11. - 6.13.).

Temperatura podzemne vode na svim pojavama koje su osmatrane tokom hidrogeološkog rekognosciranja (Tabele 6.11. - 6.13.) kreće u širokom dijapazonu od 8,7°C (Bojanine vode, avgust 2013.) do 21,8°C (Banjica u Ostrovici, avgust 2013.), dok je srednja vrednost ako uzmemo u obzir sve pojave, i sve vrednosti koje su osmatrane 13,2°C.

Iako znamo da mutnoća može vrlo da varira u podzemnoj vodi karstnih izvora i vrela zabeležene vrednosti tokom preliminarnih osmatranja (Tabele 6.11. - 6.13.) pokazuju mali raspon od 0,19 (Rakoš česma, avgust 2013.) do 1,55 NTU (Provaljenik avgust 2013.).

Vrednost pH indeksa je jedan od stabilnijih parametara, čija je varijacija od 7,08 (Bežište) do 8,08 (Lazinje). Srednja vrednost specifične električne provodljivosti iznosi 494 $\mu\text{S/cm}$ (ukoliko posmatramo sve pojave), dok je maksimum zabeležen na vrelu Bežište iznosio 606 $\mu\text{S/cm}$, a minimum na vrelu Mokra 434 $\mu\text{S/cm}$. Rastvoreni kiseonik ima vrednosti od 0,43 do 10,93 mg/l, a oksido-redukциони potencijal se kreće u rasponu vrednosti od 150,0-282,8 mV.

Tabela 6.11. Fizičko-hemijski parametri određeni prilikom rekognosciranja terena avgust 2013. godine

Izvor	T _{vode} (°C)	mutnoća (NTU)	specifična elektroprov. (μS/cm)	Ukupne rastvorene materije (ppm)	pH	Oksido-redukциони potencijal (mV)
Banjica u Ostrovici	21,80	/	626,00	286,00	7,17	220,00
Pojilo u Vrgudincu	16,50	0,30	530,00	238,00	7,54	170,00
Vrgudinačko vrelo	14,90	0,22	531,00	235,00	7,41	197,00
Gornjekoritničko vrelo II	18,00	/	494,00	220,00	7,31	226,00
Gornjekoritničko vrelo III	11,10	/	482,00	198,00	7,40	190,00
Gornjekoritničko vrelo IV	17,00	/	407,00	202,00	7,60	72,00
Pojilo Bežište	10,00	/	526,00	211,00	7,08	70,00
Česma u Bežištu	10,20	/	550,00	240,00	7,38	61,50
Česma Provaljenik	15,30	1,55	655,00	283,00	7,53	42,70
Vrelo s. Izvor	12,60	0,45	555,00	236,00	7,28	27,00
Ljuberađa vrelo IX	15,30	/	444,00	184,00	7,34	17,70
Milivojin kladenac	16,90	/	594,00	261,00	7,41	22,50
Lazinje u Kaletincu	10,40	0,55	278,00	124,00	8,08	39,40
Vrelo u Sopotnici	10,30	0,19	405,00	178,00	7,51	26,40
Vrelo OŠ Sopotnica	12,60	0,39	396,00	180,00	7,70	17,50
Vrelo u G. Dušniku	10,20	/	321,00	136,00	7,64	26,70
Česma, Koritnik	12,70	0,95	635,00	269,00	7,39	33,20
Bojanine vode	8,70	0,53	385,00	163,00	7,96	25,50
Rakoš česma	13,00	0,19	356,00	154,00	7,85	27,50
<i>maksimum</i>	<i>21,8</i>	<i>1,55</i>	<i>655,00</i>	<i>286,00</i>	<i>8,08</i>	<i>226,00</i>
<i>minimum</i>	<i>8,7</i>	<i>0,19</i>	<i>278,00</i>	<i>124,00</i>	<i>7,08</i>	<i>17,50</i>
<i>sr. vrednost</i>	<i>13,785</i>	<i>0,532</i>	<i>475,80</i>	<i>207,60</i>	<i>7,55</i>	<i>78,29</i>

Tabela 6.12. Fizičko-hemijski parametri određeni prilikom rekognosciranja terena oktobar 2016. godine

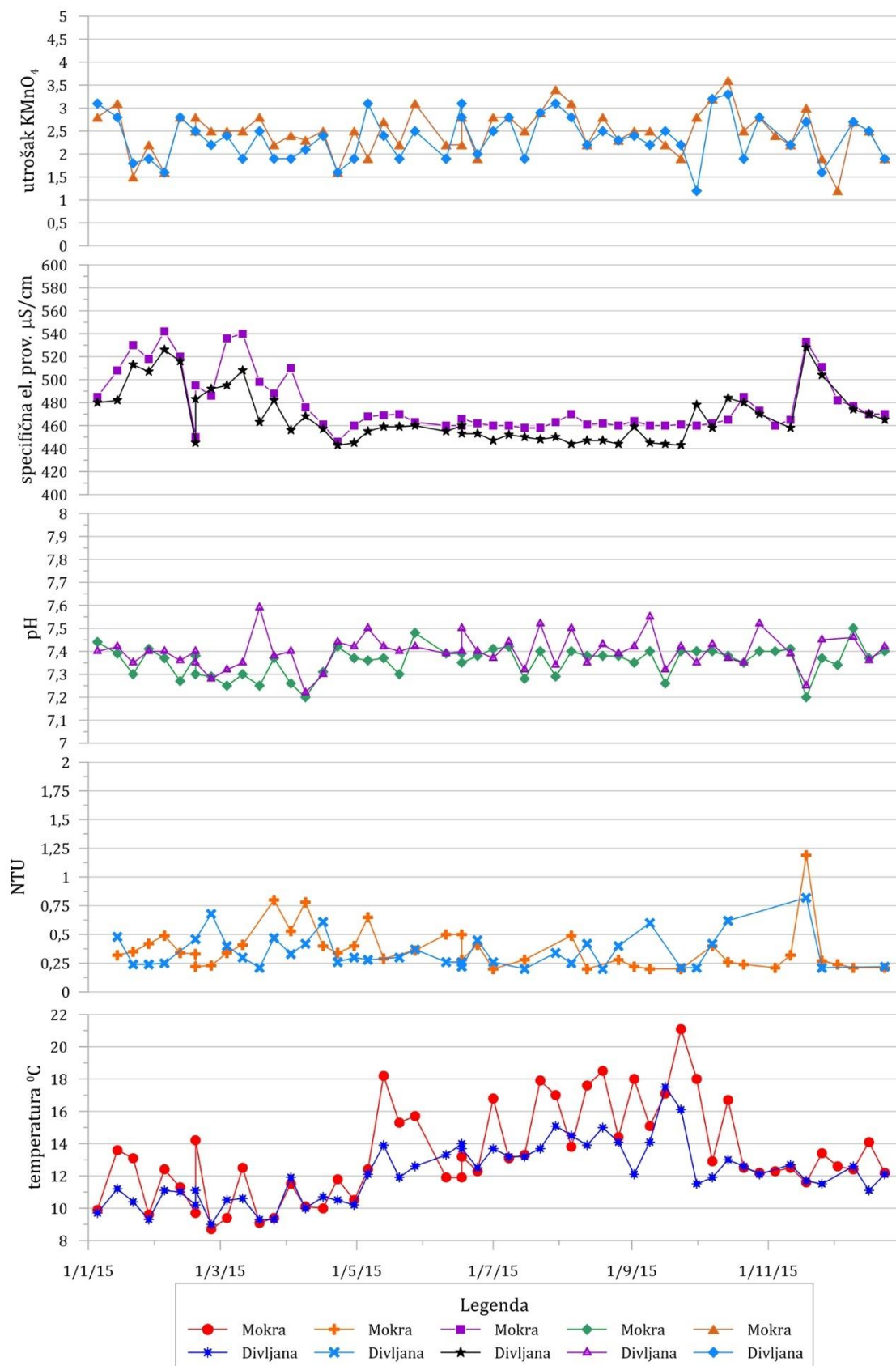
Izvor	T _{vode} (°C)	specifična elektroprovodljivost (μS/cm)	pH	Rastvoreni kiseonik (mg/l)
Banjica u Ostrovici	21,70	628,00	7,21	3,20
Vrgudinačko vrelo	11,00	537,00	7,39	8,51
Gornjekoritničko vrelo II	12,10	479,00	7,56	8,15
Gornjekoritničko vrelo IV	13,10	448,00	7,81	7,78
Česma u Bežištu	11,90	576,00	7,24	7,37
Vrelo u Izvoru	9,30	576,00	7,50	13,27
Ljuberađa vrelo IX	15,20	457,00	7,50	14,50
Vrelo u Sopotnici	10,70	413,00	7,57	10,37
Vrelo kod OŠ Sopotnica	11,30	400,00	7,62	10,37
Vrelo u Gornjem Dušniku	10,10	323,00	7,77	10,90
Rakoš česma	13,20	380,00	7,71	7,25
Belopalanačko vrelo	13,50	752,00	7,53	7,42
Mokra	17,50	456,00	7,78	6,20
Divljana	14,00	443,00	7,83	7,34
<i>maksimum</i>	<i>21,70</i>	<i>752,00</i>	<i>7,83</i>	<i>14,50</i>
<i>minimum</i>	<i>9,30</i>	<i>323,00</i>	<i>7,21</i>	<i>3,20</i>
<i>sr. vrednost</i>	<i>13,19</i>	<i>490,57</i>	<i>7,57</i>	<i>8,76</i>

Tabela 6.13. Fizičko-hemijski parametri određeni prilikom rekognosciranja terena oktobar 2017. godine

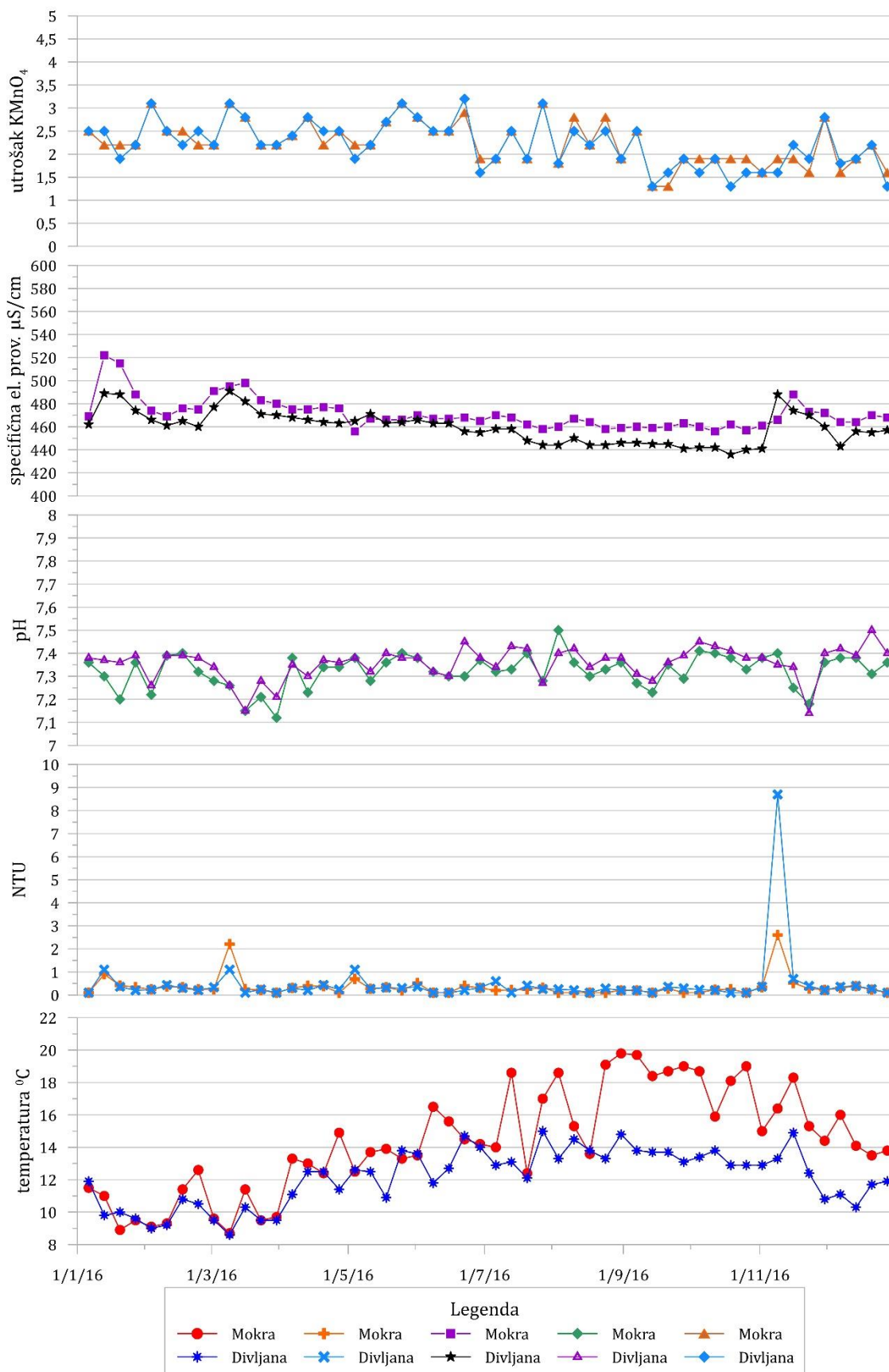
Izvor	T _{vode} (°C)	mutnoća (NTU)	specifična elektroprovodljivost (µS/cm)	pH
Gornjekoritničko vrelo IV	10,80	0,88	499,00	7,33
Vrelo u Izvoru	9,20	0,66	572,00	7,45
Rakoš česma	9,10	0,95	477,00	7,73
Mokra	18,90	1,07	455,00	7,34
Divljana	13,80	0,37	444,00	7,47
Ljuberađa IX	14,00	1,31	454,00	7,57
<i>maksimum</i>	<i>18,90</i>	<i>1,31</i>	<i>572,00</i>	<i>7,73</i>
<i>minimum</i>	<i>9,10</i>	<i>0,37</i>	<i>444,00</i>	<i>7,33</i>
<i>sr. vrednost</i>	<i>12,63</i>	<i>0,87</i>	<i>483,50</i>	<i>7,48</i>

Radi boljeg definisanja kvaliteta podzemnih voda karstne izdani koja se drenira na vrelima Mokra i Divljana, biće prikazani i podaci JKP „Naissus“ iz Niša, za period 2015-2017. godina. Ukoliko posmatramo analize „A“ obima koje „JKP Naissus“ vrši 3 puta mesečno i analize „B“ obima 1 mesečno, u periodu 2015-2017. godina, možemo da vidimo da je temperatura vode na vrelima Mokra i Divljana (Slike 6.41.-6.43.) tokom trogodišnjeg perioda varirala u rasponu od 8,6 °C do 21 °C, dok je srednja vrednost temperature podzemne vode na ta dva vrela 13,1°C. Mutnoća prevazilazi dozvoljene vrednosti (MDK¹² za vodu za piće od 1NTU) barem 3 puta godišnje u trajanju od nekoliko dana, najčešće u periodu otapanja snega i prolećnih obilnih padavina.

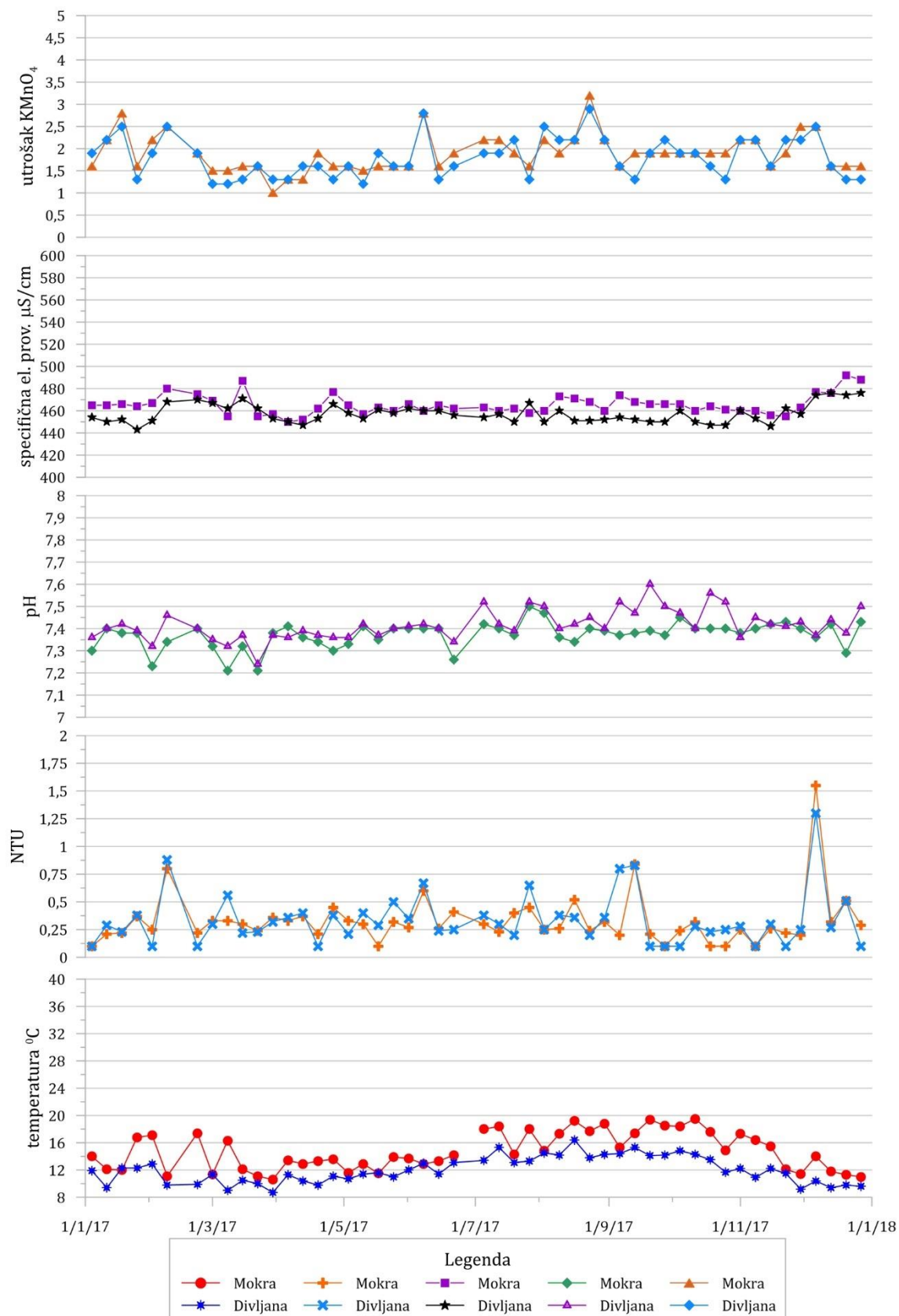
¹² MDK – maksimalno dozvoljena koncentracija (Sl. List SRJ, 42/98 i 44/99)



Slika 6.41. Izmene fizičko-hemijskih parametara podzemne vode na vrelima Mokra i Divljana 2015. godine (JKP „Naissus“)



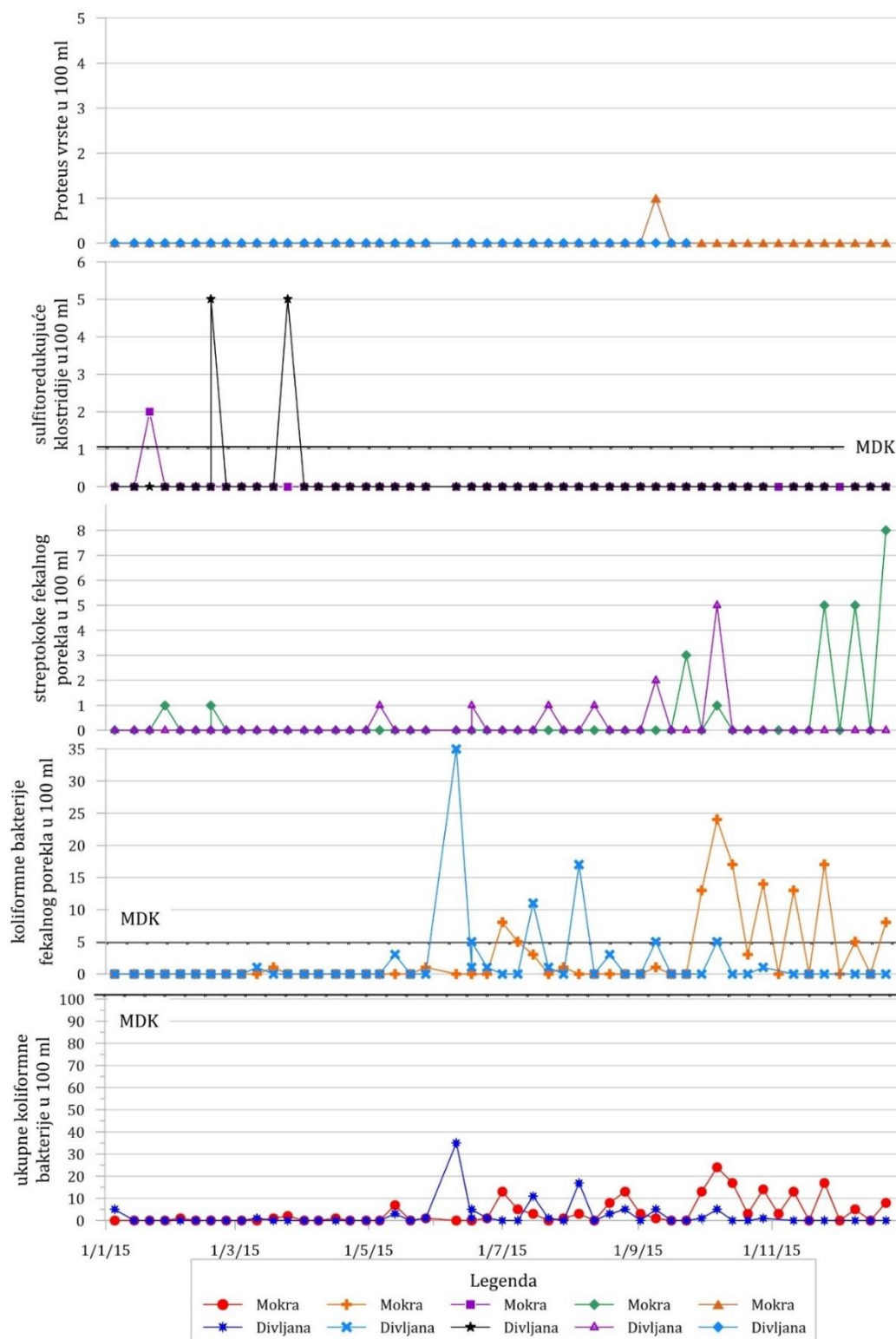
Slika 6.42. Izmene fizičko-hemijskih parametara podzemne vode na vrelima Mokra i Divljana 2016. godine (JKP „Naissus“)



Slika 6.43. Izmene fizičko-hemijskih parametara podzemne vode na vrelima Mokra i Divljana 2017. godine (JKP „Naissus“)

U pogledu mikrobioloških parametara (Slike 6.44-6.46.), podzemne vode koje ističu na vrelima Mokra i Divljana su uglavnom u okvirima koje dozvoljava Pravilnik (Službeni list Savezne Republike Jugoslavije, 1998). Treba naglasiti da su pojedini uzorci ipak bili mikrobiološki

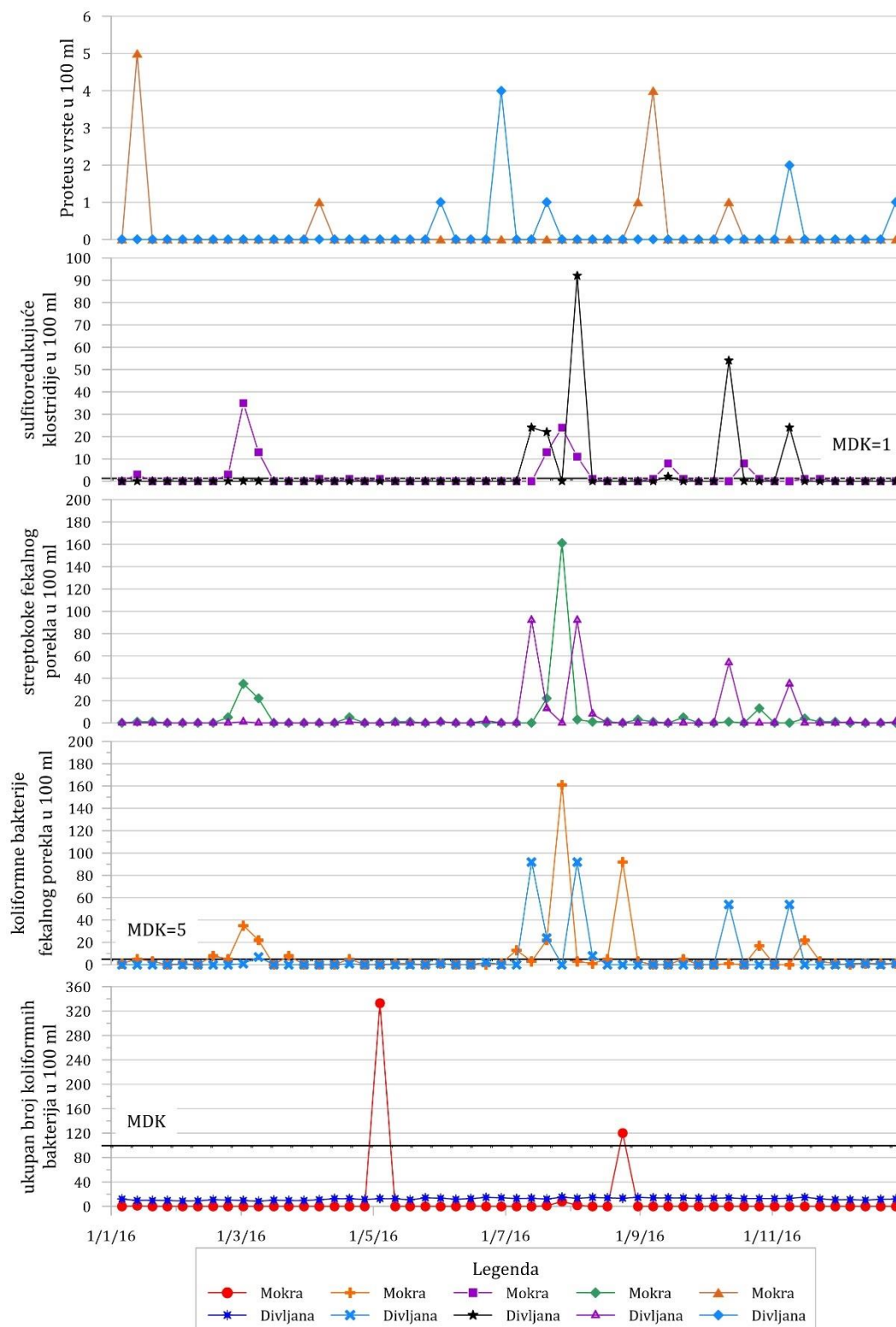
neispravni, ali se voda pre isporuke krajnjim korisnicima hlariše. Pojave bakterija u podzemnoj vodi uglavnom su povezane sa povećanjem izdašnosti vrela tj. intenzivnijem izlučivanju kišnice.



Slika 6.44. Izmene mikrobioloških parametara podzemne vode na vrelima Mokra i Divljana 2015. godine (JKP „Naissus“); MDK=0, gde nije posebno označeno

Ukupne koliformne bakterije se tokom 2015. godine javljaju na oba vrela nakon letnjih i jesenjih pljuskova, a tokom 2016. godine detektovane su na vrelu Mokra nakon prolećnih i letnjih pljusaka (Slike 6.44-6.46.). Ukupne koliformne bakterije su 2017. godine u podzemnoj vodi vrela Mokra nađene nakon intenzivnih padavina u novembru. Koliformne fekalne bakterije se

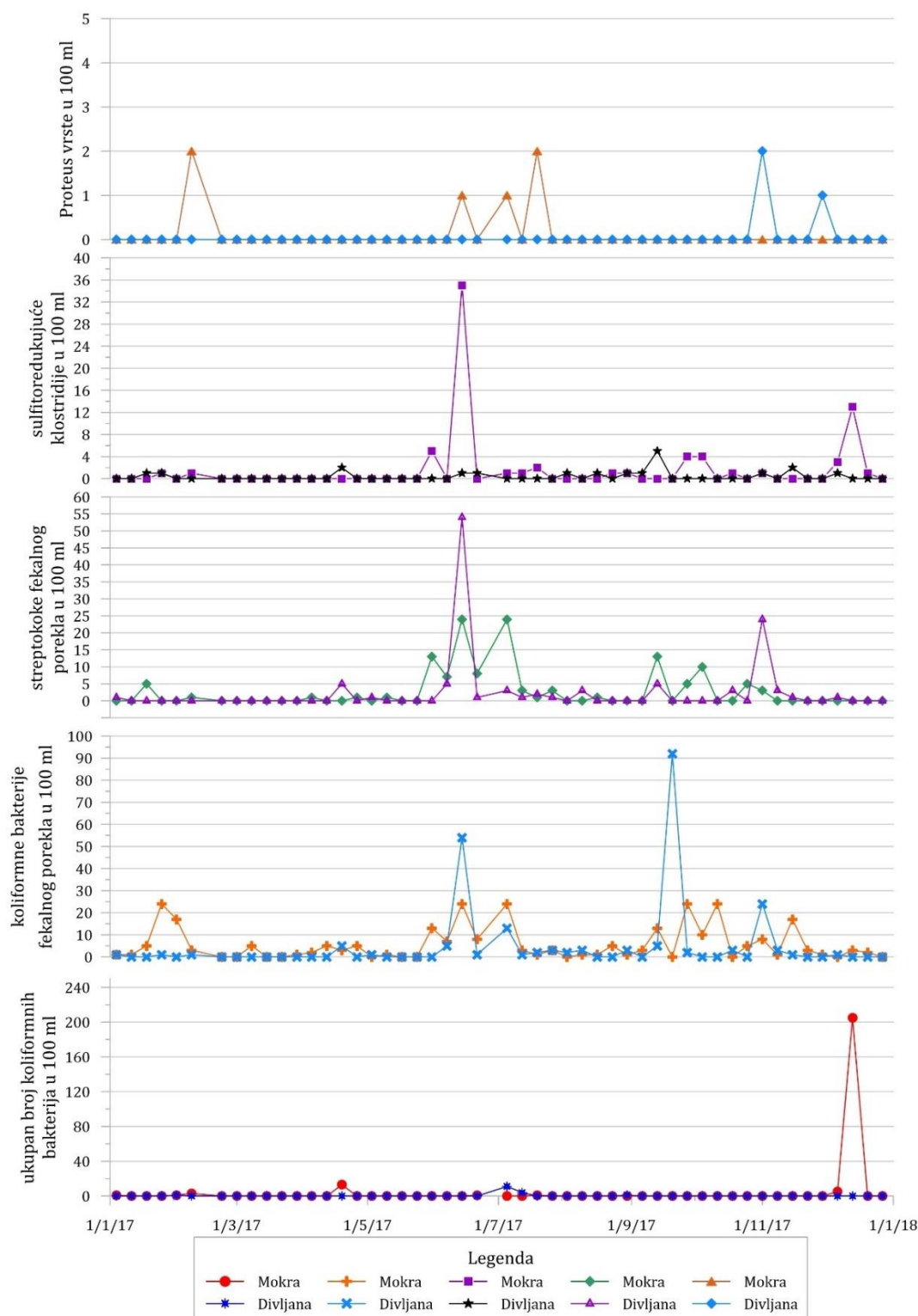
tokom 2015-2017. godine javljaju na oba vrela nakon intenzivnije kiše, nezavisno od trajanja padavinske epizode. Slično su detektovane i streptokoke fekalnog porekla, na oba vrela prilikom svake intenzivnije kišne epizode, u rasponu od 1 do čak 160 cfu.



Slika 6.45. Izmenе mikrobioloških parametara podzemne vode na vrelima Mokra i Divljana 2016. godine (JKP „Naissus“)

Sulfitoredukujuće klostridije su tokom 2015. godine nađene tokom prolećnih maksimalnih izdašnosti mart-april, na oba vrela, tokom 2016. godine su detektovane samo nakon intenzivnijih padavina, na oba vrela (Slike 6.44-6.46.). Dok su 2017. godine nađene u najvećem

broju (35 cfu) u podzemnoj vodi vrela Mokra nakon jednog junskog pljuska. *Proteus* vrste nisu detektovane u uzorcima iz 2015. godine, verovatno jer nije bilo dužih kišnih epizoda, kao tokom 2016. i 2017. godine. Tada su ove bakterije nađene u uzorcima uzetim nakon svake duže i intenzivnije padavinske epizode.



Slika 6.46. Izmenе mikrobioloških parametara podzemne vode na vrelima Mokra i Divljana 2017. godine (JKP „Naissus“)

Prema podacima o kvalitetu podzemnih voda vrela Mokra i Divljana za period 2015-2017. godina dobijenih iz analiza „V“ obima (Tabele 6.14 i 6.15.), može se izvesti zaključak da su vode odličnog kvaliteta. Temperatura vode se kretala od 11,3 do 15,2°C, mutnoća je varirala od 0,24

do 0,9 NTU, pH vrednost je bila izmerena u opsegu 7,31 do 7,41, dok je specifična električna provodljivost varirala od 461 do 486 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Utrošak KMnO_4 , kao parametar kojim se definiše opterećenje podzemne vode organskim materijama se kreće u rasponu vrednosti 2,0 do 2,5 mg/l, dakle sve vreme ispod granice MDK. Jedini problem sa aspekta vode za piće je povremeno mikrobiološko zagađenje, koje je inače čest problem kod podzemnih voda iz karstnih izdani.

Tabela 6.14. Rezultati analize kvaliteta podzemne vode vrela Mokra („V“ obim, JKP „Naissus“), osrednjene vrednosti parametara na osnovu 4 godišnje analize „V“ obima

Parametri kvaliteta podzemne vode	2015	2016	2017	MDK
Boja ($^{\circ}\text{Co-Pt ska}$)	<5	<5	<5	5
Mutnoća (NTU)	0,29	0,9	0,67	1
Temperatura vode ($^{\circ}\text{C}$)	13,9	15,2	14,6	
Miris/Ukus	bez	bez	bez	bez
pH	7,36	7,31	7,34	6,8-8,5
Suvi ostatak (mg/l)	306,75	294,75	287,25	
Ukupna tvrdoća ($^{\circ}\text{dh}$)	14,9	15,16	14,82	
Specifična provodljivost ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	486	472	467	1000
Utrošak KMnO_4 (mg/l)	2,3	2,4	2,1	8
Ugljen-dioksid (mg/l)	/	/	0,8	
Kalcijum (mg/l)	92,78	94,02	91,03	200
Magnezijum (mg/l)	8,07	8,43	8,76	50
Natrijum (mg/l)	1,23	1,4	1,73	150
Kalijum (mg/l)	0,62	0,48	0,52	12
Bikarbonati (mg/l)	437,85	403,83	416,85	
Hloridi (mg/l)	<5,0	<5,0	<5,0	200
Sulfati (mg/l)	7,94	6,23	9,1	250
Nitrati (mg/l)	3,8	3,7	2,8	50
Gvožđe (mg/l)	0,04	0,02	0,02	0,3
Mangan (mg/l)	<0,025	<0,025	<0,025	0,05
Hrom-ukupni (mg/l)	<0,01	<0,01	<0,01	0,05
Nitriti (mg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	0,03
Orto-fosfati	<0,01	<0,01	<0,01	0,15
Bakar (mg/l)	0	0	0	2
Olovo (mg/l)	0	0	0	0,01
Kadmijum (mg/l)	0	0	0	0,003
Fluoridi (mg/l)	0	0	0	1,2
Amonijak (mg/l)	<0,04	<0,04	<0,04	0,1
Cijanidi (mg/l)	0	0	0	0,05
Deterdženti (mg/l)	<0,01	<0,01	<0,01	0,1
Ukupni fenoli (mg/l)	0	0	0	0,001
Ukupna ulja i masti (mg/l)	<0,05	<0,05	<0,05	0,1
Mikrobiološka analiza				
Ukupan broj aerobnih mezofilnih bakterija TCV (cfu*/ml)	9	<1	2	100
Ukupan broj koliformnih bakterija TC (cfu/100 ml)	1	6**	4	5
Ukupan broj koliformnih bakterija fekalnog porekla-FC (cfu/100 ml)	1	6	2	5
Streptokoke fekalnog porekla-SF (cfu/100 ml)	0	4	1	0
Sulfitoredukujuće klostridije-SSA (cfu/100 ml)	0	1	0	1
Proteus vrste-PV (u 100 ml)	0	0	0	0
Pseudomonas aeruginosa-PA (cfu/100 ml)	0	0	0	0

Napomena: * engl. *colony-forming units* - cfu (broj bakterija koje mogu da formiraju koloniju); **vrednost koja prevazilazi MDK

Tabela 6.15. Rezultati analize kvaliteta podzemne vode vrela Divljana („V“ obim, JKP „Naissus“), osrednjene vrednosti parametara na osnovu 4 godišnje analize „V“ obima

Parametri kvaliteta podzemne vode	2015	2016	2017	MDK
Boja (°Co-Pt ska)	<5	<5	<5	5
Mutnoća (NTU)	0,24	0,55	0,83	1
Temperatura vode (°C)	11,7	11,3	11,7	
Miris/Ukus	bez	bez	bez	bez
pH	7,4	7,33	7,41	6,8-8,5
Suvi ostatak (mg/l)	287,75	293,25	281,5	
Ukupna tvrdoća (°dh)	14,54	15,02	14,74	
Specifična provodljivost (µS/cm)	472	461	463	1000
Utrošak KMnO ₄ (mg/l)	2,3	2,5	2	8
Ugljen-dioksid (mg/l)	/	/	0,8	
Kalcijum (mg/l)	92,84	89,05	90,46	200
Magnezijum (mg/l)	6,51	9,48	8,74	50
Natrijum (mg/l)	0,76	0,8	1,12	150
Kalijum (mg/l)	0,55	0,39	0,5	12
Bikarbonati (mg/l)	431,76	486,36	425,46	
Hloridi (mg/l)	<5,0	<5,0	<5,0	200
Sulfati (mg/l)	6,35	6,33	9,1	250
Nitrati (mg/l)	2,9	2,9	2,6	50
Gvožđe (mg/l)	0,02	<0,01	<0,03	0,3
Mangan (mg/l)	<0,025	<0,025	<0,025	0,05
Hrom-ukupni (mg/l)	<0,01	<0,01	<0,01	0,05
Nitriti (mg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	0,03
Orto-fosfati	<0,01	<0,01	<0,01	0,15
Bakar (mg/l)	0,001	0,001	0	2
Olovo (mg/l)	0	0	0	0,01
Kadmijum (mg/l)	0	0	0	0,003
Fluoridi (mg/l)	0	0	0	1,2
Amonijak (mg/l)	<0,04	<0,04	<0,04	0,1
Cijanidi (mg/l)	0	0	0	0,05
Deterdženti (mg/l)	<0,01	<0,01	<0,01	0,1
Ukupni fenoli (mg/l)	0	0	0	0,001
Ukupna ulja i masti (mg/l)	<0,05	<0,05	<0,05	0,1
Mikrobiološka analiza				
Ukupan broj aerobnih mezofilnih bakterija TCV (cfu/ml)	<1	<1	<1	100
Ukupan broj koliformnih bakterija TC (cfu/100 ml)	1	4	3	5
Ukupan broj koliformnih bakterija fekalnog porekla-FC (cfu/100 ml)	0	1	3	5
Streptokoke fekalnog porekla-SF (cfu/100 ml)	1	0	1	0
Sulfitoredukujuće klostridije-SSA (cfu/100 ml)	0	0	0	1
Proteus vrste-PV (u 100 ml)	0	0	0	0
Pseudomonas aeruginosa-PA (cfu/100 ml)	0	0	0	0

IV REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

7. Rezultati istraživanja

Istraživanja za potrebe izrade doktorske disertacije su se odvijala tokom perioda 2013-2020. godina, u skladu sa ostvarivanjem tehničkih i ekonomskih uslova, u nekoliko faza. Detaljna istraživanja za izradu disertacije su obavljena u periodu decembar 2017- mart 2020. godine. Izvršeni su određeni istražni radovi (npr. hidrogeološko kartiranje, geofizička merenja, petrološka istraživanja, pedološka istraživanja) uz nekoliko prekida, ali sa druge strane određena istraživanja vršena su konstantno za vreme trajanja istraživanja (npr. terenska fizičko-hemijska ispitivanja podzemnih voda i uzorkovanja podzemne vode za vršenje hemijskih i drugih analiza, monitoring kvantiteta na odabranim vrelima itd.), sprovedena su dva eksperimenta u terenskim uslovima, kao i jedan eksperiment u veštačkim (laboratorijskim) uslovima.

Terenska istraživanja sprovedena na istočnim padinama Suve planine, delom i na ostatku masiva, vršena su u toku 2018. godine, izuzev jednog uzorkovanja vode za utvrđivanje sadržaja stabilnih izotopa u decembru 2017. godine, kada su u vodi utvrđivani samo sadržaji stabilnih izotopa kiseonika i deuterijuma. U periodu 2018. godine osmatrane su na mesečnom nivou fizičko-hemijske, kvantitativne i izotopske karakteristike pojava i objekata u okviru izdvojenog užeg područja, kao i ostatka pojava na kvartalnom nivou i izrađeno je ukupno:

- 26 analiza sadržaja stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H (26 analiza ^{18}O i 26 analiza ^2H) u padavinama,
- 77 analiza sadržaja stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H (77 analiza ^{18}O i 77 analiza ^2H) u vodi,
- 36 skraćene hemijske analize sadržaja jonskog sastava u vodi i 55 terenskih skraćenih hemijskih analiza podzemne vode,
- 91 merenje fizičko-hemijskih karakteristika voda *in situ* tokom monitoringa kvaliteta, pomoću WTW prenosne terenske laboratorije Centra za hidrogeologiju karsta (CHK) i to: WTW pH-metar sa temperaturom - PH 340i/set, WTW konduktivimetar sa temperaturom - Cond 340i/set i WTW kiseonik sa temperaturom - Oxi 340i/set,
- 9 analiza sadržaja mikroelemenata u podzemnim vodama (i procednoj vodi pećine Peč),
- 9 analiza za geohemijsku karakterizaciju zemljišta (8 uzoraka) i stene (1 uzorak),
- 4 analize uzorka stene, 3 uzorka sa uže lokacije pećine Peč i 1 sa uže lokacije vrela Mokra,
- 85 mikrobioloških analiza osnovnog A obima tzv. sanitarna analiza podzemne vode,
- 31 hemijskih analiza sadržaja elemenata azotne trijade: amonijak, nitriti i nitrati
- 55 hemijskih analiza sadržaja nitrata.

Takođe, za potrebe definisanja kvaliteta podzemnih voda na vrelima Mokra i Divljana, preuzete su već izrađene hemijske i mikrobiološke analize (JKP „Naissus, Niš“): 78 hemijske analize „A“ obima, 78 mikrobiološke analize „A“ obima, 20 hemijske analize „B“ obima, 20 mikrobiološke analize „B“ obima i 8 analiza „V“ obima.

Za potrebe realizacije opita trasiranja pomoću Na-fluoresceina izvršeno je prikupljanje i analiza 144 uzorka procedne vode u pećini Peč, vizuelno ispitivanje prikupljenih uzoraka pomoću fluorolampe na kraju svakog ciklusa od 24h, dok je precizna determinacija svih uzoraka izvršena pomoću fluorometra¹³ u okviru laboratorija HET-a (Hidroelektrane na Trebišnjici: Služba za laboratorijska ispitivanja, Sektor za razvoj i istraživanje, Direkcija za proizvodnju i tehničke poslove). Takođe, prilikom realizacije testa izvršeno je i merenje temperature i specifične električne provodljivosti procedne vode 236 puta, pomoću uređaja za terenska merenja WTW konduktivimetar sa temperaturom -Cond 340i/set.

¹³ 10AU Field and Laboratory Fluorometer, Turner Design

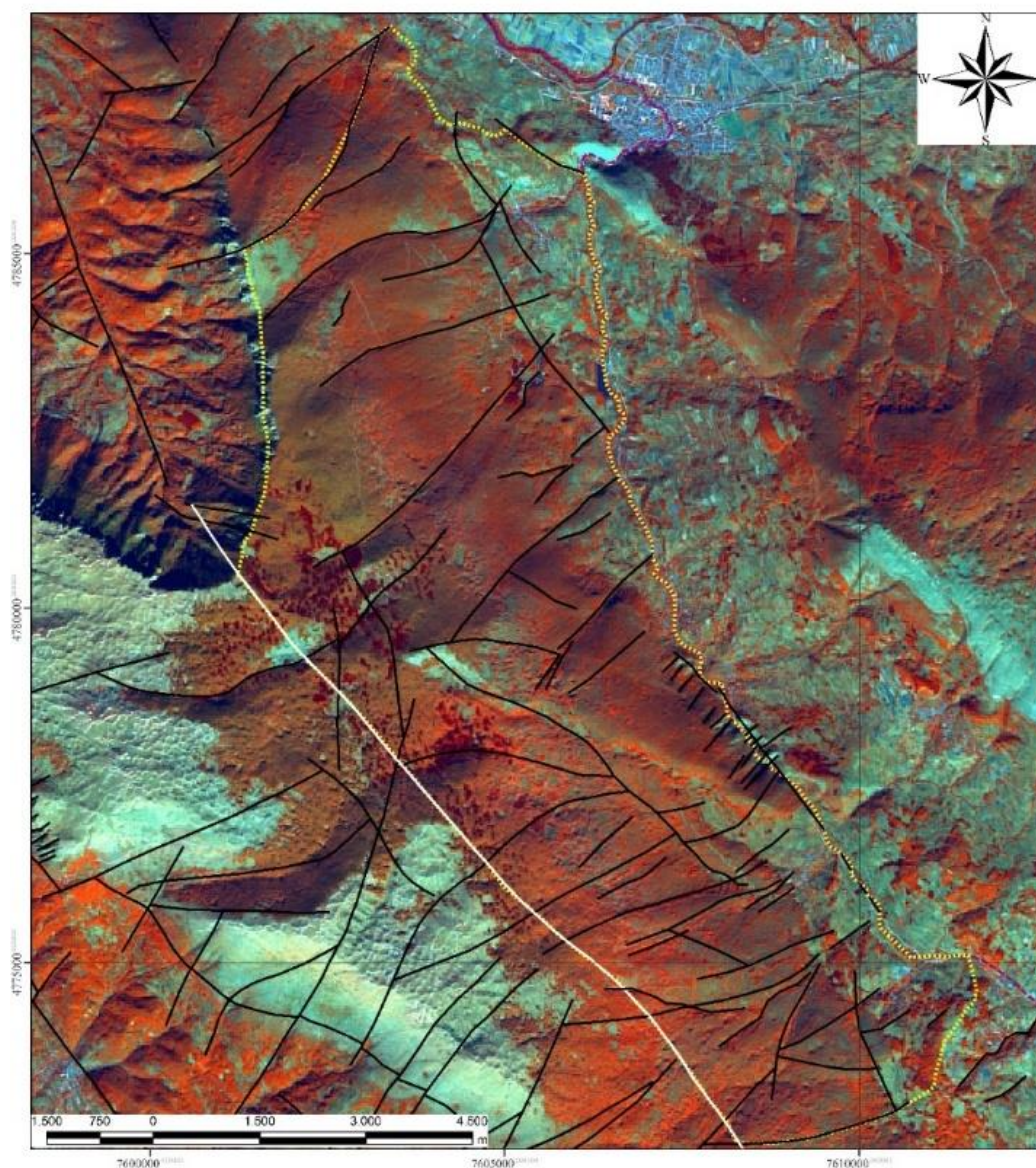
Za potrebe eksperimenta sa „lakim“ kontaminantom u vidu rastvora stajskog đubriva na lokaciji pećine Peč, mikrobiološki je analizirano 85 uzoraka vode u Institutu za javno zdravlje Niš, Centar za higijenu i humanu ekologiju. Analizirane su procedne vode iz pećine, kao i uzorci zagađujućih supstanci (u vidu pripremljenog rastvora). Takođe, tokom eksperimenta je praćena i koncentracija azotnih jedinjenja: amonijum jona, nitrita i nitrata, i za te potrebe je prikupljen i analiziran 31 uzorak vode. Tokom eksperimenta su praćeni i osnovni fizičko-hemijski parametri procedne vode pomoću uređaja za terenska merenja Hanna Instruments: HI98194 (CHK).

Tokom realizacije laboratorijskog eksperimenta na fizičkom modelu epikarsta mereni su osnovni fizičko-hemijski parametri procedne vode pomoću uređaja za terenska merenja WTW i Hanna Instruments (CHK), a izvršena je hemijska analiza sadržaja nitrata u 55 uzoraka vode: 30 analiza pomoću uređaja Exact Micro 20 – Industrial Test System Inc. (CHK), a 25 analiza u Institutu za javno zdravlje u Kragujevcu.

7.1. Rezultati daljinske detekcije i strukturno-geoloških istraživanja

Geološki strukturni odnosi na širem području istraživanja uzrokovani su složenim tektonskim odnosima sa brojnim i raznovrsnim razlomnim i nabornim strukturnim oblicima, često velikih dimenzija (Vujisić et al, 1971). U savremenom morfostrukturnom sklopu mogu se izdvojiti 4 tektonske jedinice (Slika 6.19. u poglavlju 6.5.2.), koje su međusobno odvojene longitudinalnim dislokacijama regionalnog značaja. Od najvećeg značaja za uže područje istraživanja je C – Gornjačko-suvoplaninska zona, koja je ograničena Suvoplaninskom dislokacijom sa zapada i Lužničkom dislokacijom sa istoka. Tektonske jedinice imaju osnovno pružanje SZ—JI ili SSZ—JJI. Za potrebe novijih istraživanja izvršena je analiza rupturnog sklopa uz primenu daljinske detekcije i satelitskih snimaka (Landsat 8).

Poboljšavanje kontrasta satelitskih snimaka je izvršeno selektivnom linearnom transformacijom originalnih vrednosti piksela (Slika 7.1.). Kolor-kompozitni snimci su omogućili lakše uočavanje lineara i izradu karte rupturnog sklopa (Slika 7.2.), uz upotrebu funkcije konvolucije (WEB izvor 3) u filtriranju snimaka. Snimci su prevedeni u odgovarajuću geografsku projekciju tako da se svi dobijeni podaci mogu kombinovati sa drugim podlogama (topografskim, geološkim, hidrogeološkim i dr. kartama).

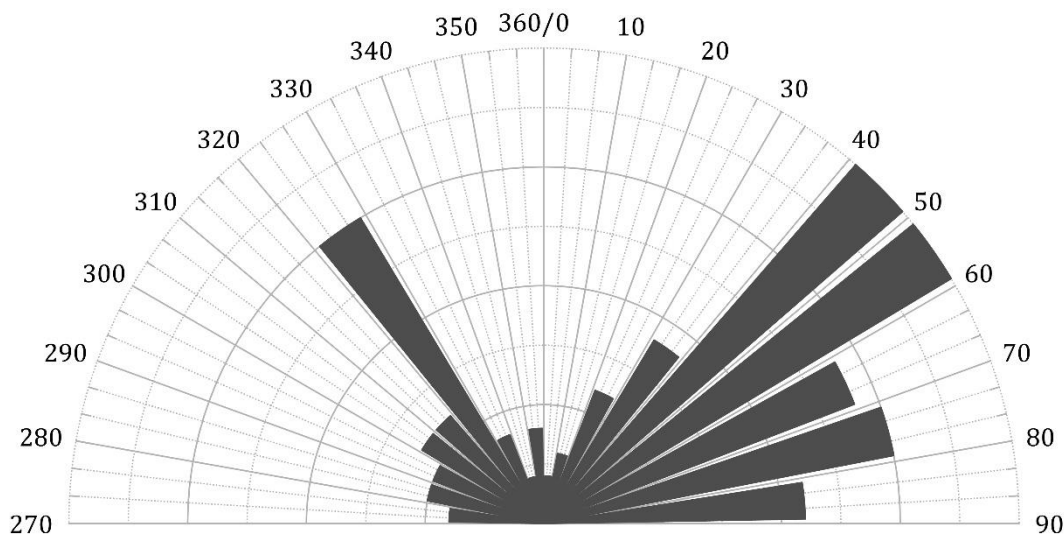


Slika 7.1. Filtrirani kompozitni snimak 567, sa izdvojenim lineamentima – crne linije (Landsat- image courtesy of the U.S. Geological Survey)



Slika 7.2. Filtrirani kompozitni snimak 762, sa izdvojenim lineamentima – crne linije (Landsat- image courtesy of the U.S. Geological Survey)

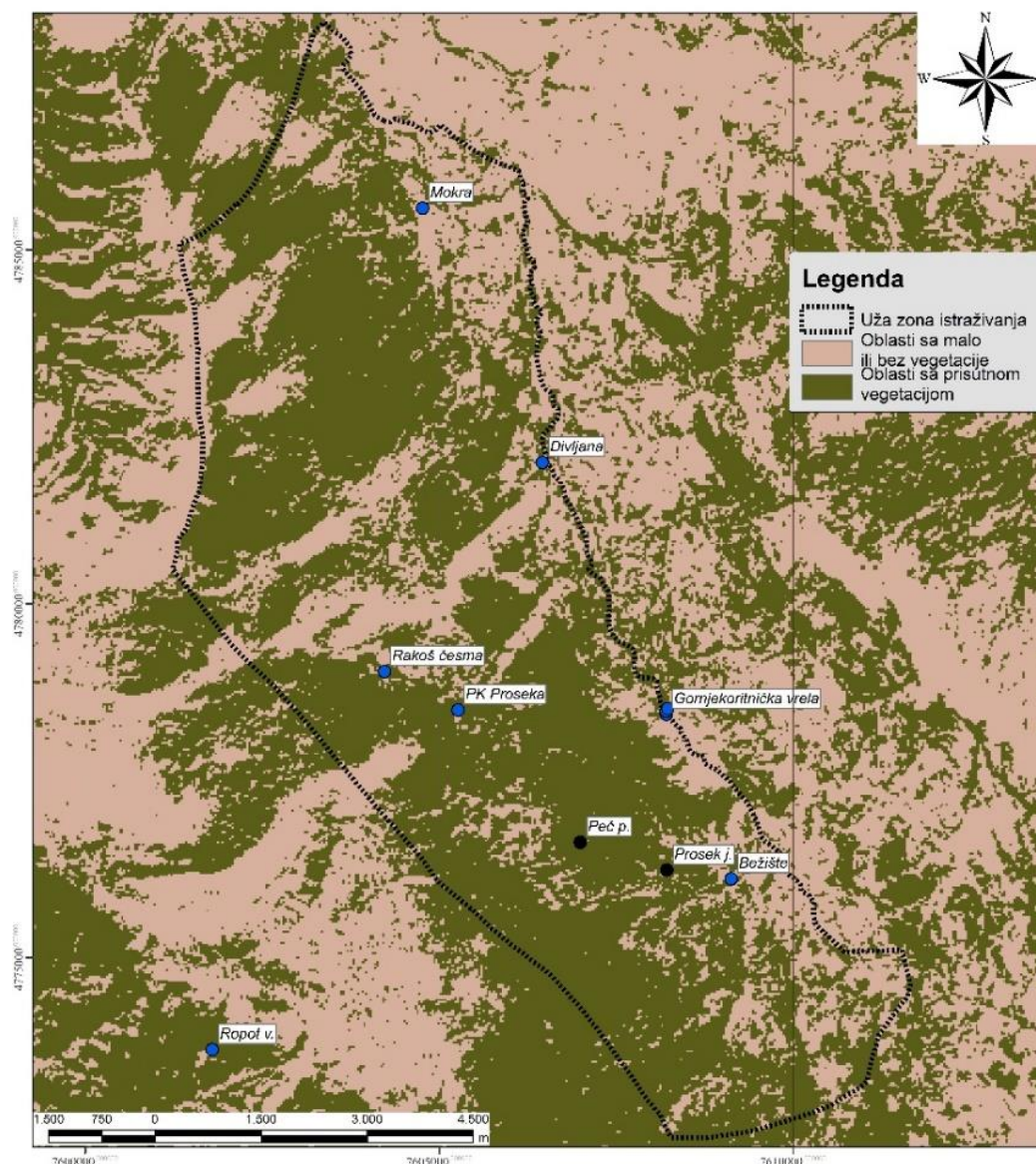
Izdvojeni lineamenti na procesiranim snimcima 567 i 762 su u stvari rupture regionalnog karaktera. Statistički su obrađene rupture koje se nalaze u okviru užeg područja istraživanja (Slika 7.3.). Na polurozeti orijentacije ruptura istočnih padina Suve planine uočava se da postoji određen broj ruptura koji se pruža paralelno osi antiklinale Suve planine, međutim najveći broj ruptura je pružanja pravca severoistok-jugozapad, dok je submaksimum pravca pružanja ISI-ZJZ, koji su u stvari transverzalni pravci pružanja na pravac pružanja ose antiklinale.



Slika 7.3. Polurozeta pružanja lineamenata u okviru užeg područja istraživanja

U skladu sa rezultatima analize tektonskog sklopa (Vujisić et al, 1971) i analize rupturnog sklopa, koja je urađena uz pomoć daljinske detekcije, stoji zaključak da je kretanje podzemnih voda usmereno od ose antiklinale ka njenim krilima. U slučaju istočnih padina Suve planine, podzemne vode su usmerene ka severoistoku, gde se javljaju u pogledu izdašnosti, dva najjača i najstabilnija vrela Mokra i Divljana. Isticanje podzemne vode na vrelima Gornje Koritnice i Bežište je kontrolisano rupturama koje su pravca pružanja između 60° i 90° . Takođe, možemo reći da celokupni karstni sistem istočnih padina Suve planine ima blagi nagib ka jugoistoku, jer i osa antiklinale tone u tom smeru.

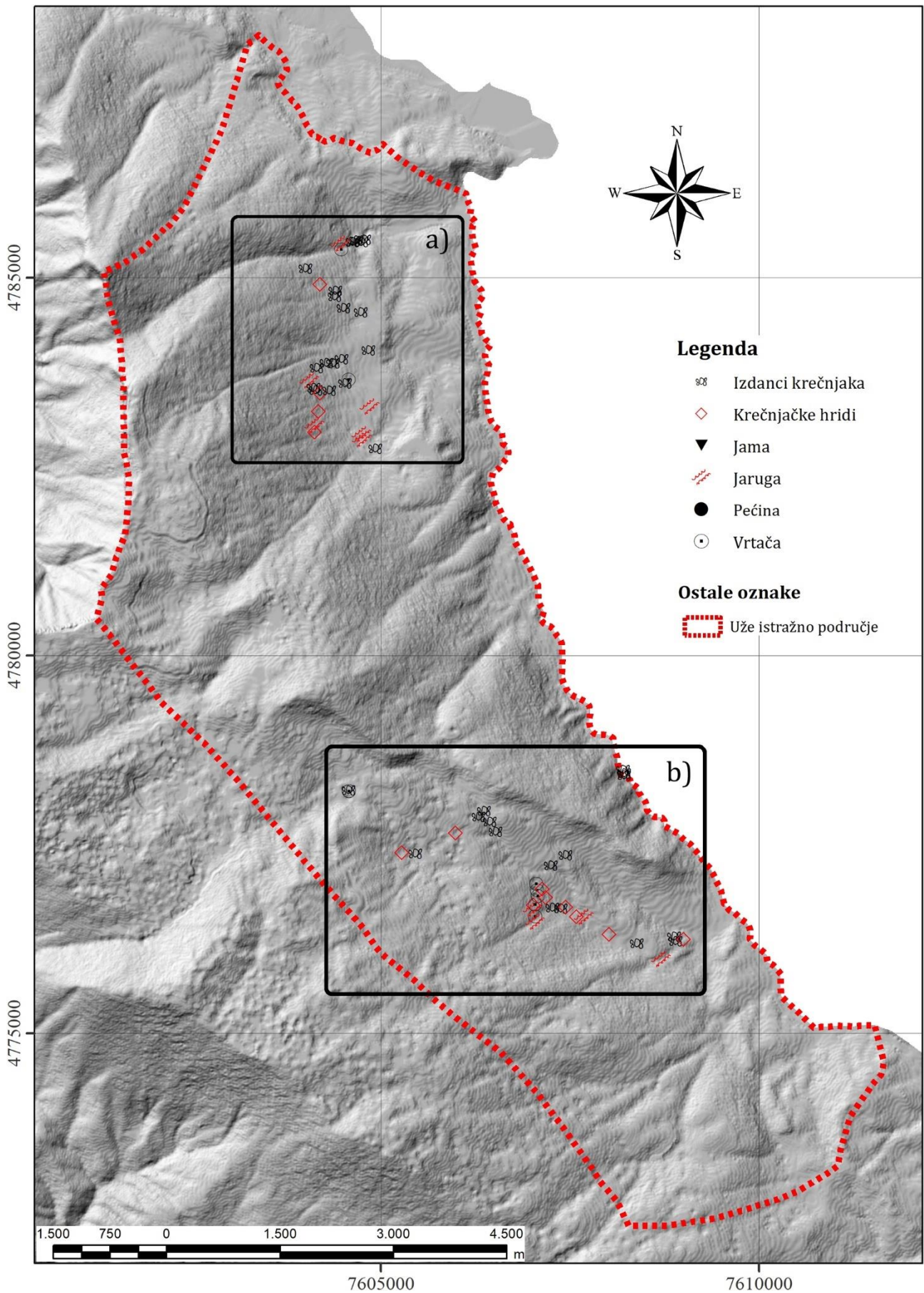
Daljinska detekcija je iskorišćena prilikom analize vegetacije, određivanjem NDMI. NDMI indeks određuje prisustvo guste vegetacije šumskog tipa sa gustim krošnjama, tj. visokim sadržajem zelenila (hlorofila), što u slučaju niskog prizemnog rastinja nije slučaj. Pomoću NDMI se mogu definisati određene oblasti sa povišenom količinom vlage u tlu u slojevima ispod, što u slučaju karstnih terena, može da indicira postojanje epikarstne izdani. Snimak nakon procesiranja prikazuje raspored vegetacije na karti kao i njen status (Slika 7.4.). Analizom karte može se uočiti da postoje delovi Suve planine koji su okarakterisani kao tereni sa potpunim odsustvom vegetacije, u slučaju ogoljenih litica, koje se javljaju zapadno i severozapadno u odnosu na uže područje istraživanja. Vidi se da je filtrirani snimak samo potvrdio činjenicu da na istočnim padinama Suve planine ipak preovladava teren koji je obrastao gustom vegetacijom (listopadne i zimzelene šume, kao i srednje visoko žbunasto rastinje). Sa druge strane postoje delovi planine na kojima je vegetacija u vidu pašnjaka okarakterisana kao oblast bez vegetacije. Ovaj indeks može ukazati na potencijalni pojačani uticaj šumske vegetacije na proces nastanka epikarsta, radom korenovog sistema, zadržavanjem drugog živog sveta u stelji nastaloj od opalog lišća, povećavanjem sadržaja ugljen-dioksida usled odvijanja životnih procesa i procesa raspadanja organske materije, kao i drugih hemijskih jedinjenja koja mogu imati korozivni uticaj na krečnjak u podini.



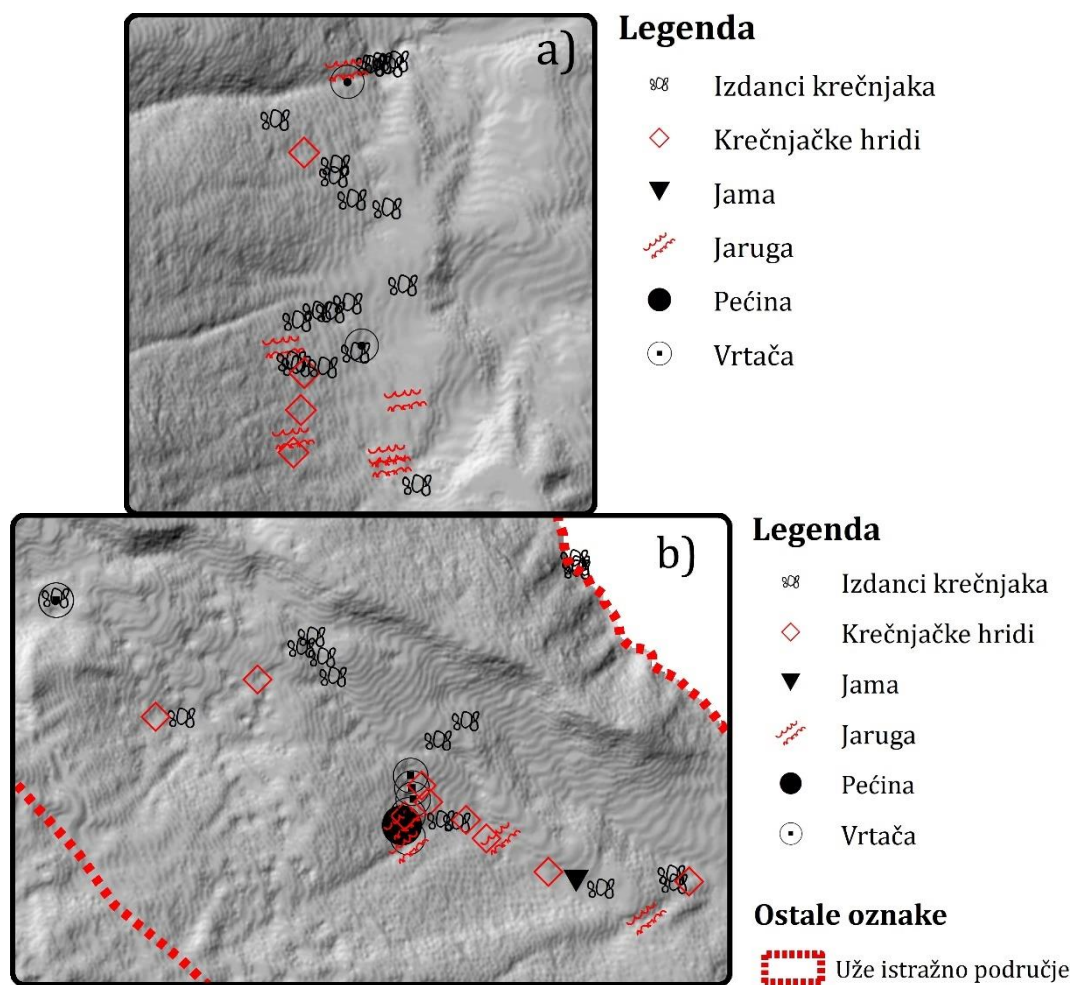
Slika 7.4. Normalizovani indeks razlike vegetacije (NDVI) na području istraživanja

7.2. Rezultati geomorfoloških i speleoloških istraživanja

Geomorfološka istraživanja su vršena u nekoliko etapa, od kojih je najznačajniji deo obavljen tokom letnjih meseci 2018. godine. Utvrđeno je postojanje, broj, raspored i veličina krupnijih geomorfoloških objekata kao što su vrtače, uvale, jame i pećine, na delu istočnih padina Suve planine koji spada u užu deo istražnog prostora (Slika 7.5. i 7.6.). Snimanje koordinata pojava i objekata na terenu izvršeno je sistemom za globalno pozicioniranje (eng. *Global Positioning System* – GPS), dok su dimenzije objekata određivane pomoću merne trake i laserskog daljinomera (Leica Disto Lite 5).



Slika 7.5. Površinski i podzemni oblici, snimljeni tokom terenskih istraživanja



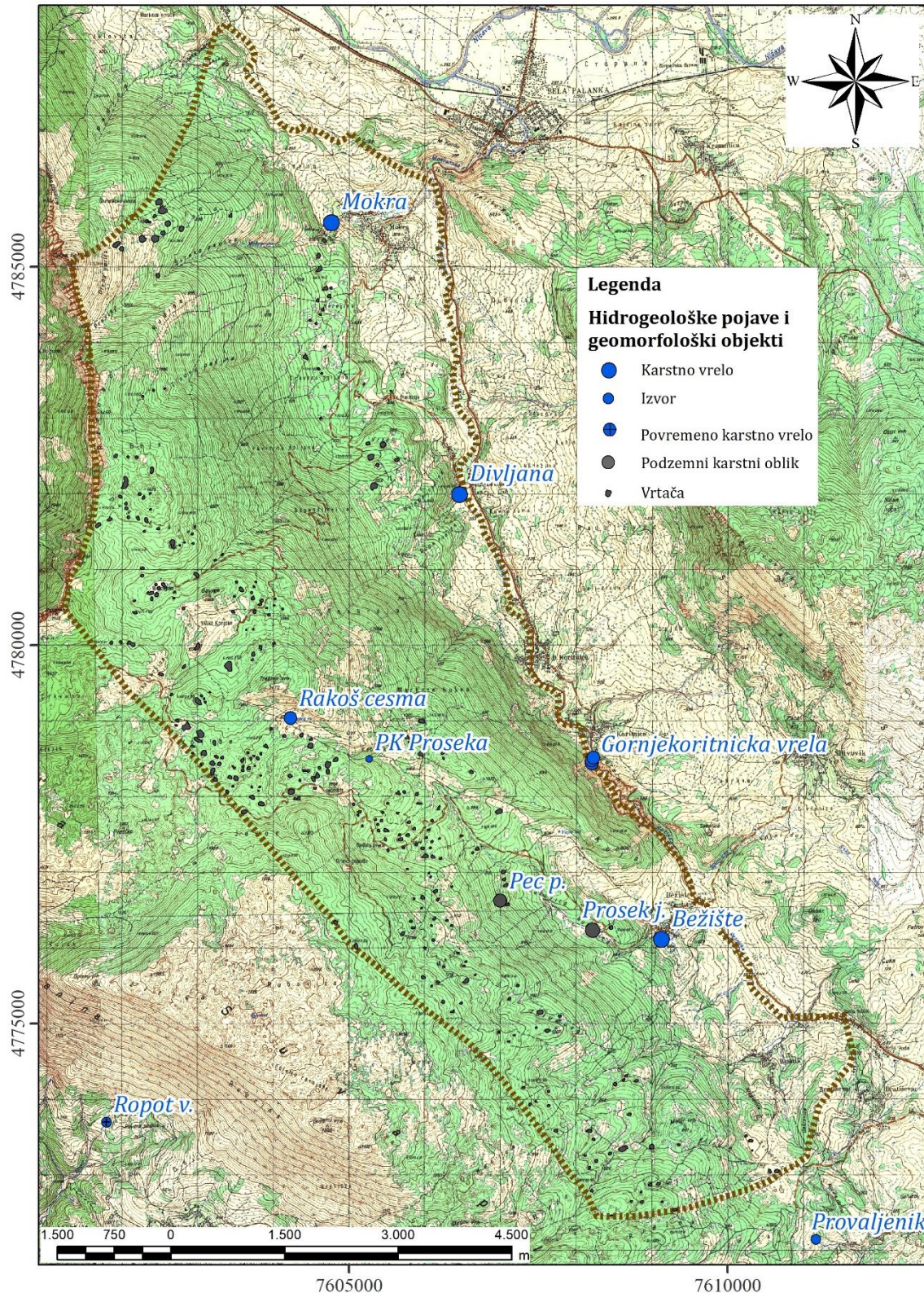
Slika 7.6. Površinski i podzemni oblici, snimljeni tokom terenskih istraživanja: a) oblast u zaleđu Mokre i Divljane, b) oblast između Rakoša i Bežišta

Na osnovu sprovedenog istraživanja došlo se do informacija o razvijenom procesu karstifikacije, iako je cela istočna padina izuzetno dobro pokrivena šumskom vegetacijom (Slika 7.7.), koja donekle onemogućava napredovanje na terenu, ali i primenu drugih metoda istraživanja (daljinska detekcija).



Slika 7.7. Šumska i žbunasta vegetacija na terenu

Najtipičniji oblici površinske karstne morfologije Suve planine su vrtače. One su razvijene, uglavnom, na zaravnjenim delovima krečnjaka, dok su na padinama znatno ređe ili potpuno nedostaju. Na istočnim padinama, u okviru užeg istražnog prostora, analizom topografske karte, kao i satelitskih snimaka i 3D modela (kreiranog pomoću programa ArcMAP) detektovano je preko 300 vrtača, na površini od oko 68,5 km² (Slika 7.8.).



Slika 7.8. Vrtače u okviru užeg istražnog područja

Površina vrtača (neke od njih se mogu okarakterisati i kao uvale) se kreće od oko 200 m² do preko 7000 m², mada je više od polovine vrtača površine manje od 1500 m². Najveća gustina vrtača je u oblastima koje su zaravnjene, u zaleđu Rakoš česme, zatim u predelu između Rakoš česme i pećine Peč, dok ih na primer na delu istočnih padina Suve planine između sela Gornja Koritnica i Divljana, skoro uopšte nema. Razlog tome je veliki nagib terena, koji sprečava zadržavanje vode i formiranje vrtača. Takođe, faktor geološke građe ima značajan uticaj na nastanak vrtača, najveći broj vrtača je formiran u okviru slojevitih i bankovitih titonskih krečnjaka sa dolomitima, koji se nalaze u jezgru antiklinale, dok je najmanji broj vrtača formiran u okviru heterogenih peskovitih i laporovitih krečnjaka valend-otriva. Najčešće su sve vrtače obrasle nekom vrstom šumske ili žbunaste vegetacije (Slika 7.9.), ali postoje i vrtače koje su na „otvorenom“ i čije su strane i dno obrasle travom.



Slika 7.9. Vrtače većih dimenzija (prečnika preko 40 metara), obrasle šumskom vegetacijom

Na osnovu sprovedenog istraživanja može se doneti zaključak o prisustvu razvijenog procesa karstifikacije na istočnim padinama Suve planine, iako je cela oblast izuzetno dobro pokrivena šumskom vegetacijom, za razliku od oblasti Valožja, koja je takođe, značajno karstifikovana, ali pokrivena jedino travnatom vegetacijom.

Tokom terenskih istraživanja za potrebe izrade disertacije „otkrivena“ su 2 podzemna geomorfološka oblika na istočnim padinama Suve planine: jama Prosek i pećina Peč.

Jama Prosek se nalazi nedaleko od povremenog toka Bukovice. Ulaz u jamu se nalazi na 710 m.n.m. i u vidu je procepa u krečnjačkoj steni, dimenzije otvora jame su 0,5x1,5 metara, dok je dubina jame oko 2 metra. Koordinate ulaza u jamu Prosek su: X= 4776236,590 m; Y= 7608217,416 m. Ulaz i okolina jame su obrasli gustim žbunjem i niskim rastinjem (Slika 7.10.), usled čega je jama teško uočljiva i pristup jami otežan. Primetna je velika količina zemljišta i

drugog nehomogenog materijala koji je nanet na sam ulaz jame, kao i u njenu unutrašnjost. Jama je nastala u ispućalim delimično karstifikovanim donjokrednim krečnjacima sa proslojcima krečnjačkih konglomerata. Nalazi se nedaleko od transverzalne rasedne zone, koja je uticala na nastanak i razvoj karstifikacije i usmeravanje podzemnih voda, ka sadašnjem mestu isticanja na vrelu Bežište.

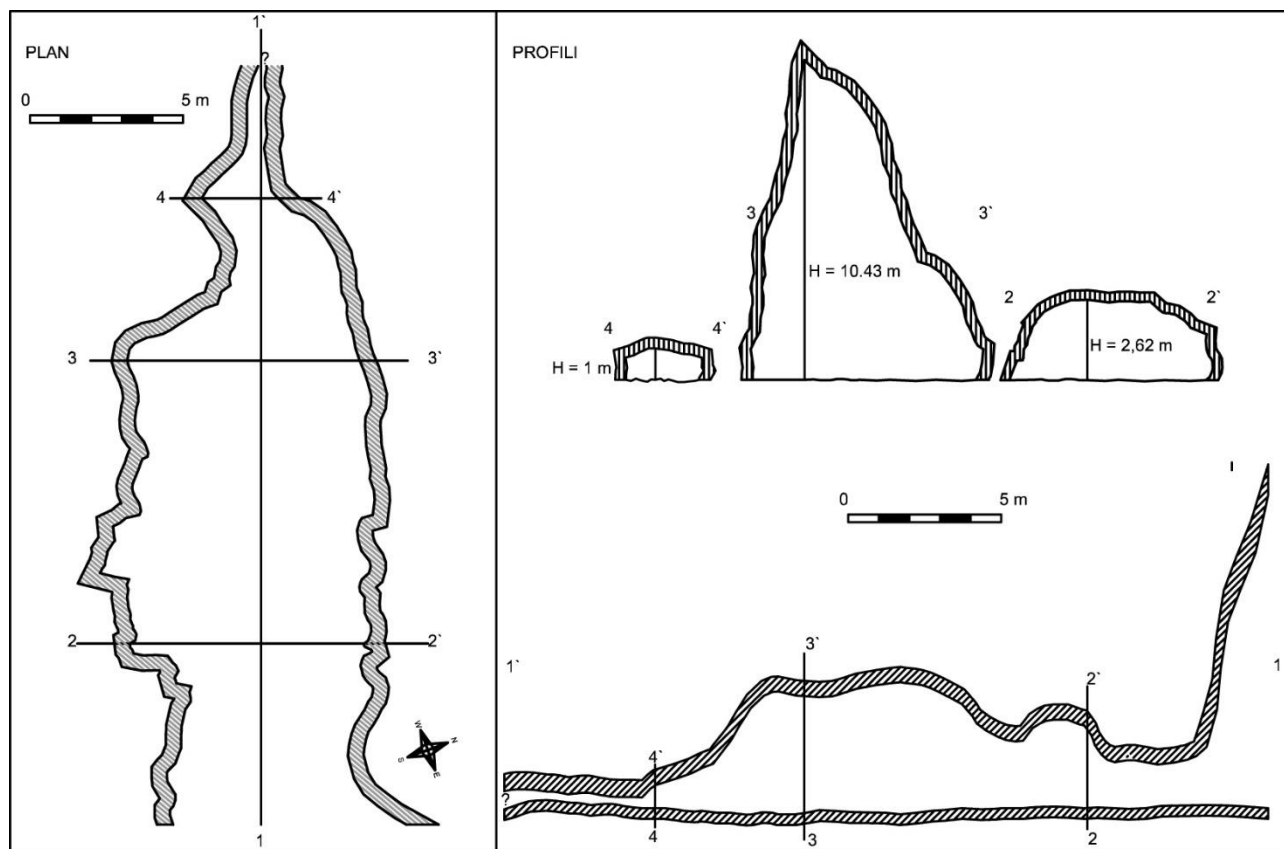


Slika 7.10. Okolina i ulaz u jamu Prosek

Pećina Peč, je otkrivena za vreme terenskih istraživanja, predstavlja lokaciju od interesa, pošto su tu kasnije izvršeni hidrogeološki opiti, tako da je izvršeno morfometrijsko snimanje u cilju definisanja položaja, dimenzija i morfoloških odlika. Gusta vegetacija na padinama, ispod ulaza u pećinu, otežava pristup, a takođe, teško ju je uočiti sa daljine veće od 50 metara. Ulazni otvor pećine ima izgled elipse, širok je 7,5 metara, visine 2-2,5 metra. Iznad samog ulaza u pećinu se do visine od 10,5 metara pruža krečnjački odsek (Slika 7.11). Koordinate ulaza u pećinu su: X= 4776626,382 m; Y= 7606995,588 m i lociran je na visini od 885 m.n.m. Pećinski kanal je jednostavan, spada u proste speleološke objekte, ima izgled tunela i azimut pružanja 70° (Slika 7.12.).



Slika 7.11. Ulaz u pećinu Peč i krečnjački odsek ispod kojeg se nalazi ulaz



Slika 7.12. Skica plana i profila pećine Peč

Neposredno iza ulaza kanal se sužava, pa onda ponovo proširuje na oko 8,5 metara, dok se tavanica podiže do visine od 3 metra, a na najvišem mestu svod se nalazi na 10,43 metra. Dužina pećinskog kanala je 20,5 metara i na samom kraju širine je 2,5 metara, a tu visina varira od 1 do 2 metra. Na samom kraju glavnog kanala počinje manji, nepristupačan kanal (profil 4.4 na slici 7.12.), koji se pruža azimutom 72° (Slika 7.13.), vidljiva dužina kanala iznosi oko 4,5 metara, a dimenzije kanala su 30x40 cm.



Slika 7.13. Manji kanal na kraju pećine Peč

Pećina spada u speleološke objekte bez hidrogeološke funkcije, sa prokapskim vodama koje su detektovane jedino krajem zime i tokom proleća. Nastala je u titonskim krečnjacima, u blizini rasedne zone, ali i u blizini geološke granice sa donjokrednim krečnjacima. Rased duž kojeg je formirana pećina ima elemente pada EP=64/82, koji se lako uočava na kraju pećine, ali i na portalu pećine (Slika 7.14.).

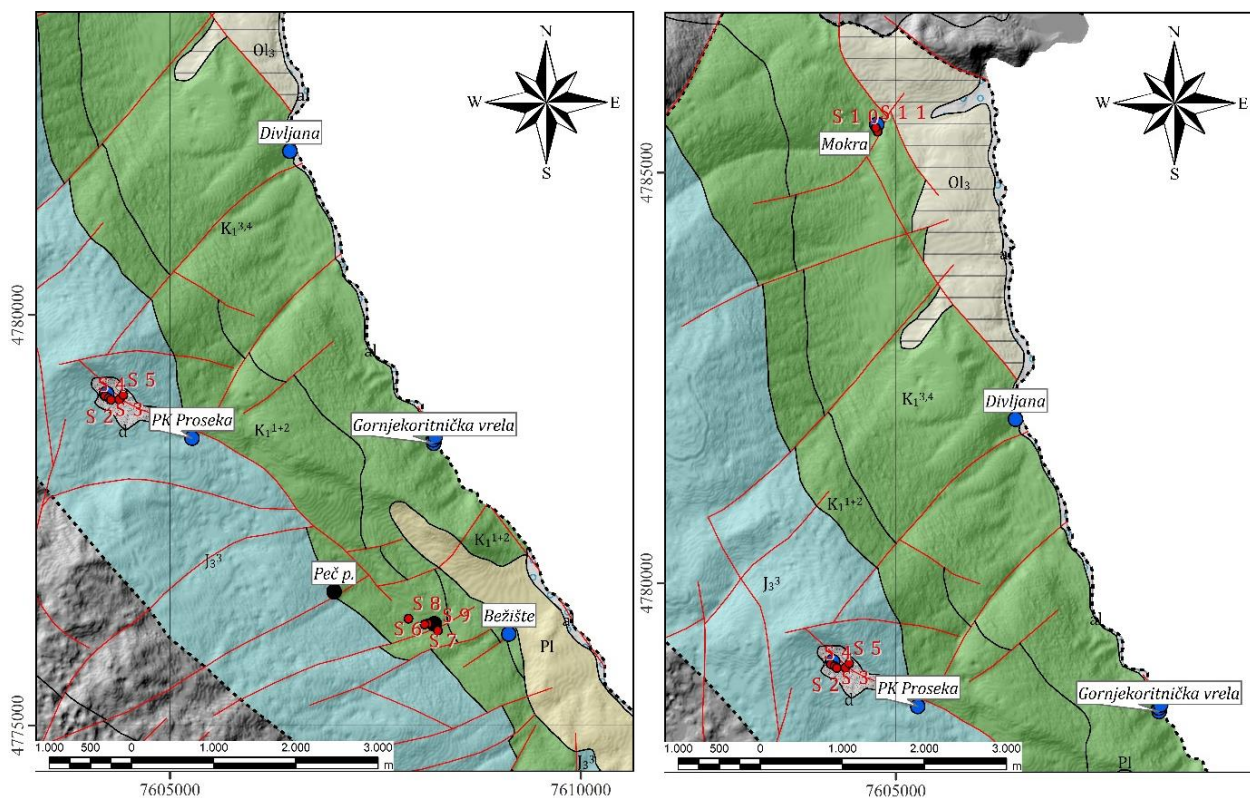


Slika 7.14. Rased (crvena linija) duž kojeg je formirana pećina

7.3. Rezultati geofizičkih istraživanja

Na delu istražnog prostora izvedena su geoelektrična ispitivanja, primenjen je postupak vertikalno električno sondiranje (VES) (23. septembra 2018. godine). Geoelektrična ispitivanja su izvedena elektrodnom dispozitivom Šlumberže na tri lokacije: Rakoš česma, Bukovica i Mokra (Slika 7.15.). Lokacije su odabrane tako da reprezentuju različite litološke jedinice: lokacija Rakoš – titonske bankovite krečnjake, lokacija Bukovica – valend-otrivski fosilonosni, heterogeni peskoviti i laporoviti krečnjaci i lokacija Mokra – urgonski sprudni krečnjaci.

Na lokalitetu Rakoš česma rastojanje između elektroda iznosilo je $AB/2 = 30$ m čime je ostvaren maksimalni dubinski zahvat od 10 m. Rastojanje između elektroda na lokalitetu Mokra je bilo $AB/2=40$ m i $AB/2=50$ m, dok je na lokalitetu Bukovica rastojanje između elektroda iznosilo $AB/2=30$ m na tri lokaliteta gde je rađen VES, dok je jedna sonda izmerena sa rastojanjem između elektroda $AB/2=110$ m.



Slika 7.15. Pozicije tačaka električnog sondiranja, na geološkoj podlozi (geološke granice prema OGK, Vujisić et al, 1971)

Lokalitet Rakoš česma

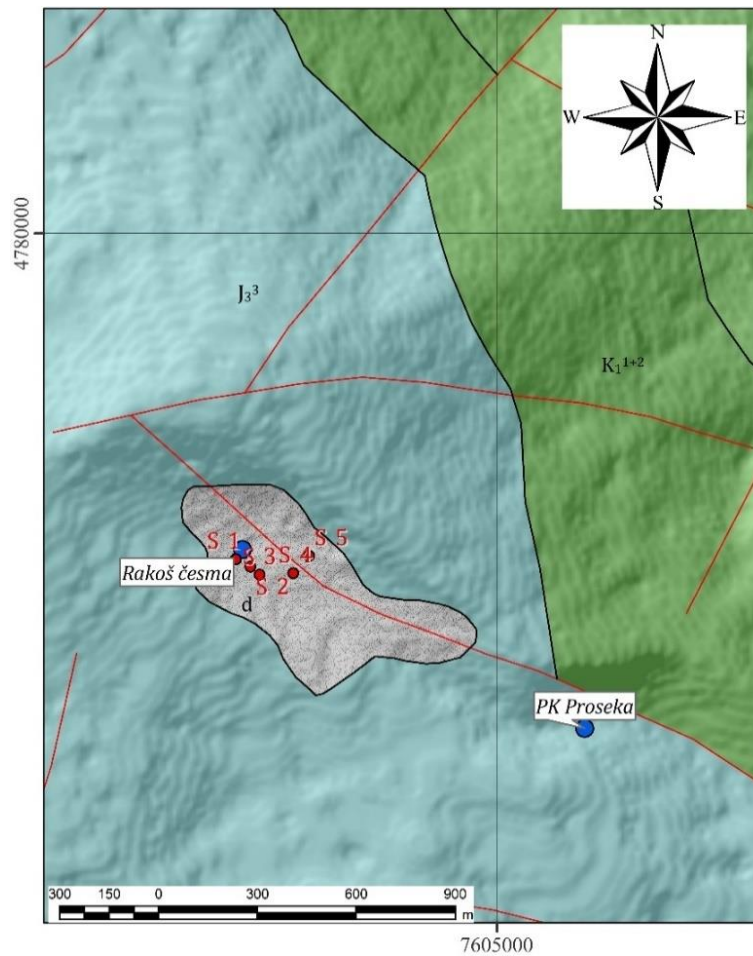
Na lokalitetu Rakoš česma sondiranje je izvršeno u pet tačaka koje su na Slici 7.16. obeležene kao S1, S2, S3, S4 i S5.

Rezultati sondiranja na lokalitetu Rakoš česma ukazuju na postojanje rasedne zone, pri čemu se sonde S1-S3 nalaze na jednom krilu raseda (sonda 3 pokazuje znake većeg poremećaja sredine), sonda S4 je bliže rasedu, dok se sonda S5 nalazi na drugom krilu raseda.

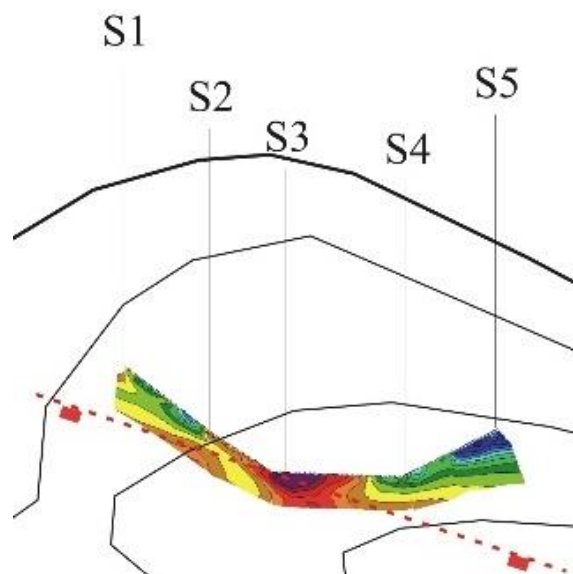
Rezultati sondiranja u tačkama S1, S2 i S3 pokazuju da je merenje izvršeno u rasednoj zoni. S3 leži na samoj rasednoj površi (Slike 7.16. i 7.17.), bez deluvijalnog nadsloja (na ovoj tački su zabeležene visoke vrednosti otpora od površine trena pa sve do dubine od preko 2 m). Sonde 1 i 2 leže iznad rasedne zone na relativno izdignutom bloku sa deluvijalnim slojem i drobinskim materijalom u njemu. Na sondama S1, S2, S3, S4 i S5 postoje zone nižih i viših vrednosti otpornosti. U najplićem delu terena vrednosti otpora su visoke i ukazuju da se u ovom delu terena nalazi krečnjačka drobina u prosušenom glinenom matriksu. Smenjivanje po dubini visokih i niskih vrednosti otpora (S1, S2, S3, S4) vezane su za smenu suvih krupnijih blokova krečnjaka i degradiranih pojaseva krečnjaka sa prisutnom vodom ili glinom kao ispunom. Sonde 4 i 5, leže na suprotnoj strani rasedne površi, na drugom krilu raseda, pri čemu je sonda S5 najudaljenija od rasedne zone (Slike 7.17. i 7.18.), tako da rezultati merenja na S4 pokazuju da se u ovom delu nalazi najdeblji deluvijum i glina, koji bliže rasedu bivaju spirani i erodovani na krilo koje je spušteno. Na tački sondiranja S5 takva heterogenost krečnjaka se ne vidi, već ispod tankog glinenog nadsloja (zemljište) leži zdravi, slabo ispucali krečnjak, i to do dubine od skoro 20 m.

Interpretacija rezultata VES (Slika 7.18.) ukazuje na postojanje sloja, koji se sastoji od raspadnutog i izmenjenog krečnjačkog stenskog materijala (breče i drobine) i zemljišta, koje u

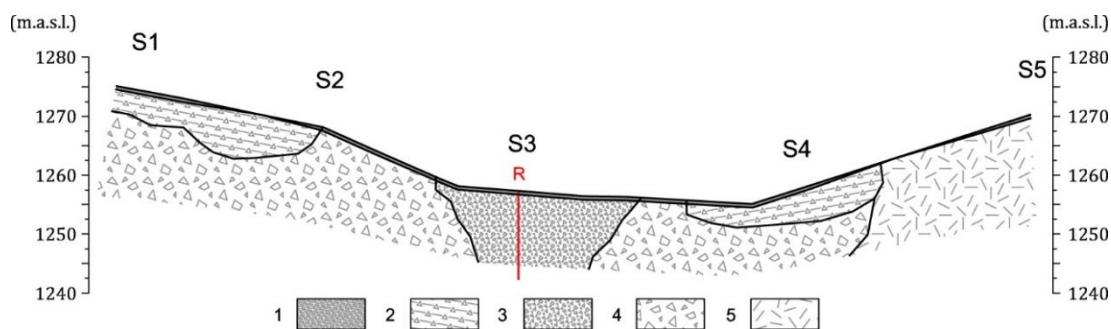
ovom slučaju predstavljaju epikarst debljine od 3-15 metara, a na određenim delovima terena je verovatno razvijen do većih dubina.



Slika 7.16. Položaj električnih sondi (mikrolokacija) S1-S5, na geološkoj podlozi (geološke granice prema OGK, Vujisić et al, 1971)



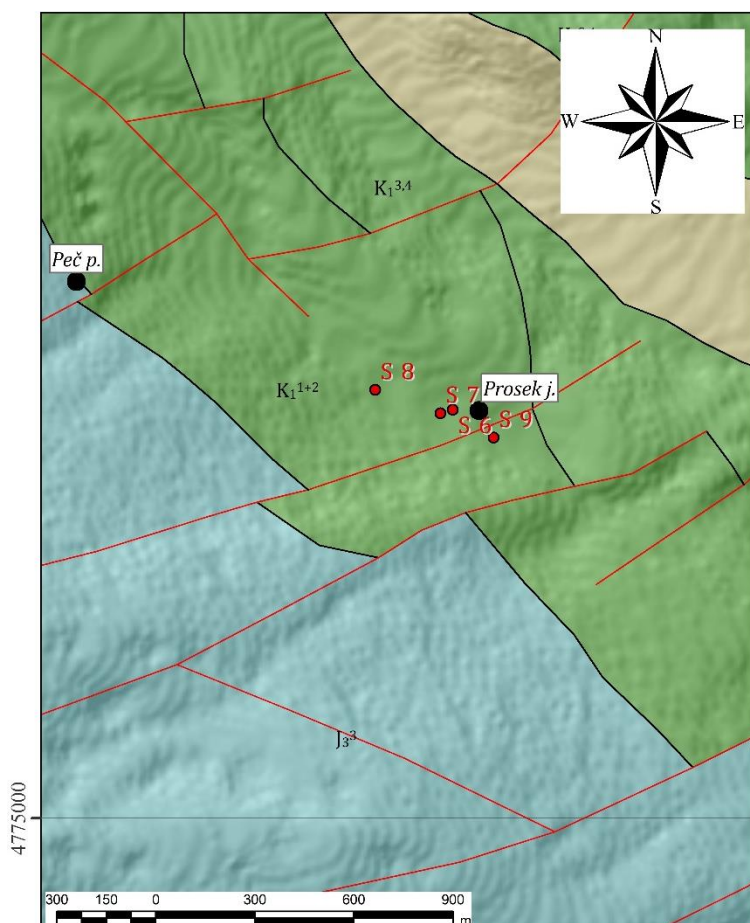
Slika 7.17. Položaj profila geoelektričnog sondiranja (sonde S1-S5), na topografskoj skici



Slika 7.18. Šematski interpretacioni profil: S1-S5 – sonde; 1 – zemljište, 2 – deluvijum sa glinenom ispunom (epikarst), 3 – rasedne breče (epikarst); 4 – krečnjačka breča (epikarst); 5 – ispucali krečnjak

Lokalitet Bukovica

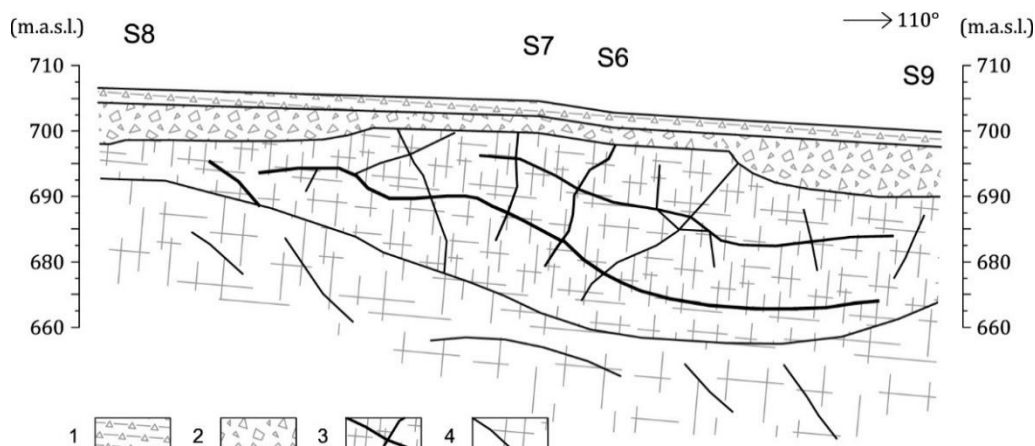
Tačke S6, S7, S8 i S9 na kojima je vršeno sondiranje na lokalitetu Bukovica su prikazane na Slici 7.19. Rezultati svih intepretiranih krivih sondiranja na Bukovici jeste ekstremno strm, praktično neinterpretabilan trend rasta električne otpornosti sa dubinom, što ukazuje na prisustvo dobro definisanog suvog sistema pukotina, jama i kaverni, zbog čega mereni otpori sa dubinom rastu gotovo eksponencijalno. Električne sonde S6 i S7, prema obliku interpretiranih krivih, leže u blizini rasedne zone. Prisutne su pukotine i kaverne, u većini slučajeva bez glinene ili bilo kakve druge ispune (Slika 7.20).



Slika 7.19. Položaj električnih sondi (mikrolokacija) S6-S9, na geološkoj podlozi (geološke granice prema OGK, Vujisić et al, 1971)

Interpretacija rezultata VES sa lokacije Bukovica ukazuje na postojanje sloja koji je sastavljen od raspadnutog i izmenjenog stenskog materijala (breče), krečnjačkog porekla i zemljišnog materijala, koje u ovom slučaju leže preko dobro karstifikovanog krečnjaka, u kojem postoji

sistem suvih pukotina, kaverni i većih kanala (jama Prosek). Epikarst je manje debljine nego na lokaciji Rakoš, od 1,5 do 9 metara, ali je najverovatnije dobro povezan sa karstifikovanim krečnjakom preko kojeg leži.

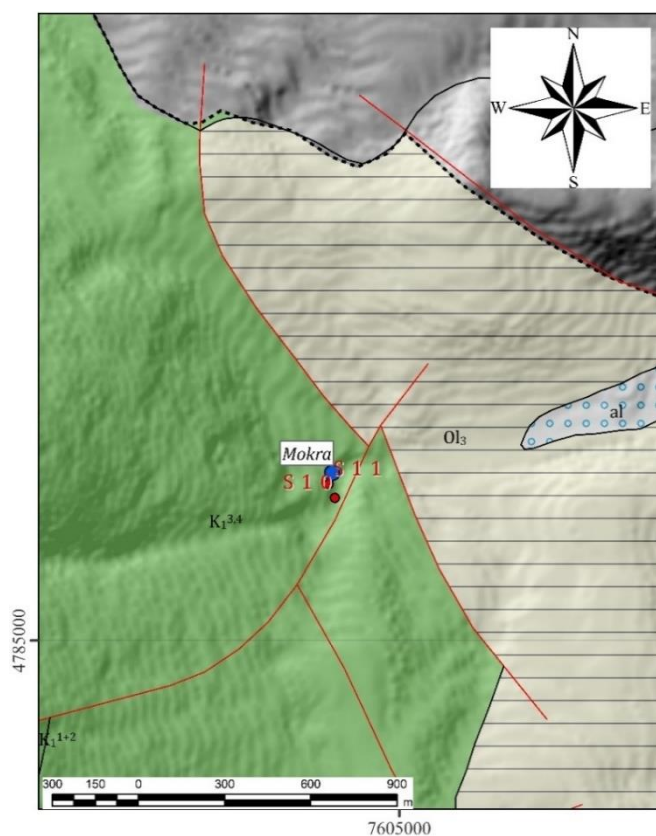


Slika 7.20. Šematski interpretacioni profil: S6-S9 – sonde; 1 – zemljište i deluvijum sa glinenom ispunom (epikarst); 2 – krečnjačka breča (epikarst); 3 – ispucao i kavernozan krečnjak; 4 – slabije ispucao krečnjak

Lokalitet Mokra – Sonda S10 i S11

Na lokalitetu Mokra sondiranje je izvršeno u dve tačke S10 i S11 (Slika 7.21.).

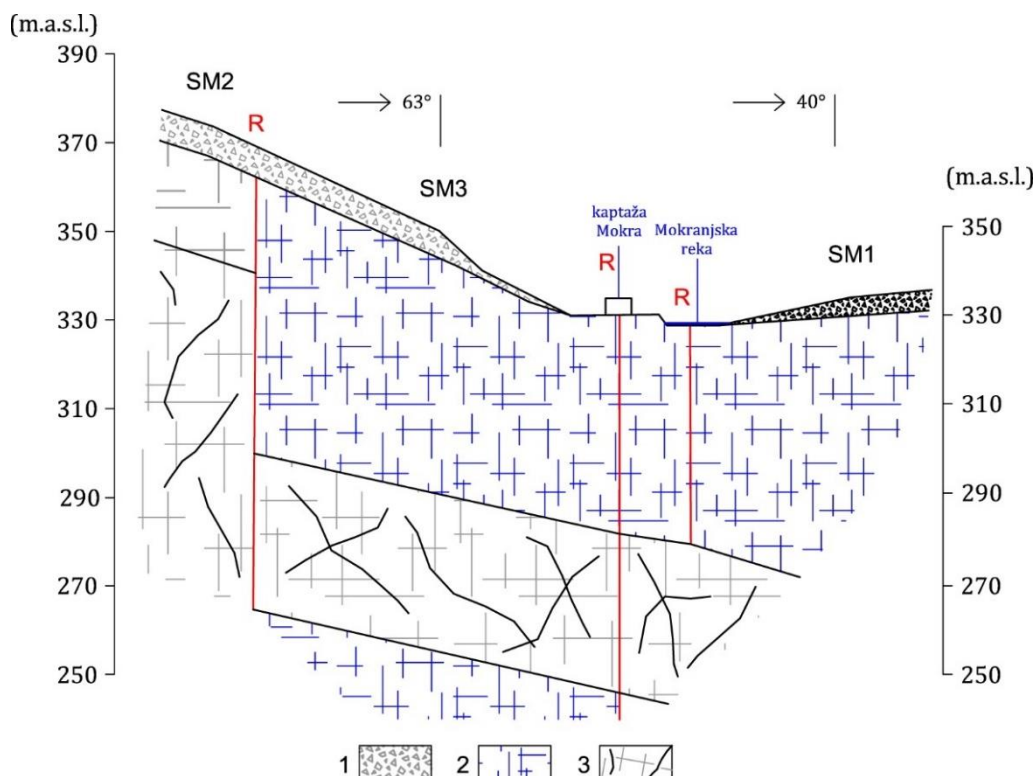
Rezultati sondiranja u tački S10 pokazuju da se ispod ispitivanog terena nalazi suva karstifikacija. Tačka sondiranja S11 nalazi se tačno iznad karstnog vrela i rezultati sondiranja ukazuju da je krečnjak dosta ispucao (karstifikovan), a u nivou karstnog vrela, na dubini od oko 15-20 m, pojavljuje se uticaj podzemne vode (zona zasićenja podzemnom vodom) na merenja.



Slika 7.21. Položaj električnih sondi (mikrolokacija) S10-S11, na geološkoj podlozi (geološke granice prema OGK, Vujisić et al, 1971)

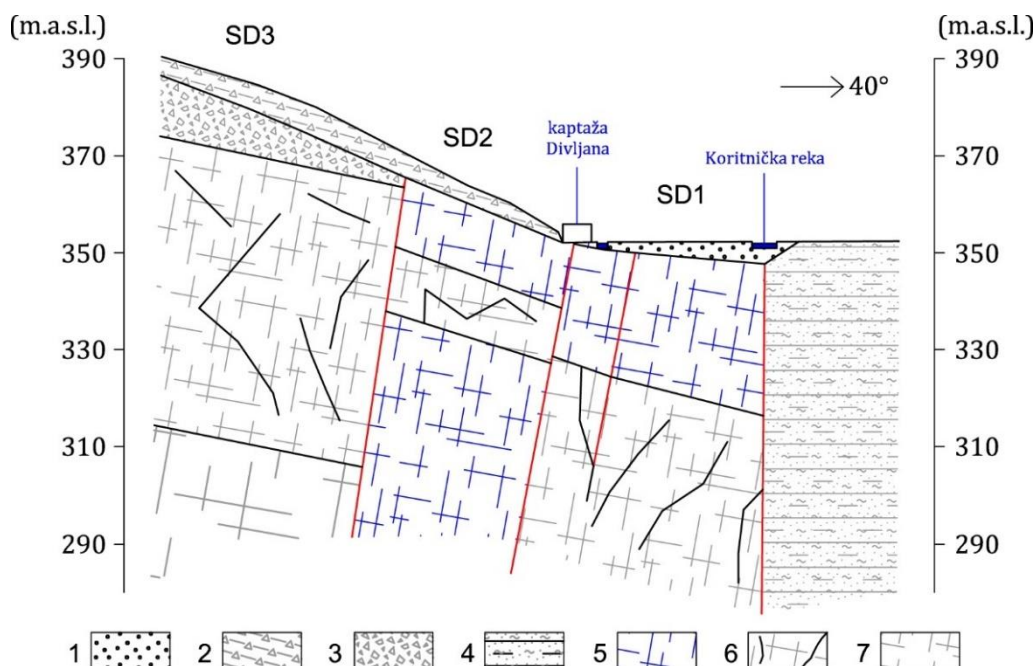
Ranija geofizička istraživanja: Mokra i Divljana

Na lokalitetu Mokra 26. i 27. maja 2010. godine, su izvedena geofizička istraživanja primenom VES (Vukićević et al, 2010a). Istraživanja su izvedena pomoću 3 geoelektrične sonde (SM1-SM3), raspoređene duž trase izlomljenog profila, azimuta 63° i 40° . Rezultati dobijeni ovim istraživanjima ukazuju da su kredni krečnjaci u okolini vrela intenzivno karstifikovani, ispucali i vodonosni (Slika 7.22). Ovim istraživanjem je utvrđeno da se baza karstifikacije nalazi na dubini većoj od 95 m indiciran je još jedan dublji, karstifikovani i vodonosni interval. Istraživanjem je definisan i sloj debljine 0,5-3 metra u zaleđu vrela Mokra, koji je definisan kao krečnjačka drobina, koja je dobro vezana zemljišnim i glinovitim materijalom, koji se može okarakterisati kao epikarst.



Slika 7.22. Šematski interpretacioni profil na lokaciji Mokra: SM1-SM3 – sonde; R – rased; 1 – zemljište i deluvijum sa glinenom ispunom (epikarst), 2 – ispucao i kavernozan krečnjak sa vodom; 4 – ispucao krečnjak, sa manjim kavernama, bez vode (prilagođeno prema Vukićević et al, 2010a)

Geoelektrična istraživanja na području karstnog vrela Divljana izvedena su 27. maja 2010. godine primenom postupka VES i imala su za cilj litološko raščlanjavanje terena po dubini, i lateralno, u neposrednoj okolini vrela, kao i indiciranje položaja i dubine na kojoj se akumulirala podzemna voda u okviru krečnjaka kredne starosti (Vukićević et al, 2010b). Istraživanja su izvedena pomoću 3 geoelektrične sonde, raspoređene duž trase profila čiji je azimut bio 40° . Maksimalno polurastojanje strujnih elektroda iznosilo je 150 m, 200 m i 350 m. Sa teorijskog stanovišta navedena istraživanja omogućila su dubinski zahvat između 60 m i 150 m. Istraživan je deo terena oko samog vrela i tom prilikom je indicirana intenzivna tektonska aktivnost u krednim krečnjacima okoline vrela, koju prate i intenzivna karstifikovanost i vodonosnost (Slika 7.23.). Nagoveštena je baza karstifikacije na oko 100 m dubine. Istraživanjem je definisan i sloj debljine 0,5-4 metra u zaleđu vrela Mokra, koji je definisan kao deluvijum, koji leži preko sloja dobro vezane krečnjačke drobine. Sloj koji je okarakterisan kao deluvijum, prema svim odlikama odgovara epikarstu.



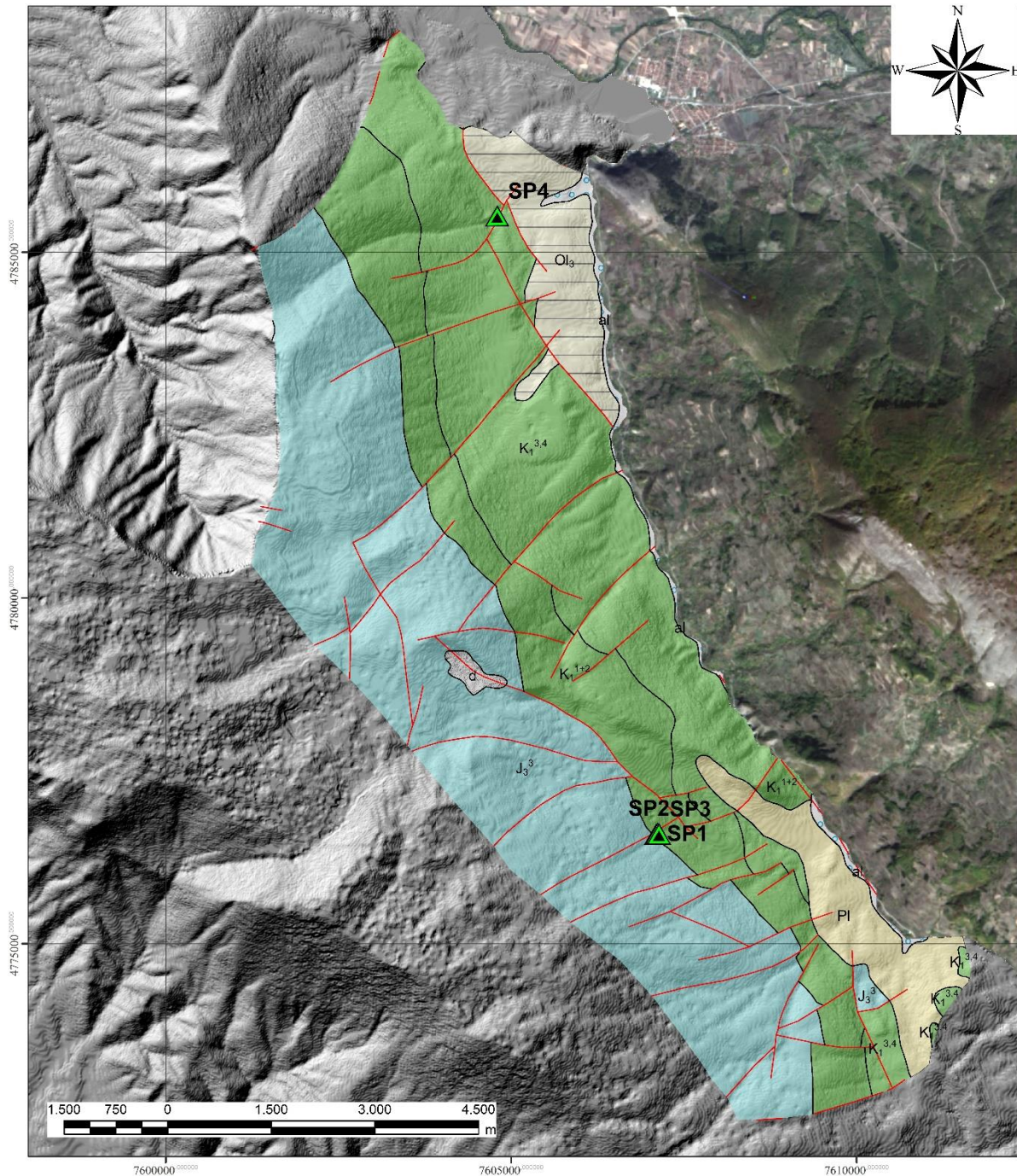
Slika 7.23. Šematski interpretacioni profil na lokaciji Divljana: SD1-SD3 – sonde; R – rased; 1 – aluvijon; 2 – zemljište i deluvijum sa glinenom ispunom (epikarst), 3 – krečnjačka breča (epikarst); 4 – peskovi, laporci, šljunkovi, gline; 5 – ispucao i kavernoazan krečnjak sa vodom; 6 – ispucao krečnjak, sa manjim kavernama, bez vode; 7 – slabije ispucao krečnjak (prilagođeno prema Vukićević et al, 2010b)

7.4. Rezultati petroloških i pedoloških istraživanja

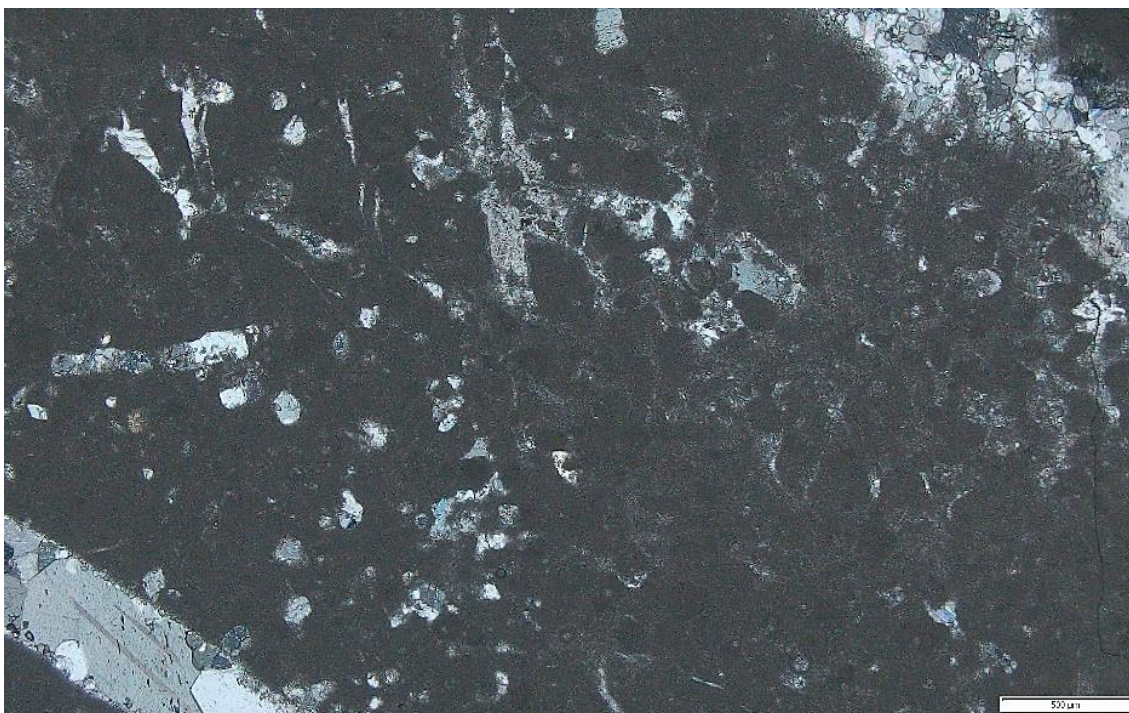
Uzorci stene koji su podvrgnuti petrološkoj analizi su uzeti tokom izvođenja terenskih istraživanja 2019. godine u okviru užeg istražnog prostora (Slika 7.24.). Uzeta su 4 uzorka SP1-SP4, od čega su 3 uzorka uzeta iz pećine Peč i okoline. Uzorci stene su uzeti sa površine terena, tako što je uzorak SP1 uzet sa površine iznad pećine Peč, uzorak SP2 je uzet iz unutrašnjosti pećine, iz dela gde se ulazna dvorana sužava u nepristupačni kanal. Uzorak stene SP3 je uzet na oko 100 metara od ulaza u pećinu, nedaleko od staze kojom se do pećine dolazi. Uzorak sa oznakom SP4 predstavlja stenu iz neposrednog okruženja vrela Mokra, njegovog zaleđa.

Uzorak SP1 – Kristalaste je strukture i homogene teksture i pokazuje jaku reakciju na razblaženu HCl (1:3). Od teksturnih karakteristika ističe se razvučeni stilolitski šav markiran neokalcitom. Stena ima tanke pukotine i prsline koje su ispunjene kalcitskom zapunom. Makroskopski se uočavaju retki alohemi sastojci – preseki makrofosila, ujednačenih dimenzija oko 2-5 mm. Po strukturnim karakteristikama i sastavu ova karbonatna stena svrstava se u krečnjake kalkarenitskog do kalklutitskog tipa koja odgovara *wackestone mikrofaciji* (Flügel, 2004). Prema sastavu i strukturnim karakteristikama pripada čistim krečnjacima sa sadržajem kalcita od 98%. U strukturnom smislu izgrađena je od ortohema i alohema. Ortohemu osnovu stene čini mikrokristalasti kalcit-mikrit. Sa mikritskim kalcitom izmešano je do 2% minerala glina. U mikritskom matriksu uočavaju se fenestre ili „strukture ptičjeg oka“, koje su nepravilno orjentisane, ispunjene sparikalcitom. Alohem čine rekristalisali organogeni alohem/bioklasti i peloidi. Bioklasti su predstavljeni asocijacijom marinskih mikroorganizama i njihov sadržaj je od 20-25%. Komorice foraminifera su zapunjene kristalastim kalcitom. Peloidna zrna su okruglih i elipsoidnih formi, veličine oko 0,05-0,1 mm, izgrađena od kriptokristalastog karbonata i malo organske materije. Izražene su fenestre i razvučeni stilolitski šavovi. Fenestre ukazuju na geopetalnu strukturu. Stena je ispresecana sa najmanje dva sistema prsline i pukotina koje imaju zapunu od kristalastog kalcita/neokalcita (Slika 7.25.). Takođe, uočavaju

se strukturni elementi koji ukazuju na paleokarstifikaciju. Prema sadržaju alohema i ortohema (Folk, 1959) ispitivani krečnjak odgovara *biopelmikritu*.

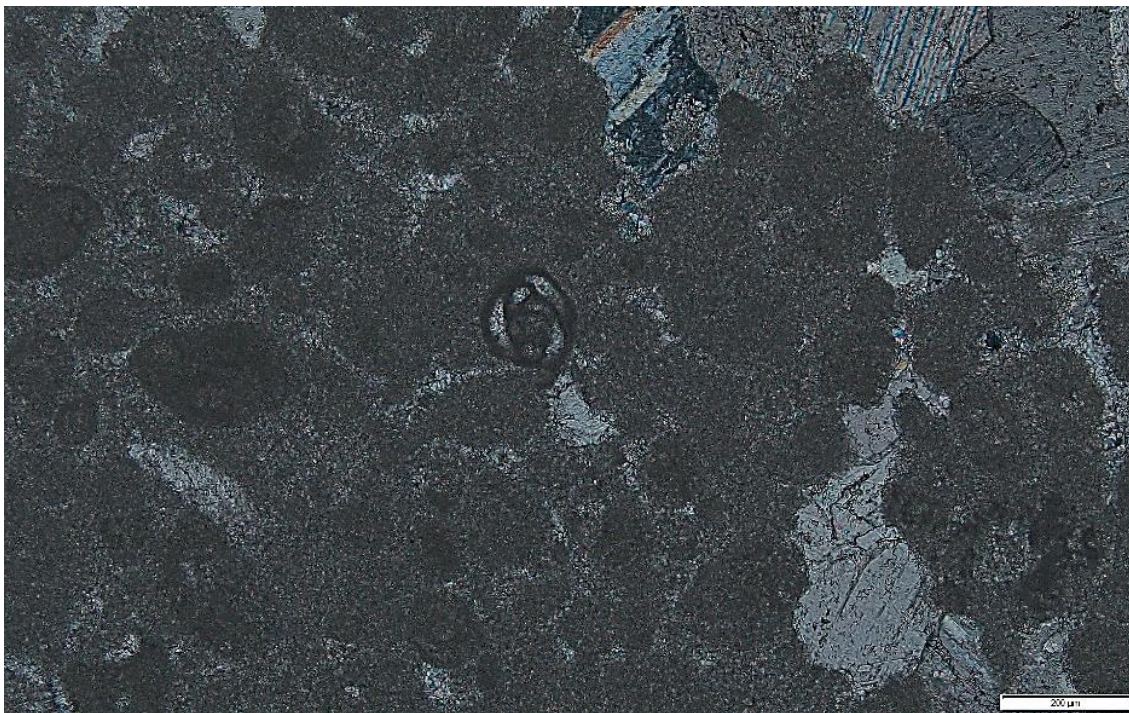


Slika 7.24. Lokacije uzimanja uzoraka za petrološke analize (podloga prema OGK SFRJ)



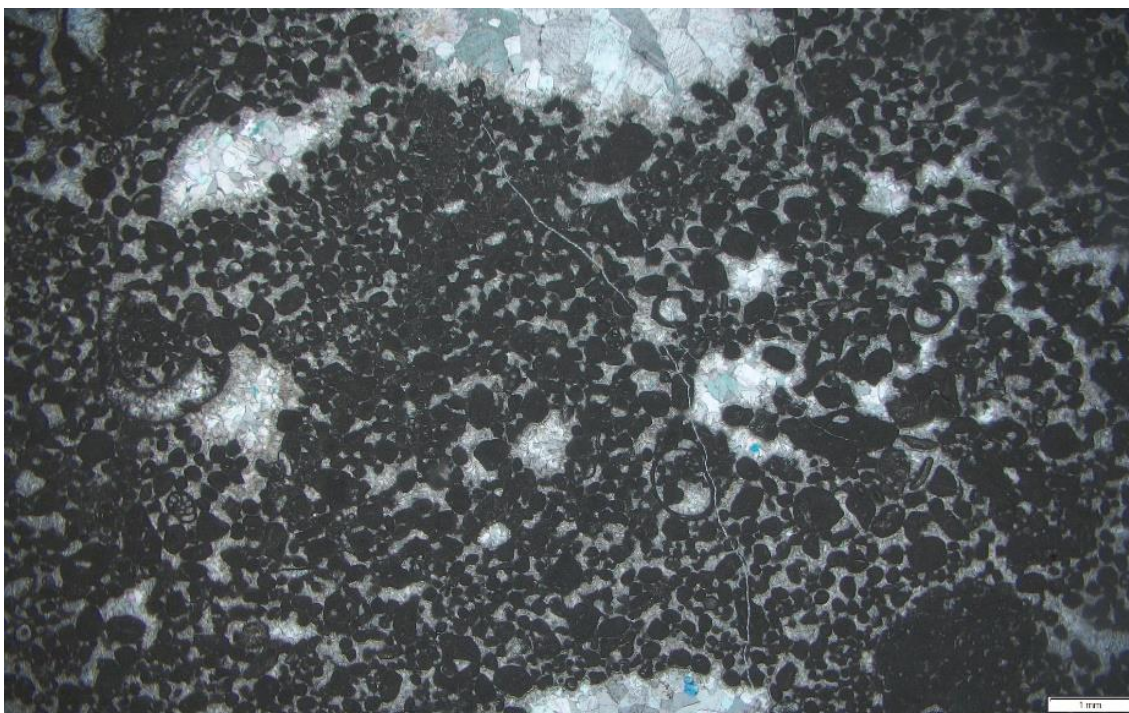
Slika 7.25. Uzorak SP1 – krečnjak, biopelmikrit sa nesortiranim fragmentima fosila i peloidima - u donjem levom uglu je pukotina zapunjena sekundarnim kalcitom, a u gornjem desnom razvučeni stilolitski šav

Uzorak SP2 – Makroskopski se ne vide elementarni sastojci. Stena je ispresecana pukotinama i prslinama koje su zapunjene sekundarnim neokalcitom, bele boje. Reakcija sa razblaženom HCl (1:3) je burna, a sadržaj kalcita dobijen kalcimetrijskom metodom je 97,5%. Strukturne karakteristike i sastav svrstavaju je u krečnjake kalkarenitskog do kalklutitskog tipa koja odgovara *wackestone mikrofaciji* (Flügel, 2004). Stena je izgrađena od alohema i ortohema. Alohemna komponenta je relativno sitnozrna, a čine je peloidi i organogeni ostaci. Zrna alohema su u pojedinim delovima gušće pakovana, tako da ovaj krečnjak čini prelaz ka *packstone mikrofaciji* (Flügel, 2004). Organogeni alohem (bioklasti) je uglavnom od ljušturica mikroorganizama, a podređeno je to debris koji vodi poreklo od makro organizama (mekušci). Pored organogenog alohema u steni se nalazi i sitan ne-organogeni alohem predstavljen peloidima. Ova mikritska zrna su nepravilnog oblika, od poluzaobljenih do zaobljenih formi, veličine ispod 0,05 mm. Veoma liče na sitne intraklaste kriptokristalaste strukture. Sadržaj ukupnog alohema je oko 50%. Ortohem je mikrosparit do sparit. Ispitivani krečnjak sadrži i oko 2 % pelitske/glinovite komponente. Od sporednih sastojaka prisutan je autigeni pirit kao samostalna zrna ili sitna nagomilanja. U steni su razvijene i nepravilne strukture rastvaranja – fenestre koje su zapunjene kristalastim kalcitom (geopetalna struktura). Prisutne su i prsline i mikropukotine zapunjene krupnokristalastim neokalcitom (Slika 7.26.). Prema sadržaju alohema i ortohema (Folk, 1959) ispitivani krečnjak odgovara *pelbiosparitu*.



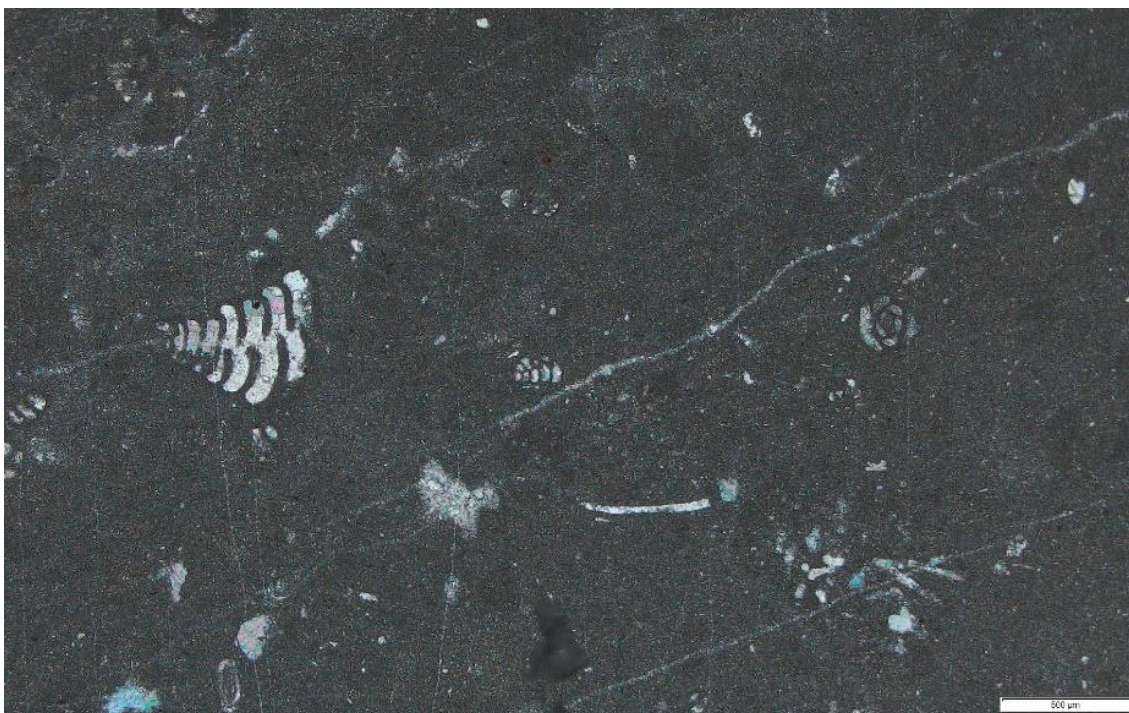
Slika 7.26. Uzorak SP2 – krečnjak, pelbiosparit sa nepravilnim fenestrama i geopetalnom strukturom

Uzorak SP3 – Stena je sive boje, zrnaste strukture, kalkarenitskog tipa, koja se definiše kao *grainstone mikrofacija* (Flugel, 2004). Reakcija na HCl je burna (kalcit 86,7%). Makroskopski se ne vide elementarni sastojci. Stena je ispresecana pukotinama i prslinama koje su zapunjene sekundarnim neokalcitom bele boje. Ima jasnu alohemu građu, odnosno izgrađena je od asocijacije plitkovodnih unutarbasenskih fragmenata različite krupnoće. Veličina fragmenata je od delova milimetra pa preko 2 mm, što steni strukturno daje ruditski karakter. Alohem, u genetskom smislu, predstavljaju odlomci organogenog porekla (asocijacija mekušaca, algi i mikrofosila) i sitni intraklasti i peloidi (Slika 7.27.). Vezivo je kristalasti kalcit – sparit. Tanak pukotinski sistem je zapunjen kalcitom. Stepem prekrystalizacije je visok i ogleda se kako u osnovi stene, tako i na bioklastima. Kao i druga dva uzorka ima geopetalnu strukturu, odnosno fenestre i šupljine zapunjene krupnokristalastim kalcitom, pojavljuje se i dolomit. Prema sadržaju alohema i ortohema (Folk, 1959) ispitivani krečnjak odgovara *biointrasparitu/biopelsparitu*. Kako je sadržaj kalcita u ovom uzorku ispod 90%, odnosno 86,7% radi se o nečistom krečnjaku gde najveći procenat nekalcitnog dela pripada mineralima gline, organskoj materiji, kao i dolomitima. Minerali gline i organska materija su izmešani sa karbonatnim muljem od kojih su izgrađeni peloidi i intraklasti, kao i mrvičasti mikrit nastao u fazi rekristalizacije.



Slika 7.27. Uzorak SP3 – krečnjak, intrabiosparit/biopelsparit u kome se nalaze gusto pakovani sitni neorijentisani i nesortirani fragmenti školjki, gastropoda i miliolida, kao i nesortitani peloidi/sitni intraklasti - veća fenestra/šupljina u gornjem delu slike je zapunjena dolomitom

Uzorak SP4 – Stena je sive nehomogene boje sa crveno-ružičastom nijansom u nekim delovima od primesa gvožđa. Masivne je teksture i kristalaste strukture. Makroskopski se uočavaju alohemi sastojci – preseki kružnih, elipsoidnih formi dimenzija do 1 cm. Reakcija sa razblaženom HCl (1:3) je burna, sadržaj kalcita dobijen kalcimetrijom je 88,2%. Strukturno, ima izgled *packstone mikrofacije* (Flugel, 2004). Stena je ispresecana pukotinama i prslinama, kao i tankim stilolitskim šavovima koji su ispunjeni sekundarnim neokalcitom prozračnim ili bele boje. Pojedini stiloliti imaju veoma visoke amplitude i markirani su oksidima i hidroksidima gvožđa. Stena je izgrađena od karbonatnog mulja – mikrita (ortohem), sitnih ostataka fosila i retkih peloida. Mikrit je izmešan, u manjem obimu sa mineralima gline i pigmentiran oksidima gvožđa i organskom materijom. Sa mikritom su izmešani i minerali glina, u manjem obimu i steni daju glinoviti karakter. Kristalasta struktura mikrita nije homogena, već je poremećena bioturbacijama koje su ispunjene mrvičastim mikritom ili glinovitim mikritom, kao i peloidima. Sitni fosilni ostaci su uglavnom predstavljeni mikritiziranim bentonskim foraminiferama (Slika 7.28.). Šupljine rastvaranja/fenestre su ispunjene mozaičnim kalcitom – geopetalna struktura. Pojedine fenestre su povezane za stilolitskim šavovima, koji su ovde česti i zapunjeni sekundarnim kalcitom. Prisutne su i prsline i pukotine ispunjene svetlim neokalcitom. Prema sadržaju alohema i ortohema (Folk, 1959) ispitivani krečnjak odgovara *fosilofernom mikritu/biomikritu*.



Slika 7.28. Uzorak SP4 – krečnjak, fosiloferni mikrit sa presecima mikritiziranih bentonskih foraminifera

Sedimentološka interpretacija na osnovu analize raspoloživih istraživanih krečnjaka Suve planine pokazuje da su stvarani u morskoj sredini veoma plitkog subtajdala i malo dubljeg intertajdala. Na to ukazuje dominantno prisustvo peloidnih mikritskih krečnjaka, fenestralna tekstura i razvijen geopetalni sklop.

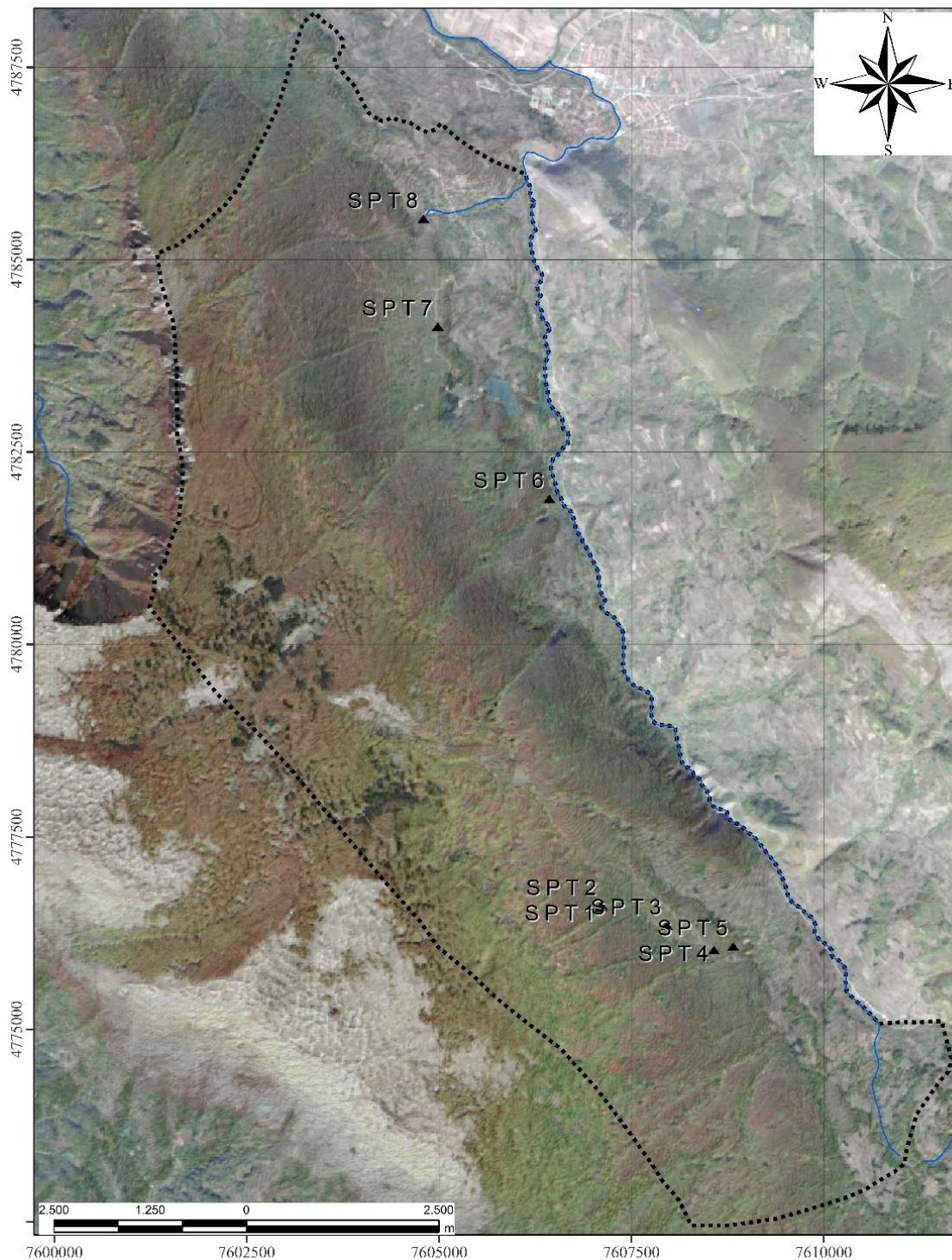
Postanak ovih krečnjaka, najverovatnije je vezan za spoljnu ivicu karbonatne platforme, sa niskom energijom vode, sa prelazom u manje zaštićene delove platforme (lagune).

Uzorak stene SP2 je jedini za koji se sa sigurnošću može reći da je autohtonog porekla za taj lokalitet, jer je uzet iz unutrašnjosti pećine. Samim tim pokazuje i uslove u kojima je nastao sloj krečnjaka u kojem je formirana pećina Peč.

S obzirom da sadržaj kalcita u uzorku SP1 i SP2 prelazi 97% ne čudi jako izražena karstifikacija i formiranje kanala i kaverni metarskih dimenzija. Takođe, može se zaključiti da sastav stena na istočnoj padini Suve planine pogoduje nastanku procesa karstifikacije i njegovom brzom napredovanju, naročito u kombinaciji sa tektonskim pokretima koji su izazvali izdizanje antiklinale i pucanje slojeva krečnjaka, samim tim i nastanak epikarsta na ovom terenu nije upitan. Nešto niži procenat kalcita u uzorcima SP3 i SP4, pokazuje 87-88%, odrazio se i na stepen karstifikacije u okviru stena kredne starosti, a koje izgrađuju deo terena hipsometrijski niže od pećine Peč, kao i teren koji čini veliki deo oblasti prihranjivanja Mokre, Divljane i Gornjekoritničkih vrela.

Pedološka istraživanja su započeta u sklopu kartiranja kada su prikupljeni osnovni podaci o prisustvu i debljini tla. Uzorci zemljišta za geohemijsku karakterizaciju su prikupljeni sa određenih lokacija na istočnim padinama Suve planina (Slike 7.29. i 7.30.). Rezultati su iskorišćeni i prilikom izrade završnog (diplomskog) rada na osnovnim akademskim studijama na Univerzitetu u Beogradu, Hemijski fakultet, Studijski program Hemija životne sredine, pod nazivom: *Geohemijska karakterizacija zemljišta sa istočnih obronaka specijalnog rezervata prirode „Suva planina“*, autor Živojin Smiljković. Izvršena je tehnička analiza 8 uzoraka zemljišta

(SPT1¹⁴-SPT8) i jednog uzorka stene (krečnjak), utvrđena je količina organske supstance (organske zagađujuće supstance) i određeni su organsko-geohemijski parametri. Definisan je nivo kontaminiranosti teškim metalima (uz primenu zakonske regulative Republike Srbije).



Slika 7.29. Lokacije uzorkovanja zemljišta na istočnim padinama Suve planine (Landsat- image courtesy of the U.S. Geological Survey)

¹⁴ SPT1 = Suva planina tačka 1



Slika 7.30. Uzorkovanje tla u pećini (SPT2) i na otvorenom polju (SPT3)

Sadržaj vlage je u uzorcima zemljišta u opsegu od 2,62% do 7,72% (Tabela 7.1.), dok u referentnom sedimentu iznosi svega 0,10%. Sediment ima za red veličine niži procenat vlage od zemljišta, svega, 0,10%, što može biti indikativno za odsustvo higroskopnih komponenti koje zadržavaju vlagu. Ova pretpostavka je i potvrđena rezultatom koji pokazuje da je sediment 99,90 % sačinjen od karbonata. Vrednosti za sadržaj pepela u rasponu od 62,94% do 90,71% ukazuju na to da u zemljištu očekivano dominira mineralna komponenta. Sediment ima najniži procenat pepela u poređenju sa ostalim uzorcima 56,83%, što se objašnjava činjenicom da prilikom zagrevanja na preko 800°C dolazi do razgradnje karbonata, od kojih je sediment sačinjen, na okside uz oslobađanje CO₂. Vrednosti sadržaja karbonata su u opsegu od 17,46% do 80,40%. Primetan je viši sadržaj karbonata u uzorcima SPT1 - SPT4, a posebno u uzorku SPT2, što se može objasniti time da je ovaj uzorak uzet unutar pećine Peč i da je to zemljište nastalo i pod uticajem erozije krečnjačkih stena i razloženog kalcita koji završava u zemljištu. Procentualni udeo vodonika i azota se kreće u opsegu od 0,58% do 1,74%, odnosno od 0,11% do 0,86%.

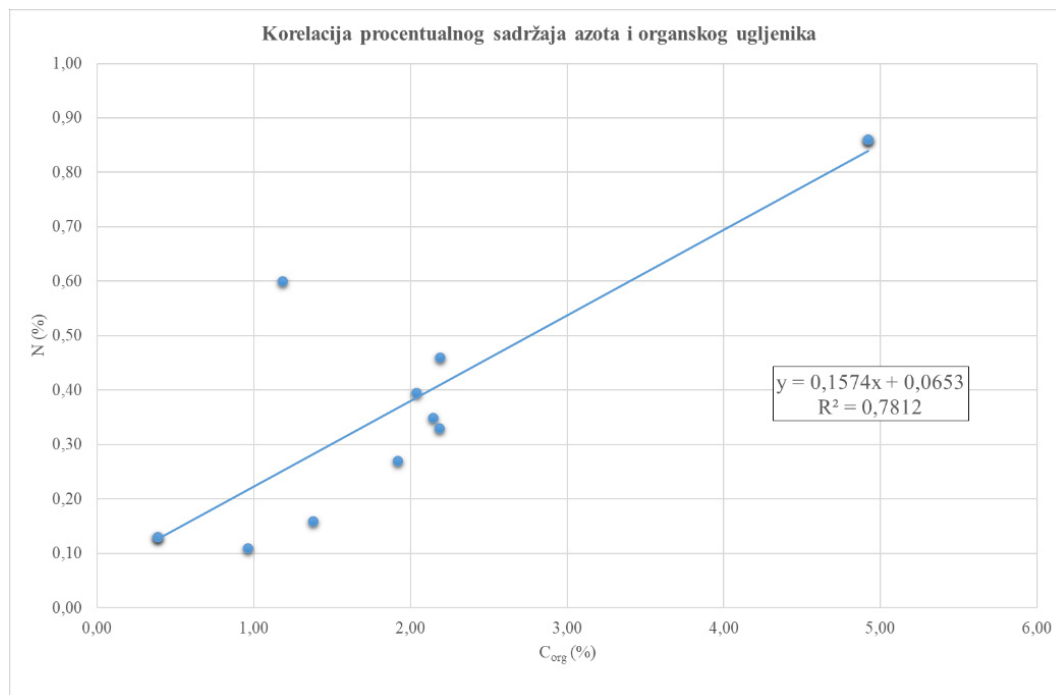
Tabela 7.1. Rezultati elementarne analize zemljišta (prema Smiljković, 2019)

	Vlaga (%)	Pepeo (%)	N (%)	C (%)	H (%)	S (%)	Karbonati (%)	Organski ugljenik u suvom uzorku (%)
SPT1	7,725	62,942	0,860	12,420	1,790	<0.1	60,388	4,920
SPT2	4,351	70,782	0,600	6,020	1,140	<0.1	80,443	1,180
SPT3	2,621	90,706	0,130	0,980	0,580	<0.1	60,922	0,383
SPT4	3,722	75,635	0,460	6,980	1,090	<0.1	68,652	2,188
SPT5	3,302	88,913	0,160	1,670	0,760	<0.1	17,455	1,378
SPT6	4,569	80,399	0,330	3,070	0,850	<0.1	28,912	2,182
SPT7	5,149	83,055	0,270	2,450	0,940	<0.1	21,759	1,917
SPT8	4,559	78,769	0,350	3,170	0,950	<0.1	32,396	2,143
<i>maksimum</i>	7,725	90,706	0,860	12,420	1,790	/	80,443	4,920
<i>minimum</i>	2,621	62,942	0,130	0,980	0,580	/	17,455	0,383
<i>sr. vrednost</i>	4,500	78,900	0,395	4,595	1,013	/	46,366	2,036
SEDIMENT	0,099	56,831	/	/	/	/	99,900	/

Na lokacijama SPT5-SPT8 uočava se znatno niži sadržaj karbonata, nego u uzorcima sa lokacija pećine Peč i Bukovice. Uzrok se može pronaći u debljem sloju zemljišta koji je prisutan na tim lokacijama (SPT4 i SPT5), kao i u činjenici da je pliocenska i oligocenska sedimentacija

klastičnih materijala kasnije erodovana procesima spiranja sa hipsometrijski nižih delova Suve planine (SPT6 - SPT8), gde su i bile lokacije uzoraka. Samim tim u sastavu zemljišta na tim nižim lokacijama prisustvo karbonatne komponente je umanjeno, jer nije ni bila u sastavu naslaga koje su se formirale u mlađim geološkim periodama.

Sadržaj azota pozitivno koreliše sa sadržajem organskog ugljenika (Slika 7.31.), što pokazuje da je azot uglavnom vezan u organskoj supstanci, koja je prisutna u sastavu zemljišta.

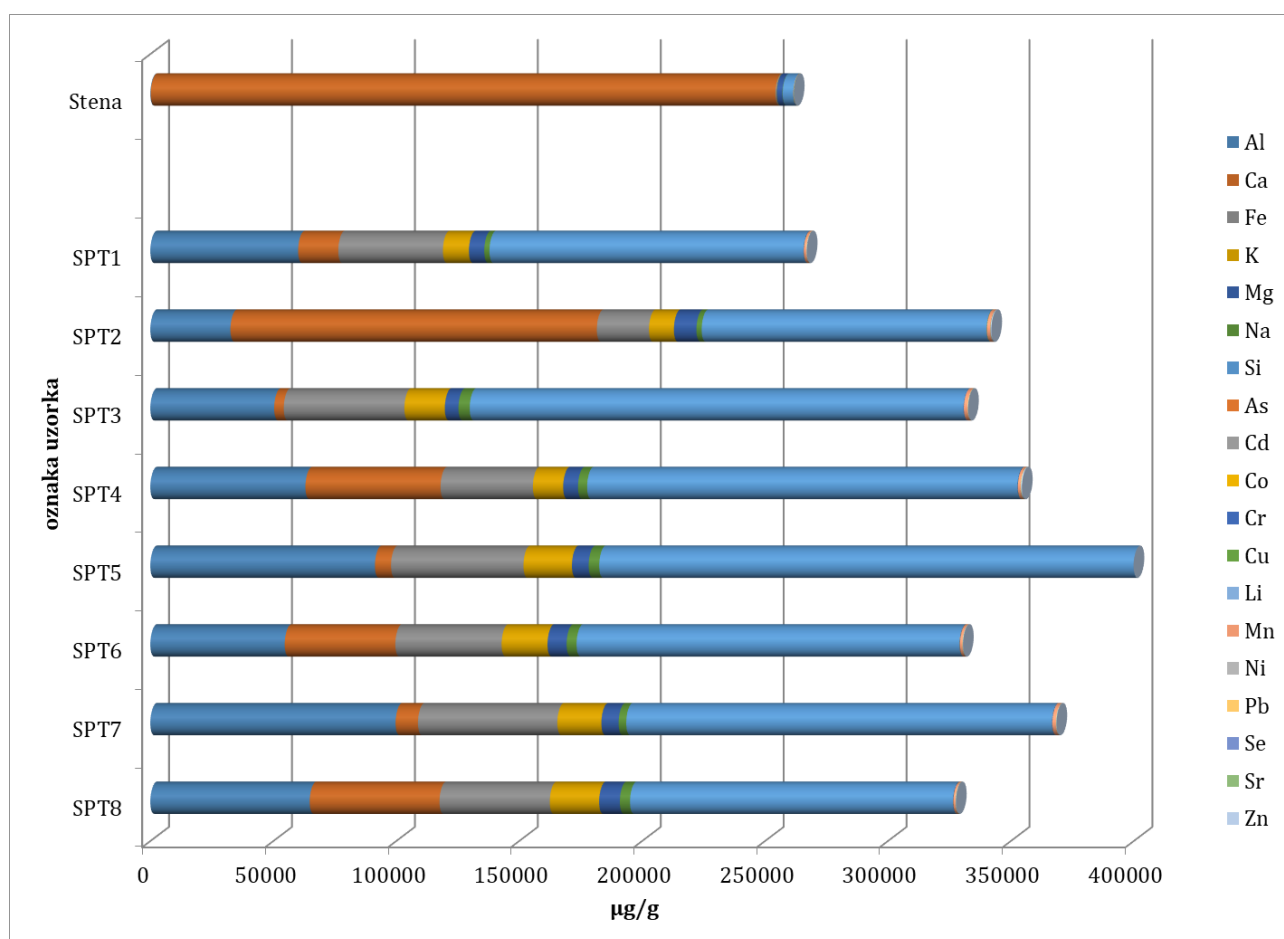


Slika 7.31. Grafička korelacija sadržaja azota i organskog ugljenika

Sadržaj ukupnog ugljenika (C) posle uklanjanja karbonata je u opsegu od 0,98% do 12,42%. Veći procentualni sadržaj ukupnog ugljenika (C) u uzorku SPT1 povezan je sa većom količinom organske supstance, koja je indikovana ne samo na osnovu povećanog sadržaja organskog ugljenika, već je i vizuelno primećena, budući da su ovi uzorci imali znatno više biljnih i životinjskih ostataka. Sadržaj sumpora je u svim uzorcima ispod granice detekcije i ukazuje na odsustvo sulfatnih i sulfidnih minerala, kao i na odsustvo zagađenja sumpornim organskim jedinjenjima. Vrednosti sadržaja organskog ugljenika (C_{org}) su u opsegu od 0,38 % do 4,92 %. U uzorku sedimenta nije bilo moguće odrediti sadržaj organskog ugljenika, budući da je on skoro 99,9% karbonat koji se tokom kisele digestije rastvorio.

Od svih makroelemenata u uzorcima zemljišta (Slika 7.32.) sa izuzetkom SPT2, najobilniji je silicijum i raspon vrednosti je od 218,162 mg/g do 115,905 mg/g za kojim sledi aluminijum sa rasponom vrednosti od 99,780 mg/g do 32,598 mg/g, što ukazuje na to da su glavna mineralna komponenta u uzorcima alumo-silikati, verovatno predstavljeni mineralima tipa glina. Pored njih, očekivano je i prisustvo Si i Al u obliku hidratizanih oksida. U uzorcima tla koncentracija kalcijuma ima širok raspon (3,917 do 149,046 mg/g) što je u saglasnosti sa izuzetno visokom koncentracijom karbonata, koja je utvrđena uklanjanjem karbonata sa razblaženom hlorovodoničnom kiselinom (1:3 v/v) i zatim ustaljivanjem mase za elementarnu analizu. Koncentracija magnezijuma u uzorcima tla kreće se u opsegu od 5,553 mg/g do 9,156 mg/g. Kalijum je zastupljeniji u svim uzorcima tla (10,139 do 20,072 mg/g) i od magnezijuma i od natrijuma (2,125 do 4,567 mg/g). Koncentraciju gvožđa u tlu možemo smatrati povišenom s obzirom da se kreće u rasponu vrednosti od 21,209 do 56,695 mg/g. Koncentracija mangana, od svih mikroelemenata, u nekoliko uzoraka prevazilazi koncentraciju od 1 mg/g, u uzorku

SPT3 je najviša (1,466 mg/g) dok je najmanja izmerena u uzorku SPT8 (0,802 mg/g). Što se tiče ostalih mikroelemenata može se uočiti da su u uzorku SPT7 zabeležene najviše koncentracije Cd (1,15 µg/g), Li (43,59 µg/g) i Ni (55,57 µg/g), zatim u uzorku SPT4 zabeležene su najviše koncentracije Pb (123,80 µg/g), Se (2,56 µg/g) i Zn (384,49 µg/g), dok su kod uzorka SPT3 zabeležene dve najviše koncentracije mikroelemenata, već pomenuti Mn i Co (32,01 µg/g). Takođe, u uzorku SPT3 su dva mikroelementa u najnižim koncentracijama, ako ih uporedimo sa ostalim uzorcima tla, Cu (68,43 µg/g) i Sr (94,18 µg/g). Sa druge strane možemo videti da su kod uzorka SPT2 zabeležene najniže koncentracije As (4,96 µg/g), Co (10,96 µg/g), Cr (25,10 µg/g), Li (15,94 µg/g), Ni (25,79 µg/g) i Pb (38,59 µg/g). Najniže koncentracije Cu (20,82 µg/g) i Sr (44,14 µg/g) su izmerene u uzorku SPT1. Dok su u uzorku SPT8 zabeležene najniže koncentracije Mn (802,20 µg/g) i Se (ispod granice detekcije uređaja), selen takođe, nije detektovan ni u uzorku SPT5.



Slika 7.32. Distribucija metala u pojedinačnim uzorcima u µg/g (prilagođeno prema Mitrović et al, 2019)

Može se uočiti da je koncentracija Mg (2,329 mg/g) 110 puta manja od koncentracije Ca (254,130 mg/g) u uzorku sedimenta, što pokazuje da se uzorak stene skoro potpuno sastoji od CaCO₃. Koncentracije Mg i Si (4,318 mg/g) su približne u steni i ukazuju da bi deo Mg, pored karbonata mogao biti prisutan i u obliku silikata. Koncentracija gvožđa se može smatrati značajnom, iako je niska 345,87 µg/g. Svi ostali makro- i mikroelementi u steni imaju neuporedivo niže sadržaje <300 µg/g.

Sadržaj vlage u uzorcima zemljišta je relativno nizak (~ 3 - 8 %) i indikativan je za prisustvo alumo-silikata (uglavnom glina) koji vezuju vodu, što je potvrđeno i na osnovu dominacije Si i Al među makroelementima u svim uzorcima osim jednog. Referentni sediment sadrži svega 0,10 % vlage i po hemijskom sastavu je skoro čist CaCO₃. Visok sadržaj pepela ukazuje da u zemljištu očekivano dominira mineralna komponenta. Za razliku od zemljišta referentni

sediment ne sadrži organsku supstancu. Sadržaj sumpora je u svim uzorcima ispod granice detekcije i ukazuje na veoma nizak sadržaj/odsustvo sulfatnih i sulfidnih minerala, kao i na odsustvo zagađenja sumpornim organskim jedinjenjima. Glavne mineralne komponente u uzorcima zemljišta su alumo-silikati, verovatno predstavljeni mineralima tipa glina, kao i oksidi Si, Al i Fe. Izuzetak u tom smislu predstavlja uzorak SPT2 uzet unutar pećine Peč u kojem dominira Ca (u obliku karbonata) i koji je po svom sastavu najsličniji referentnom sedimentu.

Zbog izrazito različitog sastava sediment je isključen iz razmatranja u Pirsonovoj (eng. Pearson) korelacionoj matrici (Smiljković, 2019). Korelacije između sadržaja makroelemenata u uzorcima zemljišta pokazuju da je kalijum pretežno asociran sa alumo-silikatima, odnosno glinama, najverovatnije u obliku ilita. Takođe, pozitivna korelacija Fe sa Si, i pogotovo, sa Al ukazuje da je Fe delom prisutno u glinama, a delom verovatno u obliku hematita, u simbiozi sa hidratizanim Al_2O_3 . Pozitivna korelacija Ca i Mg, kao i njihova pozitivna korelacija sa sadržajem karbonata indikuju da su ova dva elementa pre svega prisutna u obliku karbonata. Odsustvo korelacije Mg sa Si i Al, kao i već pomenuta pozitivna korelacija Fe i K sa Al i Si ukazuje da su glavni katjoni u glinama Fe i K, i delom Na koji je pokazao dobru korelaciju sa Si, ali nešto slabiju sa Al. Znatno bolja korelacija Na sa Si nego sa Al ukazuje da deo Na može biti prisutan u obliku silikata. Odsustvo korelacije Fe sa Ca, Mg, ali i karbonatima ukazuje na odsustvo siderita (Smiljković 2019).

Koncentracije mikroelemenata su upoređene sa dozvoljenim koncentracijama metala u sedimentima i zemljištu prema zakonskoj regulativi Republike Srbije (Tabela 7.2.).

Tabela 7.2. Granične i remedijacione vrednosti opasnih i štetnih materija i vrednosti koje mogu ukazati na značajnu kontaminaciju zemljišta (Službeni glasnik RS 88/2010)

Parametar	Jedinica mere	Ciljna vrednost	Vrednost limita	Verifikacioni nivo	Remedijaciona vrednost
Arsen (As)	mg/kg	29	55	55	55
Kadmijum (Cd)	mg/kg	0,8	2	7,5	12
Hrom (Cr)	mg/kg	100	380	380	380
Bakar (Cu)	mg/kg	36	36	90	190
Živa (Hg)	mg/kg	0,3	0,5	1,6	10
Olovo (Pb)	mg/kg	85	530	530	530
Nikl (Ni)	mg/kg	35	35	45	210
Cink (Zn)	mg/kg	140	480	720	720

Koncentracija Ni je iznad dozvoljene vrednosti u svim uzorcima zemljišta, dok je u sedimentu za red veličine niža. Na osnovu rezultata korelacione matrice zapažena je statistički značajna pozitivna korelacija između sadržaja Ni i sadržaja Fe, kao i sadržaja ova dva elementa sa sadržajem Co. Imajući u vidu da je reč o siderofilnim elementima može se pretpostaviti da je povišena koncentracija Ni najverovatnije geogenog porekla.

Koncentracija Cu je iznad dozvoljene vrednosti samo u uzorku SPT2. Cu je pokazao izrazito pozitivnu korelaciju sa Ca i solidnu sa karbonatima, što pokazuje da je uglavnom prisutan u obliku karbonata tj. prirodnih baznih karbonata, malahita, $Cu_2(OH)_2CO_3$ i azurita, $Cu_3(OH)_2(CO_3)_2$. Stoga se povišena koncentracija Cu u uzorku SPT2, takođe, može objasniti geogenim poreklom (Smiljković 2019), jer je visoka koncentracija ovog mikroelementa zapažena i u samom sedimentu, predstavljenom skoro čistim karbonatom, koji je korišćen kao referentni uzorak.

Koncentracija arsena iznad dozvoljene vrednosti zapažena je samo u uzorcima SPT6 i SPT7. As nije pokazao korelaciju ni sa jednim od makro- i mikroelemenata, kao ni sa sadržajem organskog ugljenika, što ukazuje da je verovatno delom prisutan u organskoj, a delom u

neorganskoj komponenti zemljišta. Koncentracije Cd, Cr, Pb i Zn bile su ispod koncentracije koja je dozvoljena za zemljište u svim uzorcima.

Među mikroelementima dobru korelaciju sa Fe, Al i Si pokazao je hrom, što indikuje da je on verovatno vezan za gline i sa oksidima Fe i Al. Cink, stroncijum i selen su pokazali dobru korelaciju sa Ca (karbonatima), što je u slučaju Sr i Zn očekivano (Smiljković 2019). Litijum je pokazao izrazito pozitivnu korelaciju sa Al i Fe i zadovoljavajuću sa K i Si što znači da je delom vezan za okside Al i Fe, a delom za minerale glina. Slično arsenu, Pb, Mn i Cd nisu pokazali korelaciju ni sa jednim od makro i mikroelemenata (osim umereno pozitivne korelacije između Pb i Si), kao ni sa sadržajem organskog ugljenika, što znači da su verovatno „pomalo rasejani“ u svim supstratima. Treba, takođe, naglasiti da nijedan od mikroelemenata nije pokazao korelaciju sa C_{org} tj. ne postoji afinitet za vezivanje sa organskom supstancom.

Rezultati analize su pokazali da u sastavu zemljišta postoji veliki broj mikroelemenata, koji mogu da obogate mineralni sastav vode koja se kroz zemljište infiltrira na svom putu do karstne izdani. Većina njih se vezuje za prisustvo u glinovitim (alumo-silikati) česticama koje čine zemljište. Međutim, analize hemijskog sastava podzemne vode sa karstnih vrela u podnožju Suve planine su pokazale da sadržaj mineralnih materija ipak odražava veliki uticaj karbonatnih stena kroz koje se voda na svom putu do tačke isticanja filtrira. Samim tim se zemljište može posmatrati kao sredina inicijalne izmene kvaliteta infiltrirane površinske vode (najčešće u vidu kiše i otopljenog snega), međutim, te izmene nisu završene, deo se odvija u sloju epikarsta, a najveći obim izmene kvaliteta podzemnih voda dešava se ipak u okviru saturisane zone karstne izdani.

7.5. Rezultati hidrogeoloških istraživanja

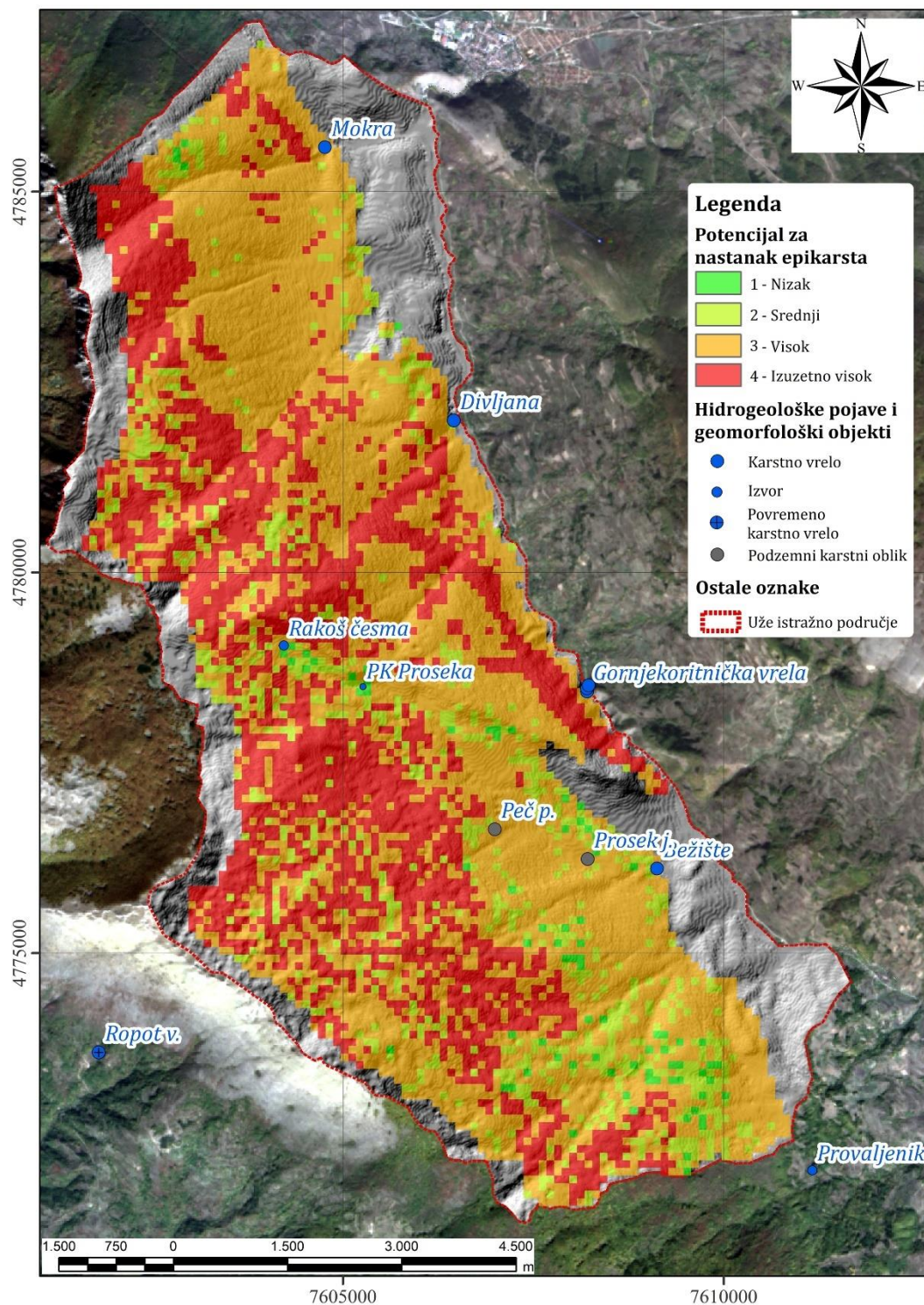
Hidrogeološka detaljna terenska istraživanja su izvršena u nekoliko etapa, tokom perioda novembar 2017-mart 2020. godine, od kojih je najobimniji deo, obavljen tokom letnjih meseci 2018. godine. Hidrogeološko kartiranje je izvršeno i radi definisanja karakteristika epikarsta radi kasnije korelacije sa podacima koji su prikupljeni i analizirani tokom primene daljinske detekcije i geomorfoloških istraživanja. Terenska hidrogeološka istraživanja obavljana su na kvartalnom i mesečnom nivou, kada su prikupljeni podaci o fizičko-hemijskim karakteristikama podzemnih voda terenskim uređajima, vršeno je uzorkovanje podzemne vode za skraćene hemijske analize i za vršenje izotopskih analiza podzemne vode (Slika 7.33.). Takođe, vršeno je uzorkovanje kišnice na mesečnom nivou za određivanje sastava stabilnih izotopa (^{18}O i 2H) i uspostavljanje lokalne izotopske meteorske linije (LIML).



Slika 7.33. Terenska merenja fizičko-hemijskih parametara (levo) i terenske hemijske analize (desno)

7.5.1. Kartiranje epikarsta

Terenska istraživanja tokom kojih je izvršena i analiza epikarsta obavljena su tokom jula i avgusta 2018. godine. Prikupljeni podaci su zatim upoređeni sa kartom koja je kreirana sa ciljem da se definiše potencijal za nastanak epikarsta na istražnom terenu. Izrada karte (Slika 7.34.) je prilagođena lokalnim uslovima, prema metodologiji prikazanoj u poglavlju 5.1.1. Rezolucija piksela koji prikazuju potencijal za nastanak epikarsta je 100x100 metara.



Slika 7.34. Karta potencijala razvoja epikarsta E

Površine različitih kategorija potencijala za razvoj epikarsta su prikazane bojama od zelene koja predstavlja nizak potencijal do crvene koja prestavlja izuzetno visok potencijal. Površina

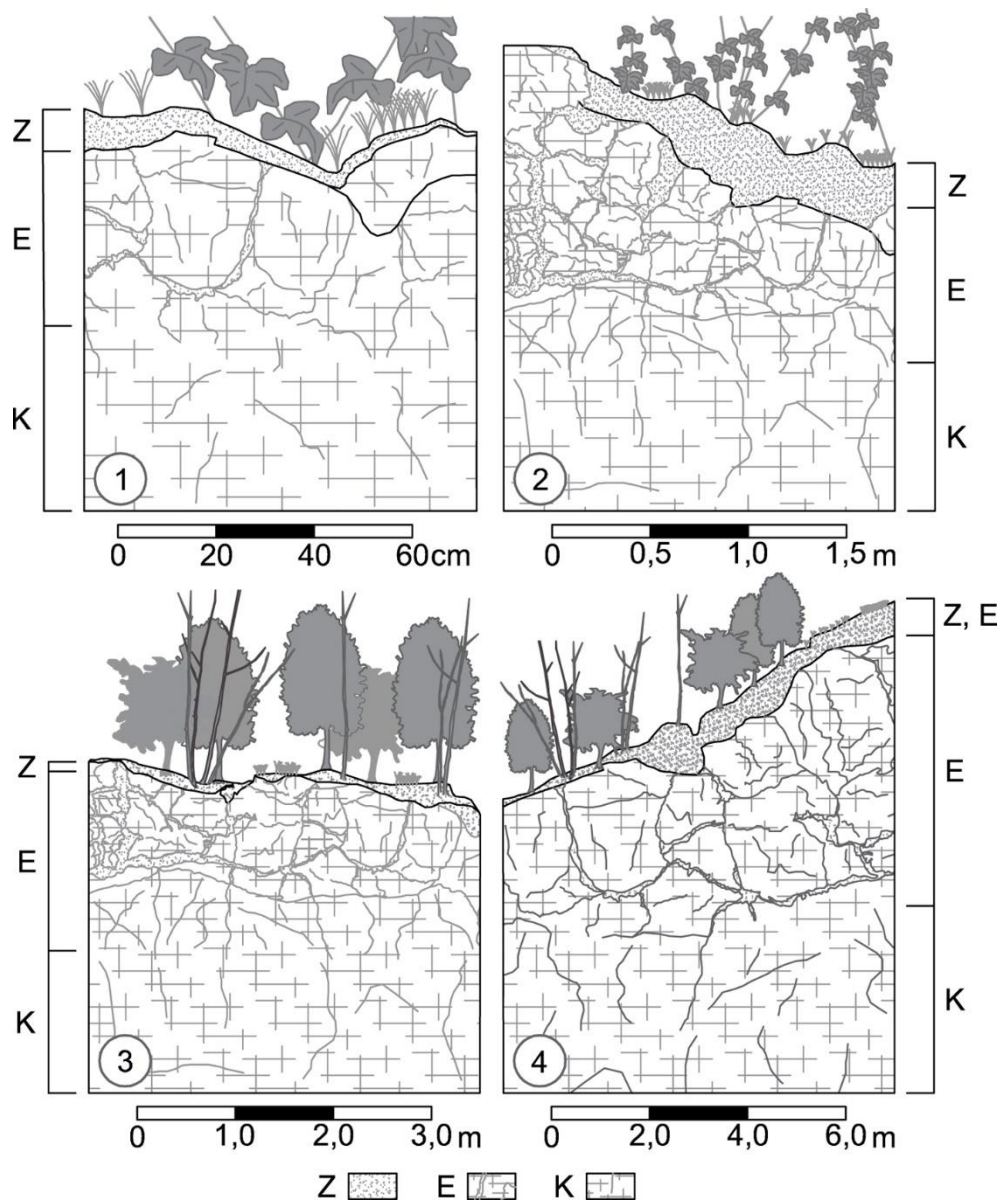
terena koja pokazuje nizak potencijal za razvoj epikarsta zauzima samo 1,5 % površine otkrivenih karbonatnih stena na užem istražnom području, dok srednji potencijal za nastanak epikarsta ima 11,5% terena. Visok potencijal za nastanak i razvoj epikarsta ima 53% površine izloženih krečnjaka, a izuzetno visok 34%. S obzirom na veličinu piksela na karti potencijala, treba naglasiti da karta dobijena na ovaj način ne može biti iskorišćena samostalno za definisanje stepena stvarnog razvoja epikarsta, bez prethodnih terenskih istraživanja. Stoga je naredni korak u istraživanju bio kartiranje epikarsta na otvorenim izdancima i usecima (Slika 7.35.), gde je izvršeno određivanje debljine epikarsta, sastava i oblasti prostiranja.



Slika 7.35. Definisanje karakteristika epikarsta, na otvorenim izdancima i usecima

Na istočnim padinama Suve planine, za potrebe definisanja stepena karstifikacije i evolucije epikarsta izdvojene su 4 kategorije ovog potpovršinskog sloja (Slika 7.36.): 1-slabo razvijen epikarst, 2-razvijen epikarst, 3-srednje razvijen epikarst i 4-izuzetno razvijen epikarst. Izdvajanje je pre svega izvršeno prema debljini zone, zatim prema debljini zemljišnog sloja koji

se nalazi na površini i prisustvu i tipu vegetacije. Prva kategorija – slabo razvijen epikarst debljine do 50 cm, nekada i do 1m, na kome se uočava prisustvo pukotina ispunjenih zemljištem, debljina zemljišnog sloja je do 10 cm, kada je prisutan. Druga kategorija – razvijen epikarst, se odlikuje prisustvom znatno debljeg sloja zemljišta na površini od 10 do 30 cm (retko i do 50 cm), dok je sloj epikarsta debljine oko 1-1,5 metara, uočavaju šire pukotine i kaverne (santimetarskih dimenzija) koje često nisu ispunjene. Treća kategorija – srednje razvijen epikarst odlikuje se znatnom debljinom osnovnog sloja i do 3 metara, ali je najčešće debljine 1,5 do 2 metra, zemljište je različite debljine od 10 do 30 cm, može biti i odsutno na manjim površinama (epikarst je ogoljen), pukotine i kanali su česti, a često su ispunjeni sekundarnim materijalom. Četvrta kategorija – izuzetno razvijen epikarst ima sve odlike prethodne kategorije, jedino je debljina epikarsta uvek preko 3 metra.



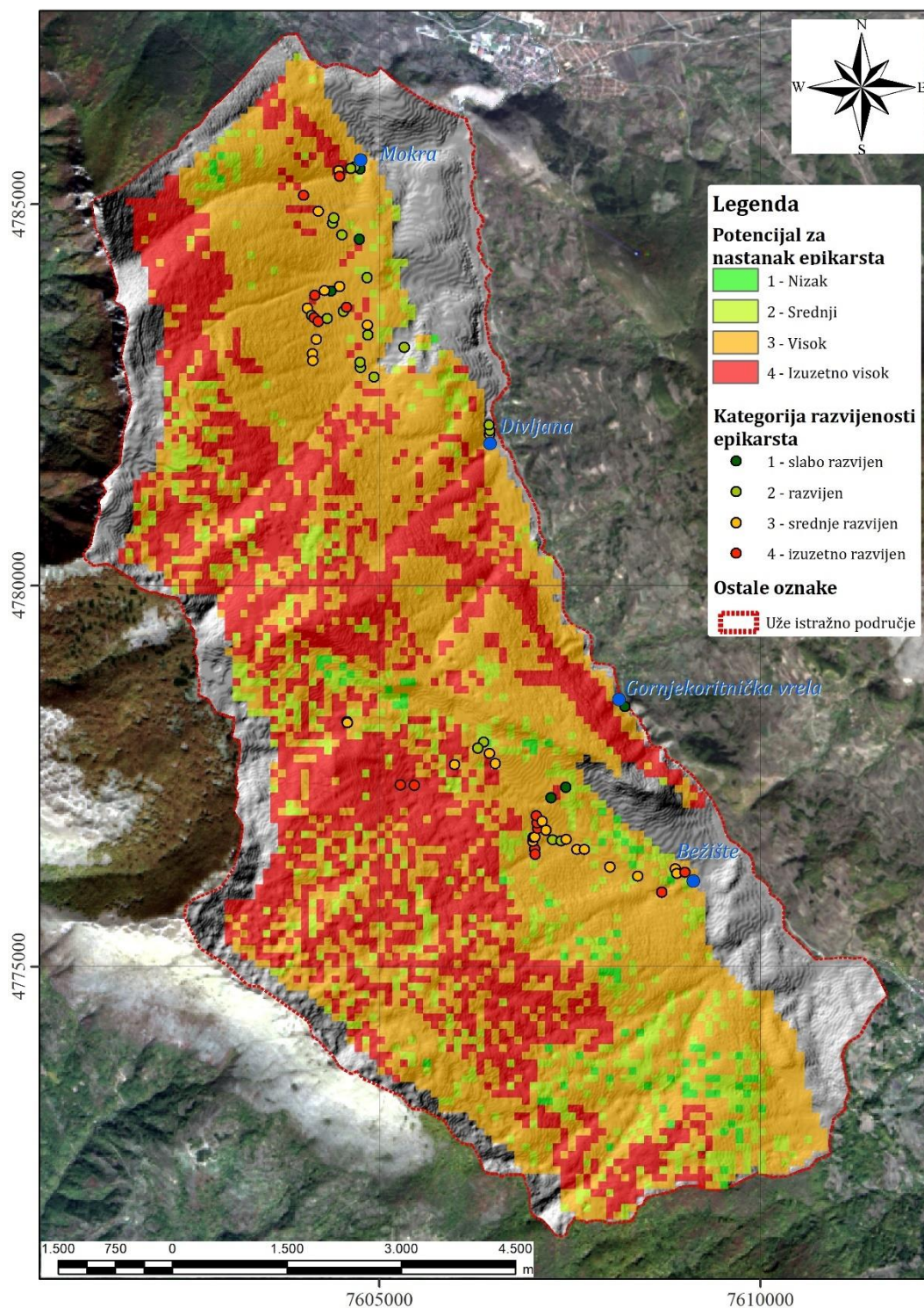
Slika 7.36. Kategorije epikarsta: 1-slabo razvijen, 2-razvijen, 3-srednje razvijen i 4-izuzetno razvijen; Z – zemljište; E – epikarst; K – karstifikovani krečnjak

Kategorije epikarsta izdvojene su na repnim profilima u okviru užeg istražnog prostora (Tabela 7.3), međutim, nije bilo moguće obaviti kartiranje na svim delovima terena pre svega usled nepristupačnosti određenih padina između Bežišta i Divljane.

Tabela 7.3. Lokacije kartiranja i osnovne odlike epikarsta

Redni broj	Terenska GPS oznaka	X (m)	Y (m)	Z (m)	Epikarst (E)	kategoriya E
1	117	4785468	7604745	365	slabo razvijen	1
2	118	4785492	7604674	390	srednje razvijen	3
3	120	4785472	7604626	416	srednje razvijen	3
4	121	4785444	7604465	479	razvijen	2
5	122	4785368	7604475	484	izuzetno razvijen	4
6	123	4784541	7604734	498	slabo razvijen	1
7	124	4784598	7604506	545	srednje razvijen	3
8	125	4784749	7604387	557	srednje razvijen	3
9	126	4784823	7604398	549	srednje razvijen	3
10	127	4784908	7604194	589	razvijen	2
11	128	4785119	7604003	619	izuzetno razvijen	4
12	129	4777218	7607250	852	slabo razvijen	1
13	130	4777797	7606440	977	razvijen	2
14	131	4777941	7606365	1002	srednje razvijen	3
15	132	4777865	7606292	991	srednje razvijen	3
16	133	4777377	7605455	1076	izuzetno razvijen	4
17	134	4777386	7605275	1089	izuzetno razvijen	4
18	135	4778212	7604574	1193	srednje razvijen	3
19	137	4778198	7604577	1190	razvijen	2
20	138	4777645	7605987	1020	razvijen	2
21	139	4777663	7606516	959	razvijen	2
22	140	4777354	7607442	836	slabo razvijen	1
23	141	4776280	7608882	620	razvijen	2
24	142	4782735	7604928	539	srednje razvijen	3
25	143	4782859	7604749	542	srednje razvijen	3
26	144	4782927	7604745	542	srednje razvijen	3
27	145	4783290	7604849	518	srednje razvijen	3
28	147	4778412	7608221	448	slabo razvijen	1
29	149	4784039	7604838	510	srednje razvijen	3
30	150	4783921	7604479	542	razvijen	2
31	151	4783863	7604366	556	slabo razvijen	1
32	152	4783868	7604279	575	razvijen	2
33	153	4783805	7604149	610	izuzetno razvijen	4
34	154	4783636	7604054	650	razvijen	2
35	155	4783542	7604109	649	srednje razvijen	3
36	156	4783511	7604140	641	izuzetno razvijen	4
37	157	4783467	7604197	625	izuzetno razvijen	4
38	158	4783225	7604173	642	razvijen	2
39	159	4783039	7604119	689	razvijen	2
40	160	4782948	7604125	698	razvijen	2
41	161	4783503	7604316	587	srednje razvijen	3
42	162	4783598	7604528	540	srednje razvijen	3
43	163	4783648	7604570	534	izuzetno razvijen	4
44	164	4776542	7607040	891	izuzetno razvijen	4
45	165	4776472	7607043	897	izuzetno razvijen	4
46	166	4776641	7607009	893	razvijen	2
47	167	4776692	7607018	898	razvijen	2
48	168	4776699	7607039	884	razvijen	2
49	169	4776809	7607075	875	izuzetno razvijen	4
50	170	4776888	7607065	866	izuzetno razvijen	4
51	171	4776975	7607058	870	izuzetno razvijen	4
52	172	4776905	7607135	849	razvijen	2
53	173	4776791	7607182	844	razvijen	2
54	174	4776661	7607270	819	srednje razvijen	3
55	175	4776647	7607382	805	srednje razvijen	3
56	176	4776665	7607448	792	razvijen	2
57	177	4776536	7607590	768	razvijen	2
58	178	4776304	7608023	736	razvijen	2
59	179	4775976	7608706	667	izuzetno razvijen	4
60	180	4776218	7608900	627	razvijen	2
61	181	4776235	7609006	585	izuzetno razvijen	4
62	181a	4776185	7608388	698	razvijen	2
63	182	4776535	7607686	623	razvijen	2
64	201	4781981	7606444	360	razvijen	2
65	202	4782033	7606450	353	srednje razvijen	3
66	203	4782104	7606436	357	srednje razvijen	3
67	204	4783123	7605323	470	srednje razvijen	3
68	205	4783415	7604845	505	razvijen	2

Lokacije na kojima su terenskim istraživanjima izdvojene kategorije epikarsta (1-4) prikazane su na karti potencijala za razvoj epikarsta (Slika 7.37.), gde možemo uočiti da se, kategorije izdvojene uz pomoć metoda daljinske detekcije poklapaju sa terenskim istraživanjima u manjem broju od očekivanog.



Slika 7.37. Kategorije epikarsta na karti potencijala za nastanak epikarsta, uže područje istraživanja

Najveći broj poklapanja između kategorija potencijalnosti nastanka epikarsta i terenskih rezultata je između kategorije 3) visok potencijal za razvoj epikarsta i kategorije 3) srednje razvijen epikarst. Uočljivo je da su određene tačke sa terenskim kategorijama 1 ili 2 na pixelima potencijalnosti 2 i 3. Međutim, ne može se reći da je neusklađenost prevelika, naročito ako posmatramo središnje kategorije potencijala (2 i 3) i terenski određene kategorije (2 i 3), gde

su mimoilaženja kategorija prisutna, ali ne u prevelikom broju. Tačke sa terenskom kategorijom 4 često su na površini koja na karti predstavlja kategoriju 3 – visok potencijal, a ne izuzetno visok potencijal. Međutim, uzевši u obzir da su terenske kategorije 3 i 4 izdvojene pre svega prema debljini sloja epikarsta, ovo se ne može smatrati velikim odstupanjem.

Neusklađenost rezultata dobijenih pomoću metoda daljinske detekcije i konkretnih terenskih osmatranja postoji zbog nekoliko razloga. Pre svega veličina piksela na karti je veća nego što je za ovakav nivo istraživanja potrebno, jer se lokalno epikarst i njegov stepen razvoja može promeniti na rastojanjima manjim od 50 metara. Potrebno je, takođe, raspolagati i sa mnogo detaljnijim rezultatima geološkog kartiranja od karata razmere 1:25.000 koje su ovde korišćene. Tako će i granice između litostratigrafskih jedinica biti preciznije definisane, a samim tim izdvajanje krečnjačkih stena i njihovog stepena čistoće koje je prikazano prilikom kreiranja karte potencijala će biti mnogo preciznije definisano.

Terenskim istraživanjima postiže se mnogo bolja rezolucija istražene površine, pa se samim tim i preciznost karte dobijene metodama daljinske detekcije može povećati. Ovakav zaključak je i očekivan, jer na osnovu podataka koji su dostupni bez izvršenih terenskih istraživanja nije moguće doneti ispravan i kompletan sud o stepenu razvoja i prisustva epikarsta na nekom krečnjačkom terenu.

7.5.2. Monitoring kvantitativnih karakteristika karstnih voda

Monitoring kvantiteta vrela Mokra i Divljana vršen je i tokom 2018. godine na dnevnom nivou (JKP „Naissus“). Količine istekle vode tokom 2018. godine su prikazane u posebnom poglavlju u cilju definisanja režima kvantiteta podzemnih voda za godinu u kojoj je vršeno i definisanje kvaliteta, radi utvrđivanja odnosa izdašnosti vrela Mokra i Divljana i fizičko-hemijskih parametara i sadržaja stabilnih izotopa u podzemnoj vodi sa ova dva vrela.

Maksimalna izdašnost na vrelima Mokra i Divljana tokom 2018. godine izmerena je istog dana, 14.3.2018. godine, 3,932 m³/s i 4,321 m³/s, respektivno. Srednje godišnje izdašnosti vrela u 2018. godini prikazane su u Tabeli 7.4.

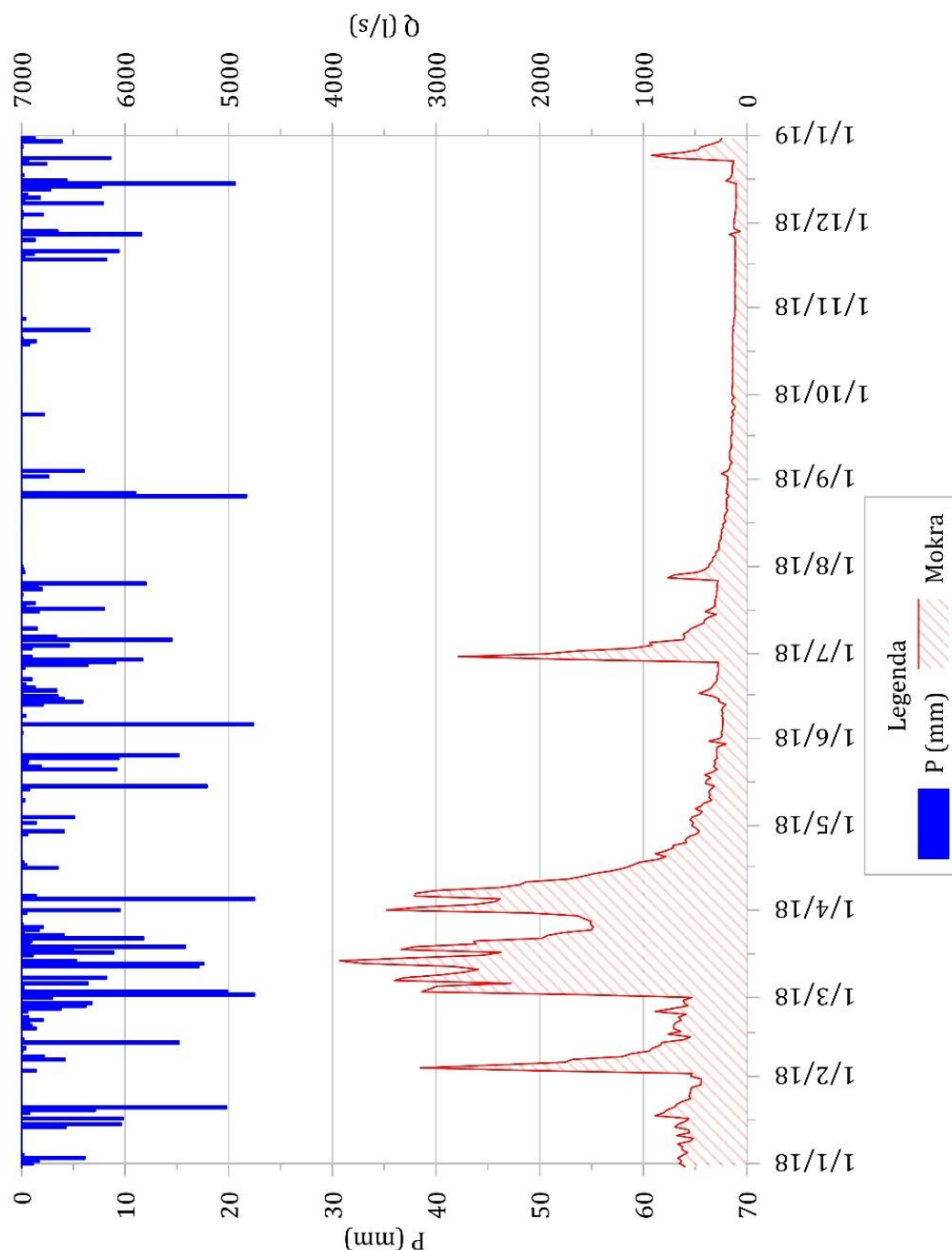
Tabela 7.4. Srednje mesečne vrednosti izdašnosti vrela Mokra i Divljana, tokom 2018. godine

	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec	sr.
Mokra	636,9	996,9	2452,4	1584,6	374,0	407,9	564,5	241,2	154,9	135,1	116,4	221,2	657,2
Divljana	697,1	642,1	1968,4	1100,6	332,4	338,2	450,6	355,6	293,7	195,8	128,3	180,4	556,9

Vrelo Mokra u toku 2018. godine ima izraženu ritmičnost i smenu maksimuma sa minimumom, lakše se može izdvojiti periodi recesije vrela, dok vrelo Divljana ima veoma promenljivu izdašnost, naročito prilikom niskih nivoa podzemne vode i minimalnih izdašnosti, što se vidi na hidrogramima (Slike 7.38. i 7.39.).

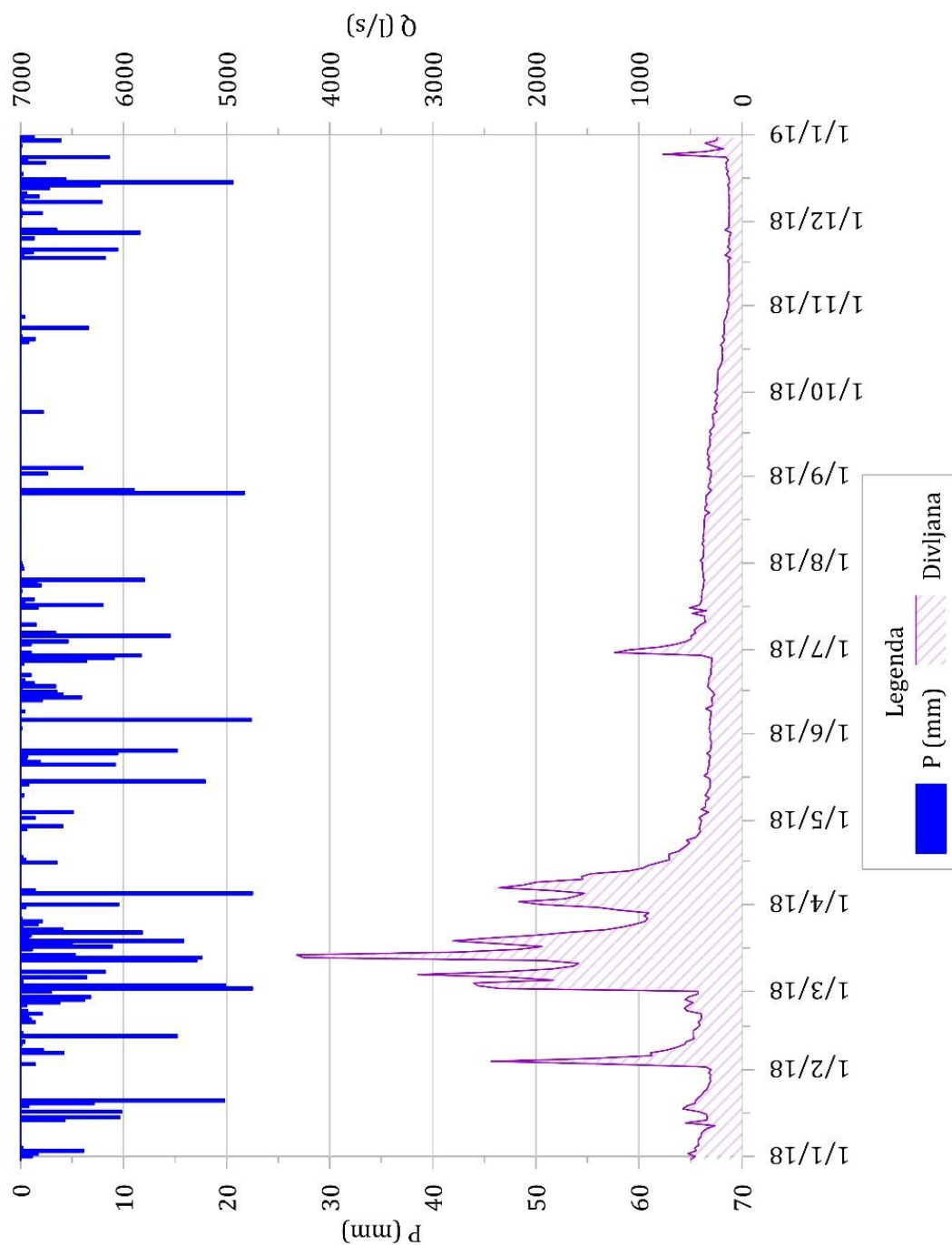
Na vrelima Mokra i Divljana mogu se izdvojiti, 4 perioda sa maksimalnim izdašnostima (Slike 7.38. i 7.39.). Prvi po redu maksimum je zabeležen, sa jednim pikom na početku februara. Nakon tog lako uočljivog maksimuma sledi period kada dolazi do česte smene pikova maksimuma i minimuma, koji su istaknutiji kod vrela Divljana. Period smene visokih i niskih izdašnosti traje, od 2. marta do 7. aprila. Nakon toga nastupa period recesije, koji biva prekinut trećim po redu periodom maksimuma u sredini leta, koji je izazvan kratkotrajnim letnjim pljuskovima, stoga i traje kratko do 7 dana na oba vrela. Period maksimuma postoji i na samom kraju decembra meseca, po intenzitetu i trajanju, najmanji u 2018. godini. Takođe, je izazvan obilnim kišama,

ali je kratak, 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).



Slika 7.38. Uporedni dijagram izdašnosti karstnog vrela Mokra sa histogramom padavina za 2018. godinu, dnevne vrednosti (podaci JKP „Naissus“ i www.meteomanz.com)

Na vrelima Mokra i Divljana postoji nekoliko perioda minimalnih izdašnosti. Prvi je zabeležen u januaru. Drugi minimum je usled opadanja izdašnosti vrela nakon perioda otapanja snega (krajem februara). Treći i četvrti minimum vezani su za period pražnjenja izdani bez prihranjivanja, kada su beležene i minimalne padavine, ipak su odvojeni jednom kraćom epizodom povećanja izdašnosti, usled kišne epizode na samom kraju juna, pa stoga „prava“ recesija 2018. godine na vrelu Mokra počinje kasnije (videti poglavlje 6.6.2.2.).

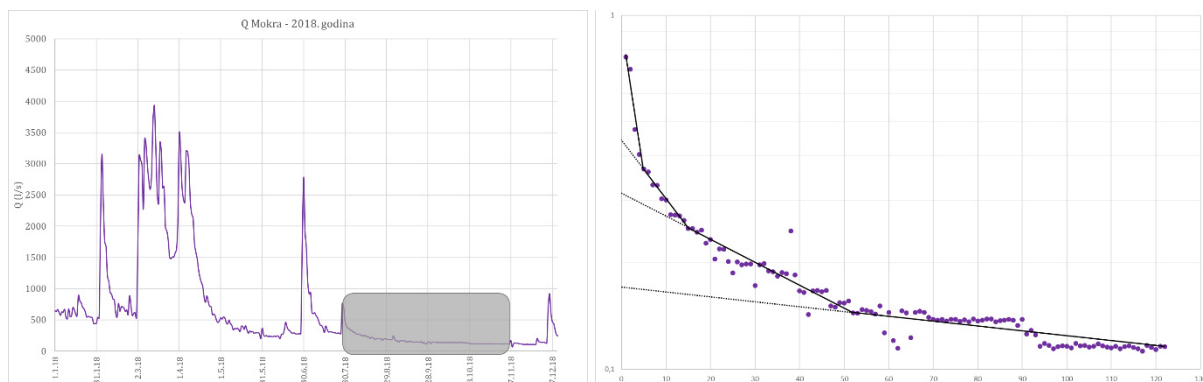


Slika 7.39. Uporedni dijagram izdašnosti karstnog vrela Divljana sa histogramom padavina za 2018. godinu, dnevne vrednosti (podaci JKP „Naissus“ i www.meteomanz.com)

Analiza krive recesije vrela Mokra i Divljana izvršena je za 2018. godinu koristeći eksponencijalnu jednačinu Majea (formule 5.4. i 5.5.) (Krešić, 1991).

Recesiona analiza vrela Mokra (Slika 7.40. i Tabela 7.5.) pokazala je 4 mikro režima koji su ukupno trajala 122 dana. Količina istekle podzemne vode tokom recesije 2018. godine $2,90 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Vrelo Mokra je okarakterisano složenim režimom pražnjenja tokom 2018. godine jednačinom tarismana (formula 7.1.):

$$Q_t = 0,763e^{-0,146031t} + 0,361e^{-0,038794t} + 0,249e^{-0,014815t} + 0,144e^{-0,003150t} \quad (7.1.)$$

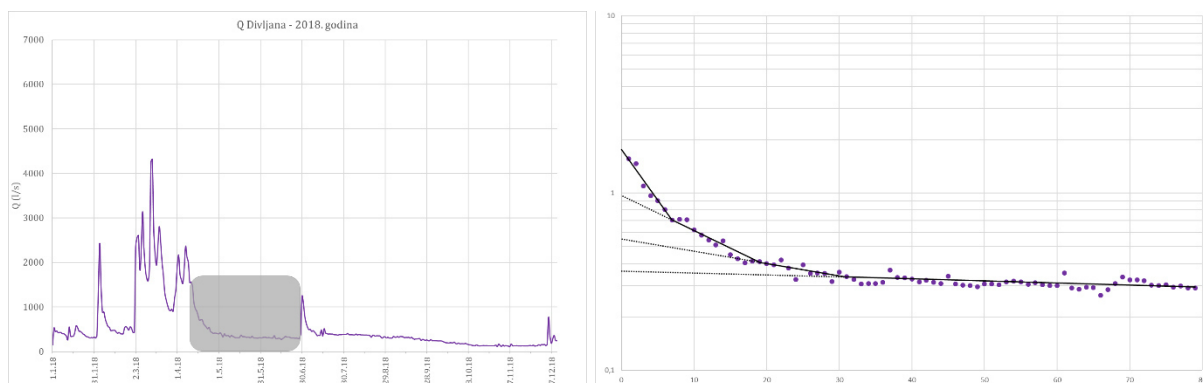


Slika 7.40. Recesioni period vrela Mokra i dijagram pražnjenja za godine 2018. godinu; sivi pravougaonik predstavlja period recesije vrela (Petrović & Marinović, 2018; Petrović & Marinović, 2019a)

Tabela 7.5. Recesiona analiza vrela Mokra za 2018. godinu (Petrović & Marinović, 2018; Petrović & Marinović, 2019a)

godina	Koeficijent recesije (α)		Vreme trajanja mikro-režima (dani)
2018	α_1	0,146031	5
	α_2	0,038794	10
	α_3	0,014815	37
	α_4	0,003150	70
	Recesioni period: 28.7. – 26.11.2018.		$\Sigma = 122$
Količina istekle podzemne vode tokom recesije $V^* = 2,90 \cdot 10^6 \text{ m}^3$			

S druge strane, recesiona analiza vrela Divljana (Slika 7.41. i Tabela 7.6.) pokazuje da je recesija 2018. godine imala 4 mikro režima koja su ukupno trajala 79 dana. Količina istekle podzemne vode tokom perioda recesije iznosila je $4,35 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.



Slika 7.41. Recesioni period vrela Divljana i dijagrami pražnjenja za 2018. godinu; sivi pravougaonik predstavlja period recesije vrela (Petrović & Marinović, 2018)

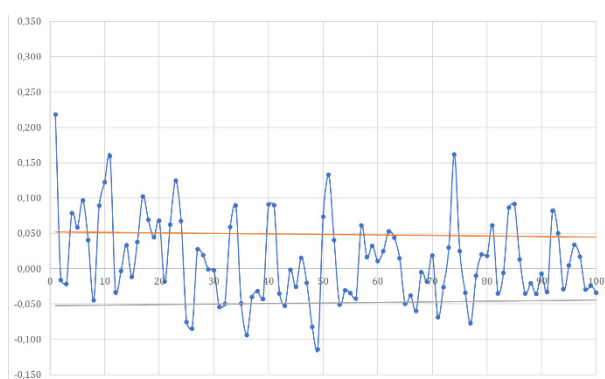
Tabela 7.6. Recesiona analiza za vrela Divljana za 2018. godinu (Petrović & Marinović, 2018)

godina	Koeficijent recesije (α)		Vreme trajanja mikro-režima (dani)
2018	α_1	0,113896	7
	α_2	0,044974	12
	α_3	0,016067	12
	α_4	0,003113	48
	Recesioni period: 11.4. – 28.6.2018.		$\Sigma = 79$
Količina istekle podzemne vode tokom recesije $V^* = 4,35 \cdot 10^6 \text{ m}^3$			

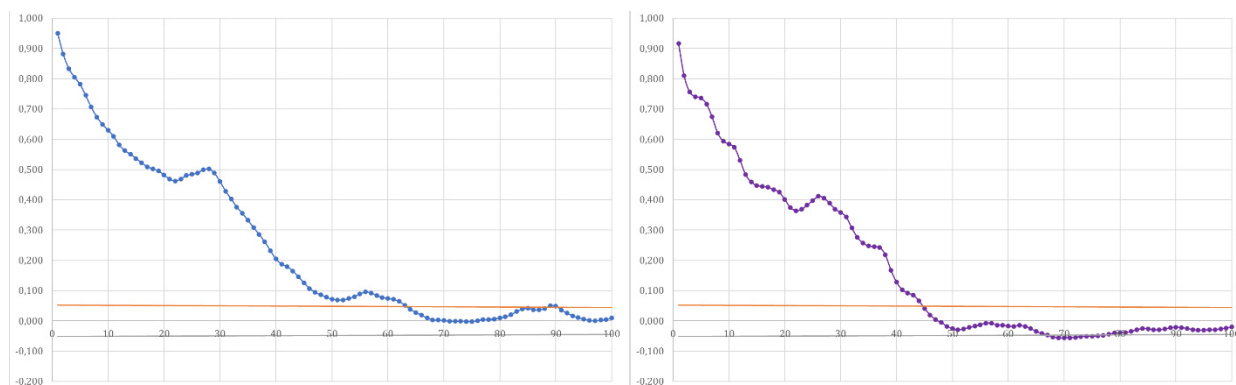
Vrelo Divljana može se okarakterisati složenim režimom pražnjenja tokom 2018. godine jednačinom tarismana (formula 7.2.):

$$Q_t = 1,556e^{-0,113896t} + 0,709e^{-0,044974t} + 0,399e^{-0,016067t} + 0,325e^{-0,003113t} \quad (7.2.)$$

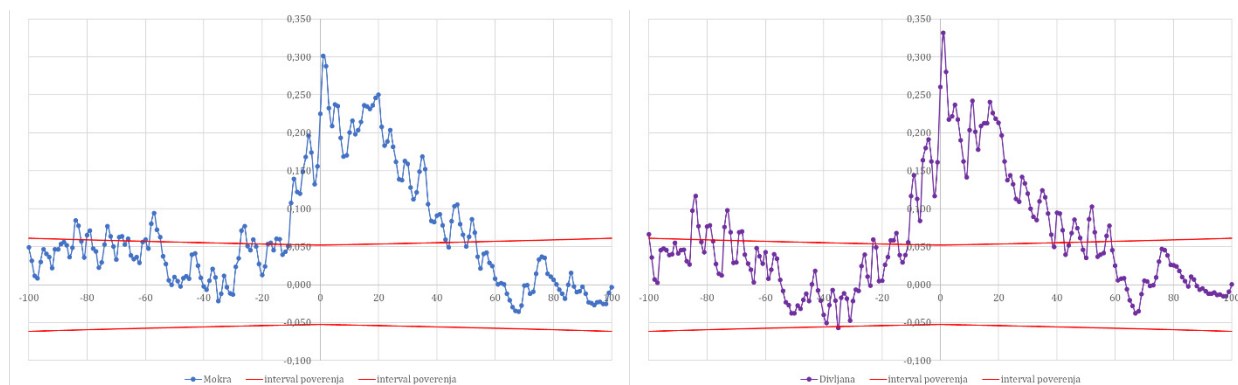
Kreirani su autokorelogrami izdašnosti vrela Mokra i Divljana i padavina, sa kišomerne stanice Niš, (Slike 7.42. i 7.43.) i njihovi kroskorelogrami (Slika 7.44.). Autokorelacija padavina ne pokazuje nikakvu memoriju sistema, što je imajući u vidu slučajni karakter ove promenljive očekivano. Vrelo Mokra, 2018. godine ima neznatno dužu „memoriju“ od vrela Divljana (40 naspram 38 dana), što potvrđuje već pomenutu premisu o dužoj retenciji podzemnih voda i boljoj razvijenosti (povezanosti) karstnih kanala koji se dreniraju na ovom vrelu, a sa druge strane verovatno su kanali u ovom podslivu razvijeni na malo većim dubinama. Kroskorelacioni dijagrami pokazuju da uticaj padavina postaje statistički beznačajan na izdašnost vrela Mokra nakon 43 dana, a na izdašnost vrela Divljana nakon 38 dana, ponovo ukazujući na male razlike u režimu isticanja ova dva vrela, a verovatno i na zajednički bilans podzemnih voda.



Slika 7.42. Autokorelacija padavina sa KS Niš za 2018. godinu



Slika 7.43. Autokorelogrami izdašnosti Mokre i Divljane za 2018. godinu

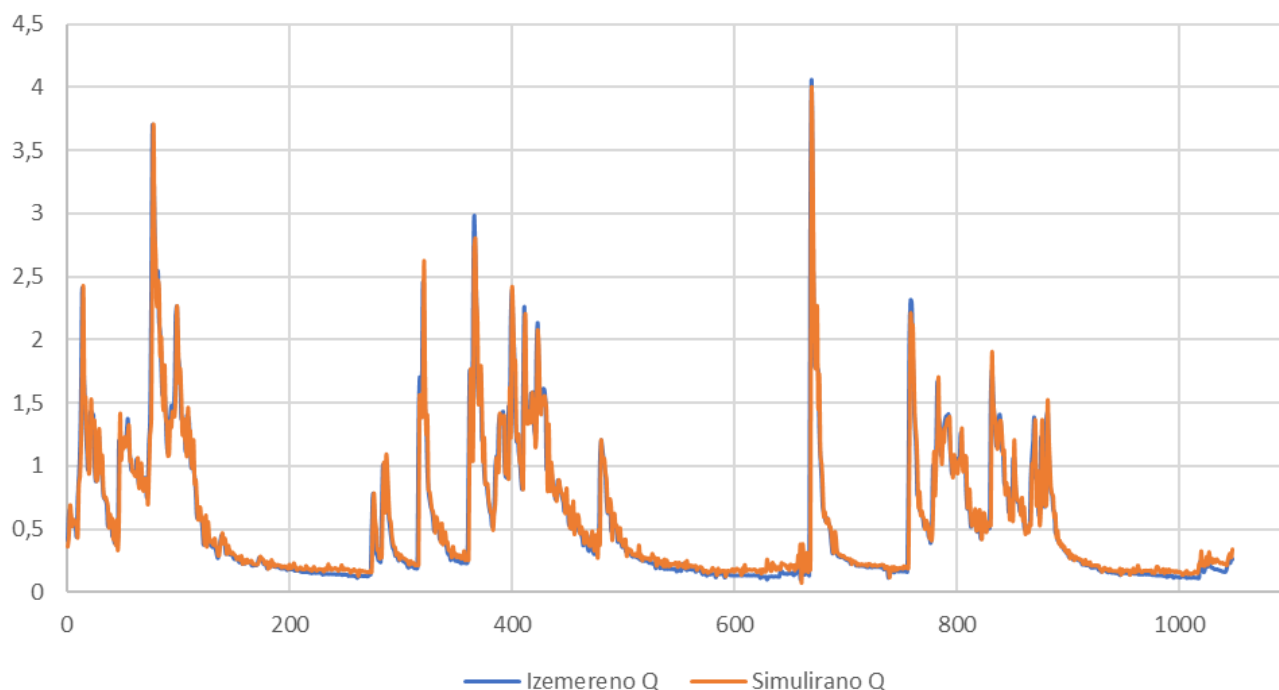


Slika 7.44. Kroskorelogrami padavina KS Niš i izdašnosti Mokre i Divljane za 2018. godinu

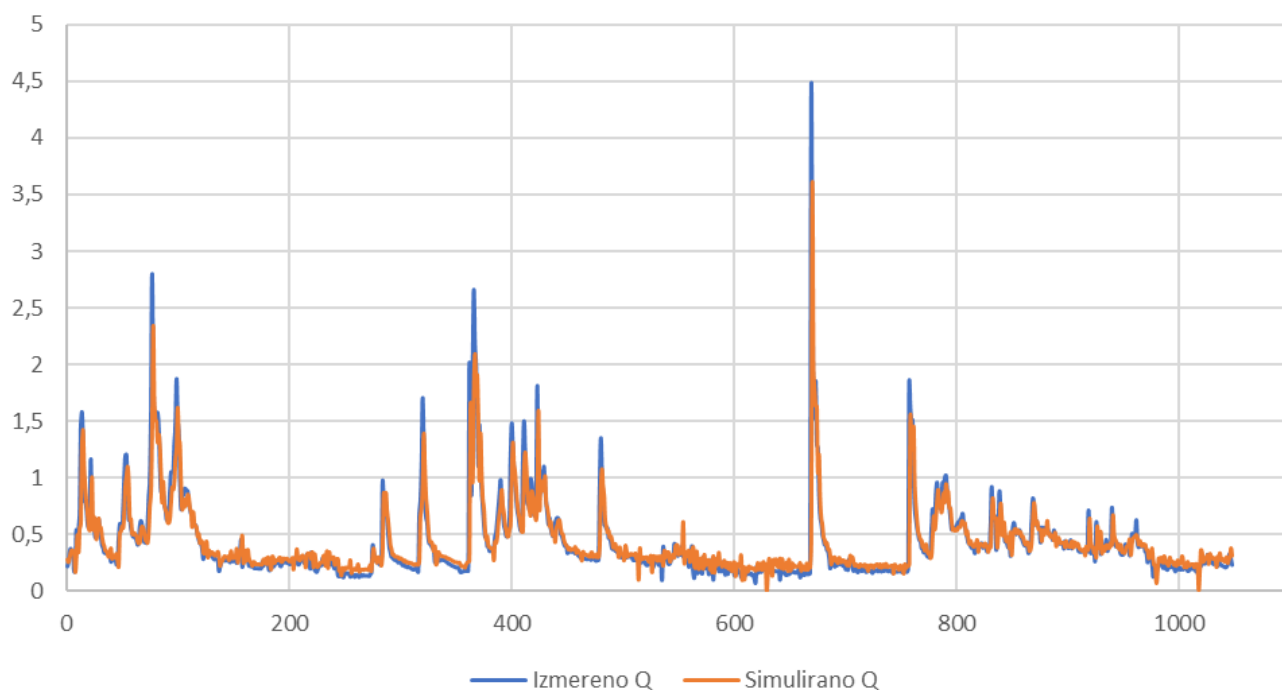
7.5.3. Model isticanja karstnih izdanskih voda vrela Mokra i Divljana

Simulacija i kratkoročna prognoza isticanja karstnih izdanskih voda vrela Mokra i Divljana je izvršena uz pomoć kombinovanog autoregresivno-krosregresivnog (AR-CR) modela u kojem je izvršena transformacija bruto padavina pomoću filtera linearnog pokretnog proseka (MA). Za simulaciju isticanja na vrelima Mokra i Divljana iskorišćena je ista vremenska serija padavina sa kišomerne stanice Niš, za period od tri godine (2015-2017).

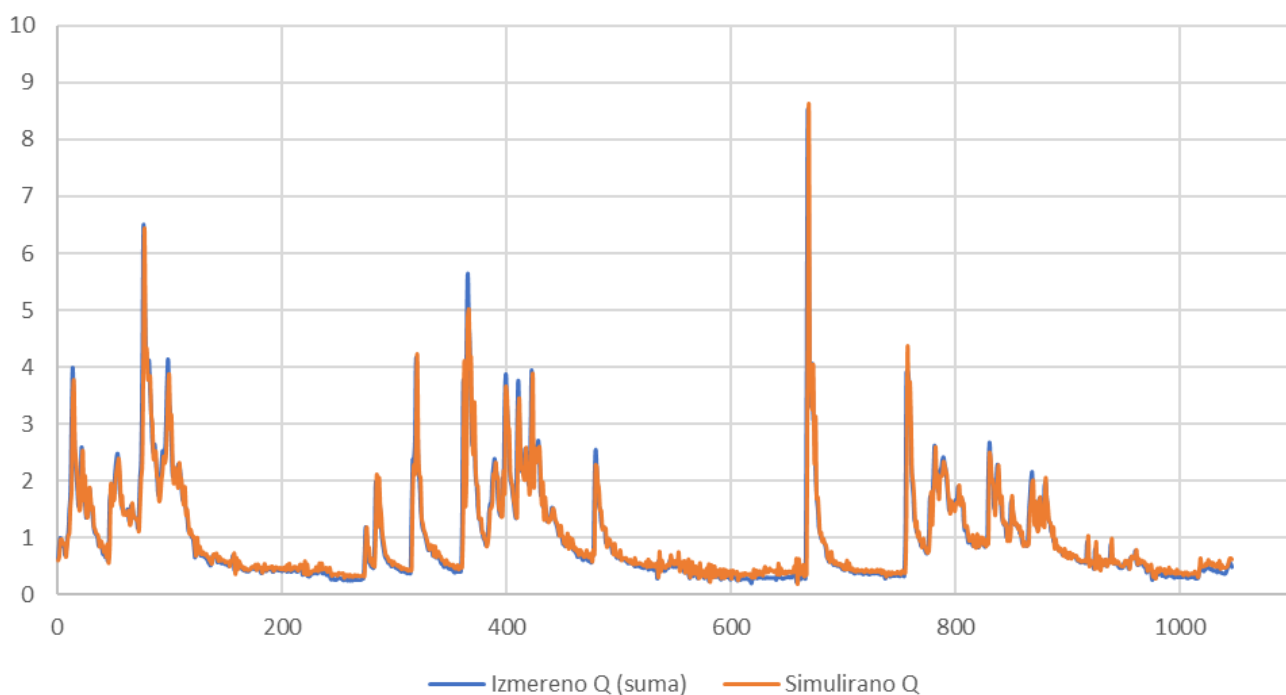
Na AR-CR model je primenjen prozor pokretnog proseka od 40 dana, što generalno odgovara memoriji karstnog hidrogeološkog sistema izračunatog primenom autokorelacione funkcije i kroskorelacione analize. Izvršena je simulacija sa nekoliko drugačijih vremenskih prozora radi provere rezultata, ali su te simulacije pokazale lošije rezultate. Odabrani prozor pokretnog proseka od 40 dana je odabran kao optimalan jer je i prilikom simulacije isticanja vrela Divljana dao više nego zadovoljavajuće rezultate. Sa dijagrama (Slike 7.45.-7.47.) se može uočiti da su velike i srednje vode generalno dobro simulirane, dok se u periodu niskih voda javljaju najveće oscilacije. Takav rezultat je dobijen zbog činjenice da ovakav model uzima ukupne bruto padavine, što umnogome utiče na velike razlike u izmerenim i simuliranim vrednostima u periodu recesije.



Slika 7.45. Uporedni dijagram izmerenih dnevnih i simuliranih vrednosti izdašnosti karstnog vrela Mokra (m^3/s) primenom AR-CR modela sa filterom linearnog pokretnog proseka



Slika 7.46. Uporedni dijagram izmerenih dnevnih i simuliranih vrednosti izdašnosti karstnog vrela Divljana (m^3/s) primenom AR-CR modela sa filterom linearnog pokretnog proseka



Slika 7.47. Uporedni dijagram izmerenih sumarnih dnevnih izdašnosti i simuliranih vrednosti dnevnih izdašnosti (m^3/s) karstnih vrela Mokra i Divljana primenom AR-CR modela sa filterom linearnog pokretnog proseka

U cilju provere boniteta modela izvršena je korelacija očitanih i simuliranih podataka dnevnih izdašnosti na vrelima za period 2015 – 2017. godina (Slika 7.48.). Sa pomenutih dijagrama se vidi da je koeficijent korelacije visok $R_{Mokra} = 0,9462$; $R_{Divljana} = 0,834$; $R_{\Sigma} = 0,9303$, što ukazuje na dobro slaganje izmerenih i simuliranih vrednosti. Takođe, u tabelama 7.9.-7.11. data je analiza varijansi modela i reziduala u tzv. ANOVA¹⁵ tabeli, koja testira model preko F koeficijenta koji sledi Fišerovu raspodelu. Kako bi se potvrdio bonitet regresionog modela, F

¹⁵ Analysis of Variance

vrednost mora biti veća od vrednosti za odabrani interval poverenja α , koji obično iznosi 0,05, kao u ovom slučaju. Budući da je vrednost F za odabrani interval poverenja 1,94 (prema statističkim tablicama), a sračunata F statistika regresionog modela jeste veća od 10 (Tabele 7.7.-7.9.), može se zaključiti da je model dobar.

Tabela 7.7. ANOVA tabela analize varijansi modela i reziduala, vrelo Mokra

Komponenta	SK	BSS	SVSK	\sqrt{SVSK}	F statistika	F tablična vrednost za $\alpha = 0,05$
Model	132	8	14,464	3,803	20,16	1,94
Rezidual	117	356	0,0356	0,188		
Ukupno	15	364	0,363	0,603		

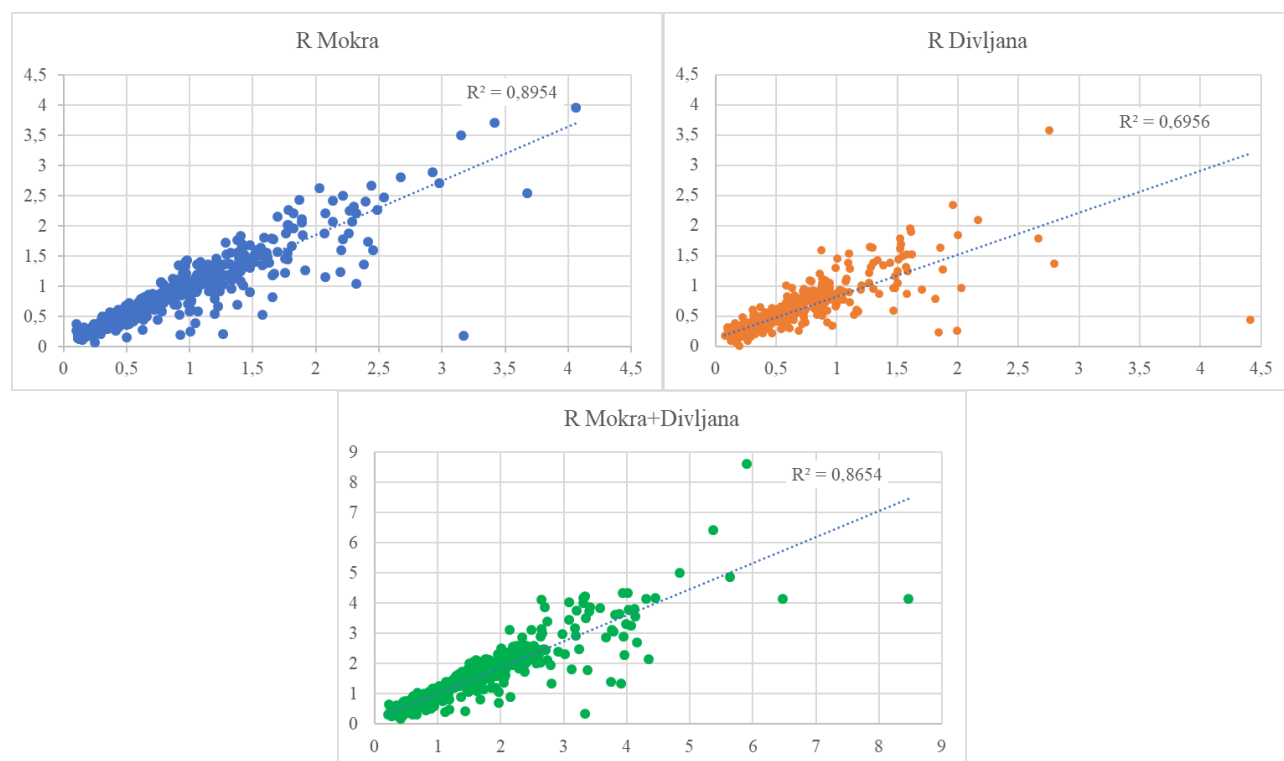
Tabela 7.8. ANOVA tabela analize varijansi modela i reziduala, vrelo Divljana

Komponenta	SK	BSS	SVSK	\sqrt{SVSK}	F statistika	F tablična vrednost za $\alpha = 0,05$
Model	52	8	4,361	2,088	10,997	1,94
Rezidual	37	356	0,036	0,189		
Ukupno	15	364	0,144	0,379		

Tabela 7.9. ANOVA tabela analize varijansi modela i reziduala, sumarna izdašnost vrela Mokra i Divljana

Komponenta	SK	BSS	SVSK	\sqrt{SVSK}	F statistika	F tablična vrednost za $\alpha = 0,05$
Model	340	8	35,560	5,963	17,672	1,94
Rezidual	290	356	0,114	0,337		
Ukupno	50	364	0,935	0,967		

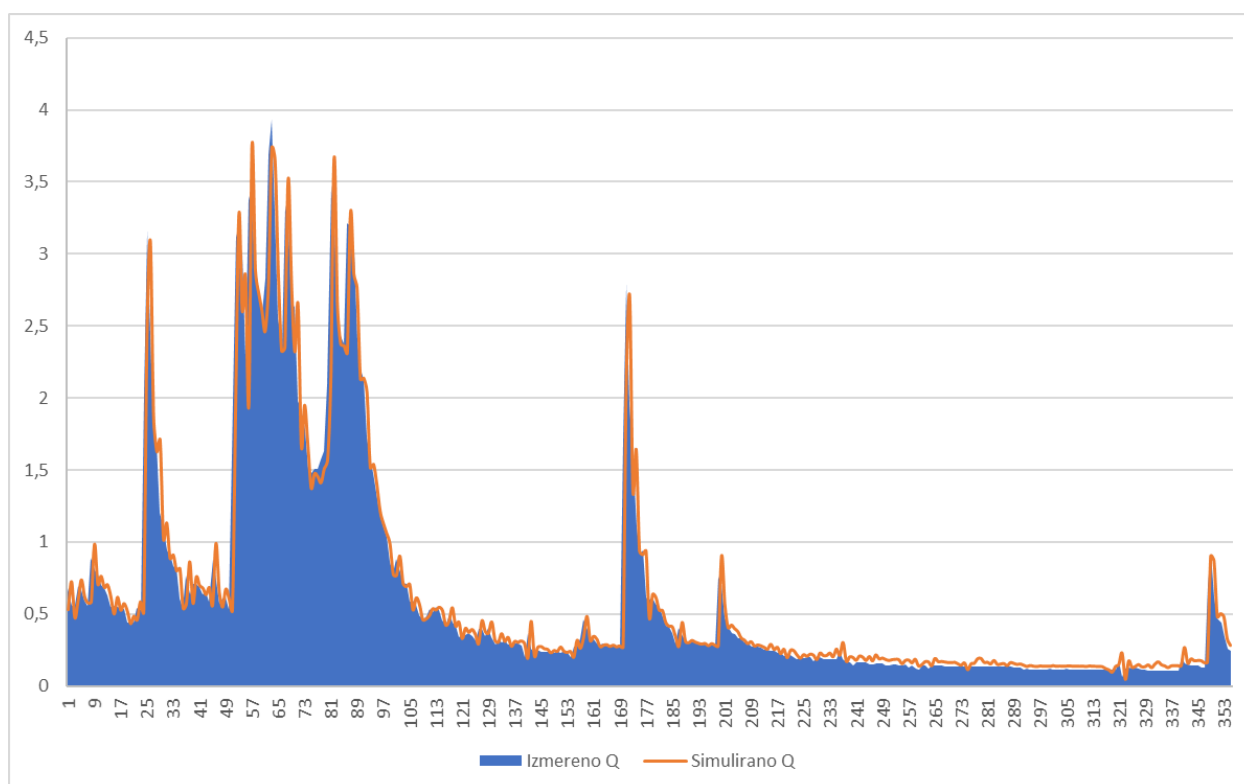
Legenda – SK – suma kvadrata; BSS – broj stepeni slobode; SVSK – srednje vrednosti sume kvadrata



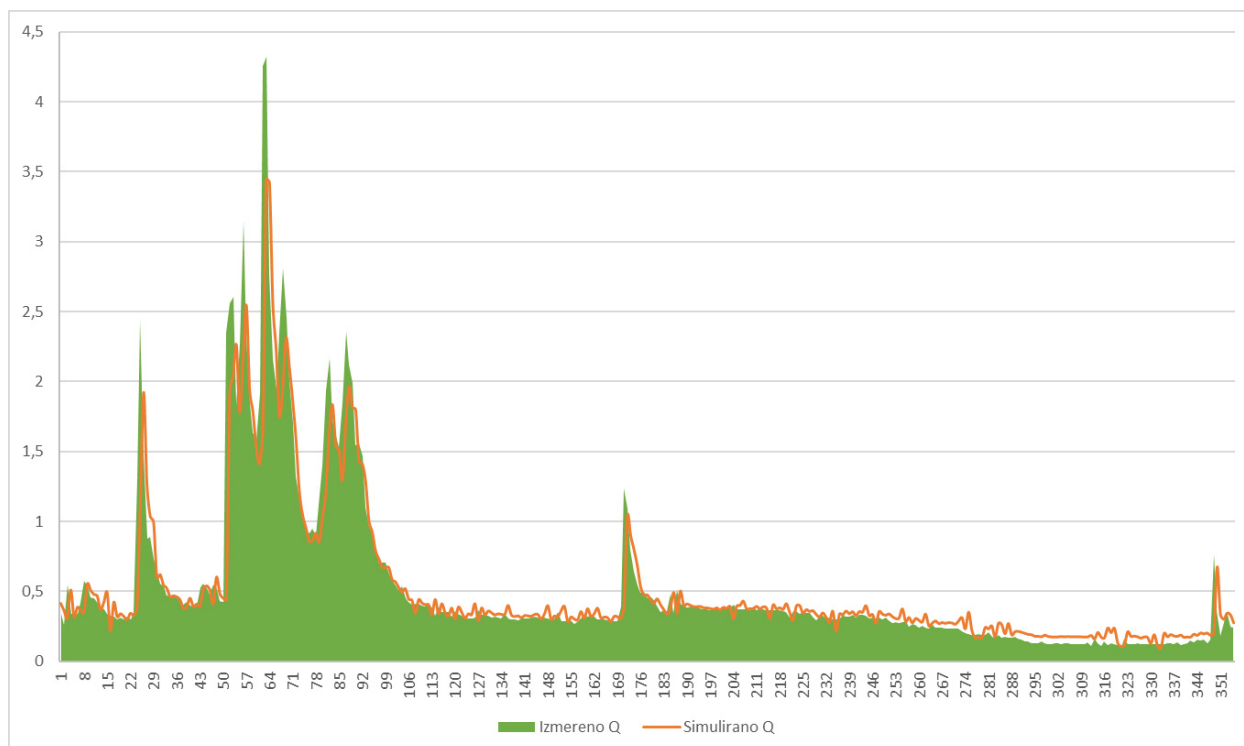
Slika 7.48. Korelacija izmerenih i simuliranih vrednosti isticanja karstnih vrela primenom AR-CR MA modela sa transformisanim padavinama

Osim pokazatelja boniteta modela, u cilju etaloniranja modela, neophodno je bilo proveriti model sa podacima koji nisu ušli u proračun, odnosno simulaciju isticanja. Drugim rečima ARCR-MA model je iskorišćen za simuliranje podataka isticanja vrela za period januar – decembar 2018. godine, radi poređenja sa stvarno izmerenim podacima. Pomenuti podaci su prikazani na slikama 7.49.-7.51. sa kojih se može uočiti dobro poklapanje izmerenih i simuliranih vrednosti.

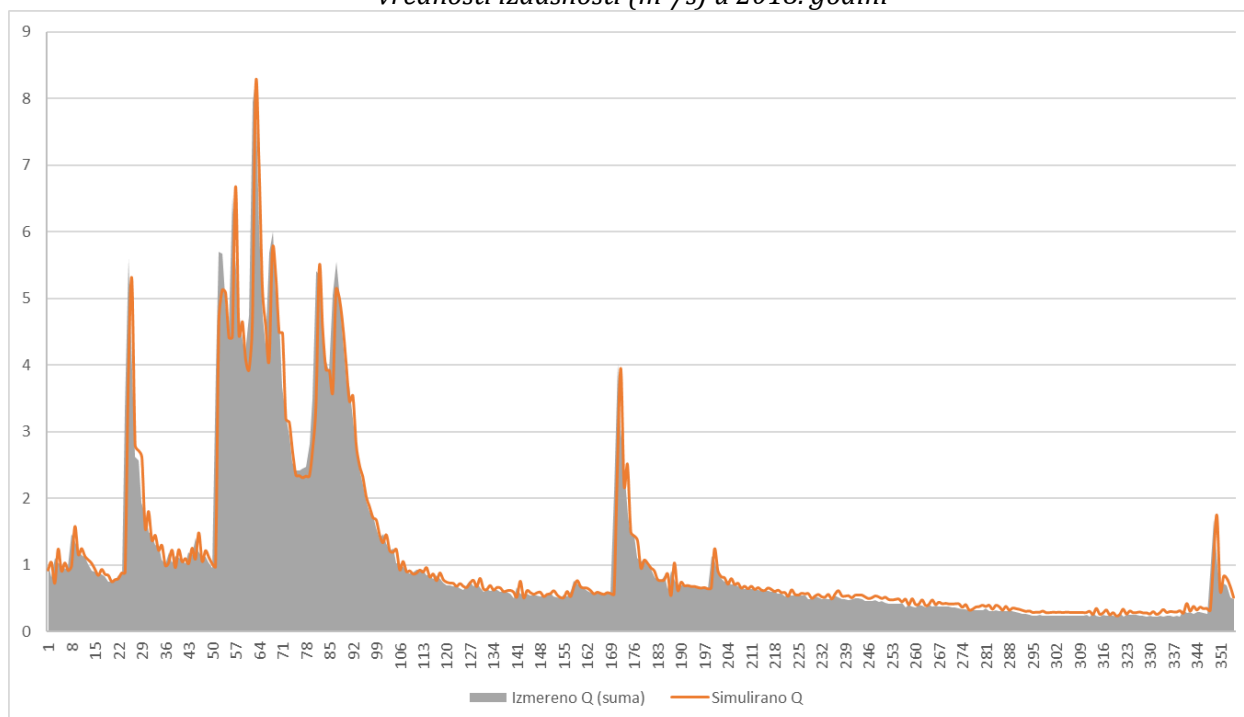
Prikazani podaci pokazuju dobro poklapanje simuliranih i izmerenih vrednosti. Model isticanja karstnog vrela Mokra dobro simulira i maksimalne i minimalne vrednosti (Slika 7.35.) što je dodatno potvrđeno i etaloniranjem simulacionog ARCR-MA modela vrednostima izdašnosti za 2018. godinu (Slika 7.49.). U pogledu modela isticanja karstnog vrela Divljana simulacija je malo lošija nego za model vrela Mokra, u modelu su minimumi niži od izmerenih, a u nekoliko vremenskih preseka i preniski (Slika 7.36.), takođe, simulirani maksimumi su niži od izmerenih. Slične nedostatke vidimo i prilikom etaloniranja modela Divljana sa vrednostima iz 2018. godine (Slika 7.50.). Na uporednom dijagramu izmerenih i simuliranih, sumarnih dnevnih vrednosti izdašnosti vrela Mokra i Divljana za 2018. godinu, vidimo značajno bolju simulaciju minimalnih i mnogo bolju simulaciju maksimalnih vrednosti (Slika 7.37.) u odnosu na model vrela Divljana, dok je u poređenju sa modelom za vrelo Mokra simulacija dobra u pogledu maksimalnih vrednosti, a bolja u pogledu minimalnih vrednosti. Zaključak se može argumentovati i dobrim vrednostima koeficijenta korelacije sumarnog modela ($R_{\Sigma}=0,9303$), kao i etaloniranjem ARCR-MA modela sumarnih vrednosti izdašnosti vrela Mokra i Divljana (Slika 7.51.).



7.49. Etaloniranje simulacionog AR-CR MA modela Mokre, na osnovu poređenja izmerenih i simuliranih vrednosti izdašnosti (m^3/s) u 2018. godini



7.50. Etaloniranje simulacionog AR-CR MA modela Divljane, na osnovu poređenja izmerenih i simuliranih vrednosti izdašnosti (m^3/s) u 2018. godini



7.51. Etaloniranje simulacionog AR-CR MA modela sumarne izdašnosti Mokre i Divljane, na osnovu poređenja izmerenih i simuliranih vrednosti izdašnosti (m^3/s) u 2018. godini

Simulacioni AR-CR-MA model je prognozirao da će izdašnost vrela Divljana u 2018. godini pasti ispod eksploatacionih potreba (uvećanih za biološki minimum od 10%) tokom 34 dana, dok su merenja pokazala da je period bio duži - 64 dana. Ova informacija znači da se voda sa ovog vrela ne može koristiti za vodosnabdevanje ukupno dva meseca godišnje. U slučaju vrela Mokra model je prognozirao 123 „malovodna“ dana, a tokom 130 dana je izdašnost zaista bila ispod 220 l/s. Ovo bi značilo da je vrelo Mokra van sistema vodosnabdevanja 4 meseca u toku godine. Međutim, realnost je drugačija, jer eksploatacija vode sa vrela Mokra i Divljana, varira tokom

godine, pa su oba vrela uključena u sistem vodosnabdevanja cele godine, osim kada usled povećane mutnoće nije moguće koristiti podzemnu voda sa ova dva vrela.

Autokorelaciona i kroskorelaciona analiza izdašnosti vrela Mokra i Divljana, kao i kreirani ARCR MA modeli pokazuju da postoji sličnost u izdašnosti i vodonosnosti karstnih izdani koje se na ovim vrelima dreniraju. Može se zaključiti da ova dva vrela predstavljaju dve primarne lokacije isticanja iz jednog sliva tj. jedne karstne izdani koja se sastoji iz dva međusobno i konstantno hidrodinamički povezana (pod)sliva.

Modeli simulacije, autokorelaciona i kroskorelaciona analiza izdašnosti oba vrela, pokazuju da postoji prostor za određenu vrstu regulacije režima karstne izdani. Jedna od mogućnosti je regulacija vrela Mokra u zoni isticanja, gde bi se precrcpljivanjem vrela ili regulacijom bunarima/vodozahvatnim šahtom u zaleđu vrela npr. izvorište Lez, Monpelje ili vrelo Modro Oko, Krupac (Stevanović 2019a), u periodu niskih voda koristio deo statičkih rezervi karstnog podsliva koji se drenira na vrelu Mokra. To bi možda dovelo do obaranja nivoa i na vrelu Divljana, pa je stoga možda bolje rešenje u ovom slučaju, mogućnost kreiranja male veštačke površinske akumulacije, izgradnjom brane neposredno ispred vrela, kojom bi se povećao i nivo podzemnih voda u zaleđu vrela Mokra, ali bi se verovatno u određenoj meri povećale dinamičke rezerve vrela Divljana i stabilizovao režim podzemnih voda, s obzirom na postojeću povezanost ova dva podsliva.

Izvršena analiza izdašnosti vrela Mokra i Divljana ne može da obezbedi jednoznačan odgovor o uticaju epikarsta na režim kvantiteta karstne izdani. Međutim, može se izvesti zaključak da uticaj postoji. Uticaj je neznatno izraženiji na režim podzemne vode koja ističe na vrelu Mokra usled veće površine zone prihranjivanja na kojoj je utvrđeno postojanje epikarsta (Slika 7.34.), a istraživanja sprovedena tokom terenskog kartiranja epikarsta su potvrdila prisustvo razvijenijeg i na većini lokacija debljeg sloja epikarsta, na površini koja predstavlja zonu prihranjivanja vrela Mokra (Slika 7.37.). Dok su opiti sprovedeni u prirodnim uslovima na lokaciji pećine Peč (Poglavlje 7.7.1. i 8.3.) ovu premisu potvrdili.

7.5.4. Monitoring kvalitativnih karakteristika karstnih voda

Terenska istraživanja su obuhvatila monitoring pojava (Tabela 7.10.) na mesečnom i kvartalnom nivou, u periodu decembar 2017 – januar 2019. uz praćenje fizičko-hemijskih parametara na terenu i vršenju hemijskih analiza. Utvrđivanje osnovnih fizičko-hemijskih parametara vode izvršeno je terenski prenosivom laboratorijom CHK direktno na terenu. Na užem istražnom prostoru istraživanja su vršena na mesečnom nivou, a na pojavama koje su tokom rekognosciranja izdvojene kao značajne u podnožju Suve planine, kvartalno.

Terenska i laboratorijska merenja u okviru monitoringa podzemnih voda su obuhvatila sledeće parametre (Tabela 7.11.): temperatura, mutnoća, specifična električna provodljivost, pH vrednost, oksido-redukcioni potencijal, ukupan alkalitet, ukupna tvrdoća, rastvoreni kiseonik; koncentraciju hidrokarbonata, kalcijuma, magnezijuma, sulfata, gvožđa i mangana.

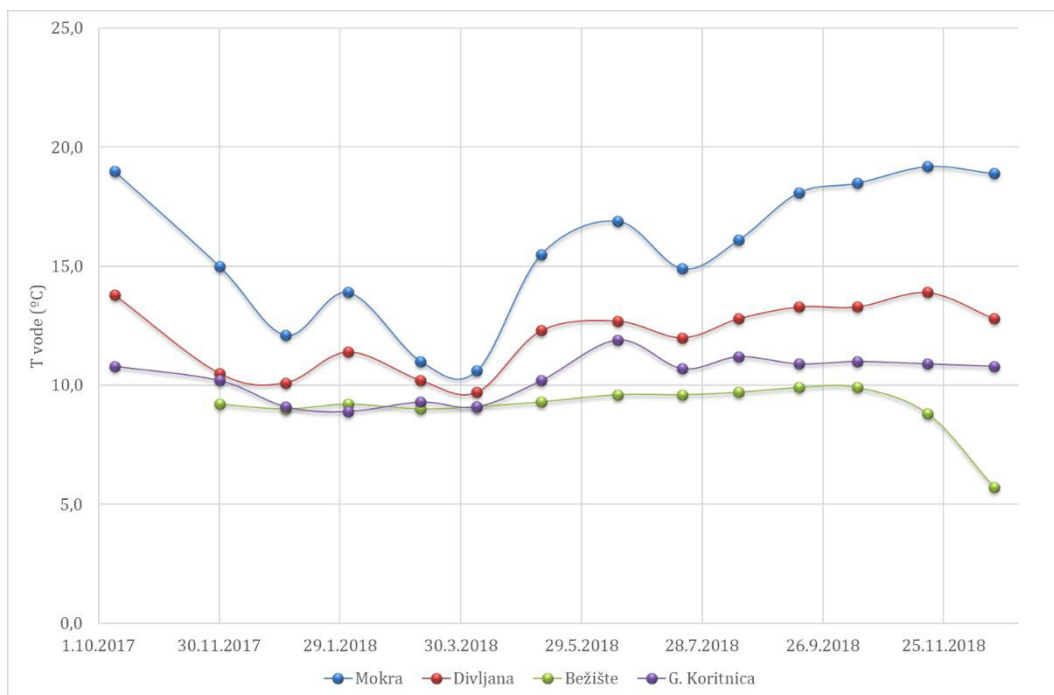
Tabela 7.10. Lokacije na kojima je vršen monitoring kvaliteta podzemnih voda i padavina

oznaka pojave	naziv izvora	x (m)	y (m)	z (m)	
1	Mokra	7604399,182	4785653,542	352	mesečni
2	Divljana	7606080,657	4782100,793	360	mesečni
3	Bežište	7608869,100	4776132,660	567	mesečni
4	Gornjekoritničko vrelo IV	7607844,242	4778610,582	457	mesečni
1k	Mokra-kišnica	7604399,182	4785653,542	352	mesečni
3k	Bežište-kišnica	7606995,59	4776626,38	885	mesečni
PP	Pećina Peč – prokapna voda	7606995,59	4776626,38	885	
O	Ostrovica	7590292,340	4798287,540	230	kvartalni
BV	Bojanine vode	7590495,19	4786910,89	875	kvartalni
K	Koritnik	7582110,53	4793449,51	636	kvartalni
GD	Gornji Dušnik	7590977,730	4781665,540	511	kvartalni
SI	Sopotnica I	7592799,890	4780414,270	572	kvartalni
SII	Sopotnica II (OŠ)	7592634,580	4780442,890	557	kvartalni
L	Lazinje	7595568,62	4779912,08	856	kvartalni
I	Izvor	7612993,750	4771023,360	578	kvartalni
Lj	Ljuberađa	7613240,380	4766035,890	473	kvartalni
RC	Rakoš česma	7603902,940	4779040,050	1283	kvartalni

Tabela 7.11. Ekstremne vrednosti parametara zabeležene tokom monitoringa na karstnim vrelima: Mokra, Divljana, Bežište, Gornja Koritnica, uperiodu decembar 2017- januar 2019. godine

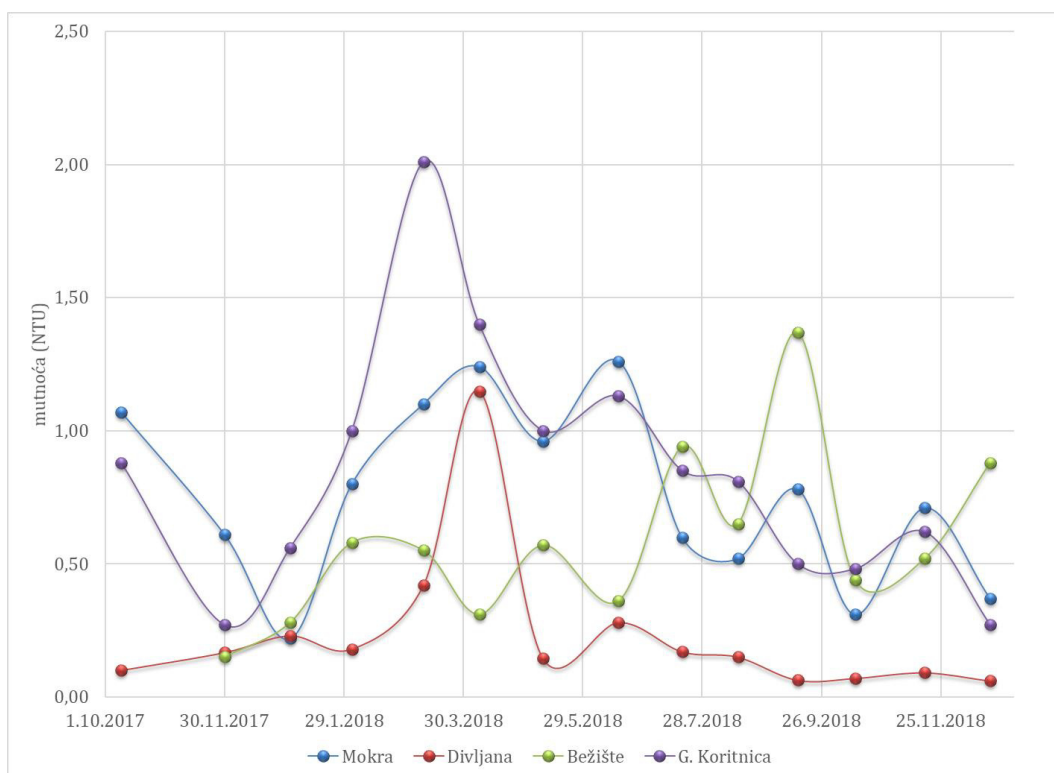
Lokacija	Datum	T	mut	pH	Ec	O ₂	Eh	HCO ₃	Ca	Mg	Alc	Fe	Mn	SO ₄	Ukupna tvrdoća
		°C	NTU		(µS/cm)	(mg/l)	(mV)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(ppm)	total	(mg/l)	(mg/l)	(°dH)
Mokra	maksimum	19,20	1,26	7,64	489,00	7,39	255,10	320,33	114,24	33,00	263,00	0,71	0,37	11,50	16,10
	minimum	10,60	0,22	7,19	434,00	0,43	189,80	85,42	38,10	4,50	72,00	0,09	0,20	9,50	6,40
	sr. vrednost	15,69	0,75	7,34	459,14	4,19	221,98	251,44	68,11	18,58	192,42	0,27	0,30	10,73	13,25
Divljana	maksimum	13,90	1,15	7,65	476,00	6,72	262,60	311,18	117,38	51,60	243,00	1,07	0,40	7,00	15,50
	minimum	9,70	0,06	7,25	439,00	1,35	150,00	173,90	24,70	9,40	130,00	0,02	0,07	<5,00	12,70
	sr. vrednost	12,06	0,23	7,46	451,00	4,35	210,50	269,49	67,83	20,57	190,25	0,24	0,23	N/A	13,77
Bežište	maksimum	9,90	1,37	7,48	606,00	10,93	268,00	387,45	163,52	24,20	271,00	0,24	0,38	11,40	19,00
	minimum	5,70	0,15	7,10	501,00	3,64	153,30	143,39	80,40	3,45	109,00	0,01	0,16	7,60	14,00
	sr. vrednost	9,08	0,58	7,24	564,92	5,43	214,64	310,27	103,49	14,30	189,92	0,10	0,28	9,50	17,33
G. Koritnica	maksimum	11,90	2,01	7,55	526,00	5,56	282,80	359,99	120,96	33,70	291,00	0,34	0,35	12,20	17,30
	minimum	8,90	0,27	7,22	479,00	1,10	160,80	244,06	39,70	10,00	163,00	0,02	0,18	9,00	8,50
	sr. vrednost	10,36	0,84	7,34	501,07	4,24	226,41	300,05	71,76	20,74	213,00	0,14	0,26	10,60	14,46
	maksimum	19,20	2,01	7,65	606,00	10,93	282,80	387,45	163,52	51,60	291,00	1,07	0,40	12,20	19,00
	minimum	5,70	0,06	7,10	434,00	0,43	150,00	85,42	24,70	3,45	72,00	0,01	0,07	<5,00	6,40
	sr. vrednost	11,42	0,74	7,37	493,84	4,61	216,33	263,08	84,18	20,34	193,97	0,27	0,26	9,90	14,03

Temperatura podzemne vode koja je zabeležena, u karstnim vrelima koja dreniraju istočne padine Suve planine, kreće se u velikom rasponu vrednosti. Srednja vrednost temperature vode, ako uzmemo u obzir sve pojave koje su osmatrane, je 11,4°C (Tabela 7.11. i Slika 7.52.). Najniža temperatura od 5,7°C izmerena je na vrelu Bežište, dok je maksimum od 19,2°C izmeren na vrelu Mokra. Kao što je i očekivano u proseku je najhladnija podzemna voda koja ističe na hipsometrijski najvišem vrelu Bežište. Najtoplija voda ističe na vrelima Divljana ($T_{sr}=12,06$) i Mokra ($T_{sr}=15,69$), temperatura podzemne vode je viša od višegodišnjeg proseka temperatura vazduha, koje su zabeležene na klimatološkoj stanici Bela Palanka, što ukazuje na duži boravak vode u podzemlju i manji uticaj klime (vremenskih prilika) na temperaturu vode, kao i na potencijalni uticaj pokrivke gornjeoligocenski sedimenata koja se postoji u zoni isticanja vrela. Povišenu temperaturu vode vrela Mokra od 16°C, zabeležio je i Stevanović (1991) i svrstao je u grupu „subtermalnih voda“.



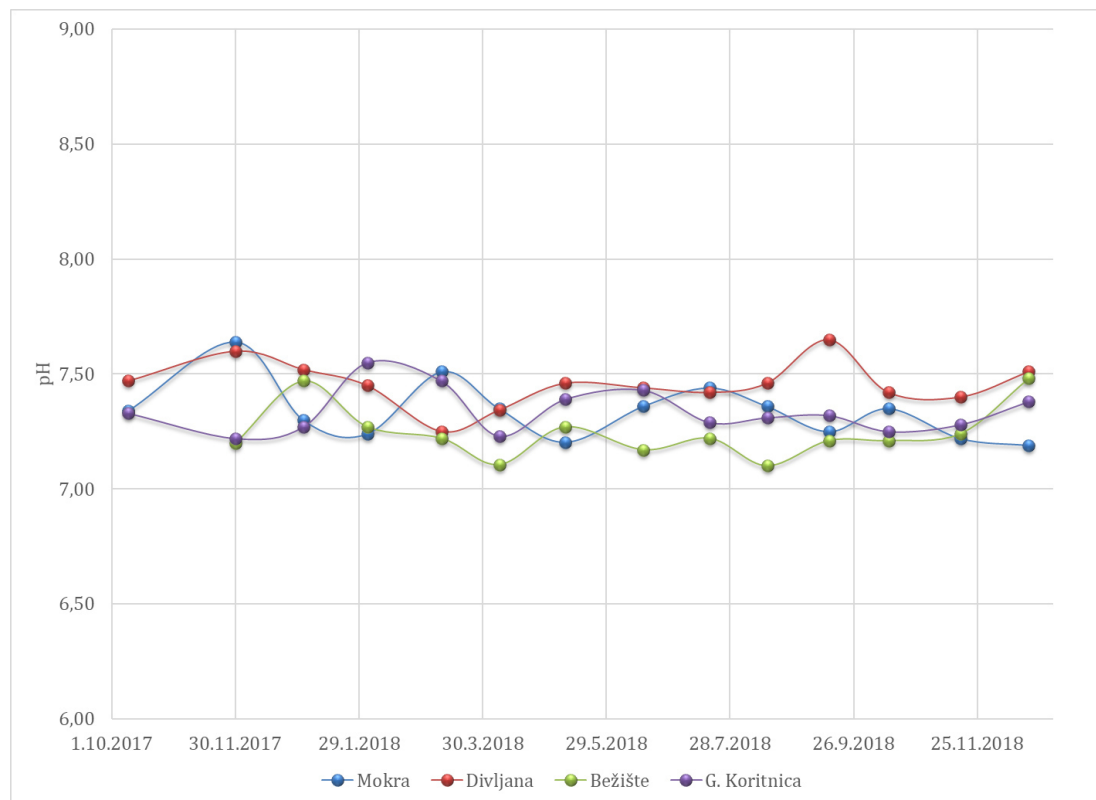
Slika 7.52. Temperatura podzemne vode na karstnim vrelima

Iako znamo da mutnoća može da značajno varira u podzemnoj vodi karstnih izvora i vrela, vrednosti koje su merene tokom mesečnog monitoringa pokazuju razlike od 0,06 NTU (Divljana) do 2,01 NTU (Gornja Koritnica) (Slika 7.53.). Međutim, vrednosti veće od 1 NTU (MDK u vodi za piće) zabeležene su na svim vrelima koja su posmatrana. Na vrelu Bežište na samom kraju leta, a na ostalim vrelima mutnoća je bila uvećana tokom prolećnog perioda. Najveće oscilacije su zabeležene na vrelu Gornja Koritnica, što nije iznenađenje ako se u obzir uzme lokacija i način isticanja, kao i mešanje podzemnih i površinskih voda u zoni isticanja vrela. Iako merenjima nisu zabeležene, postoje informacije o visokim vrednostima mutnoće na vrelu Bežište i Gornja Koritnica, koje su trajale i desetak dana.



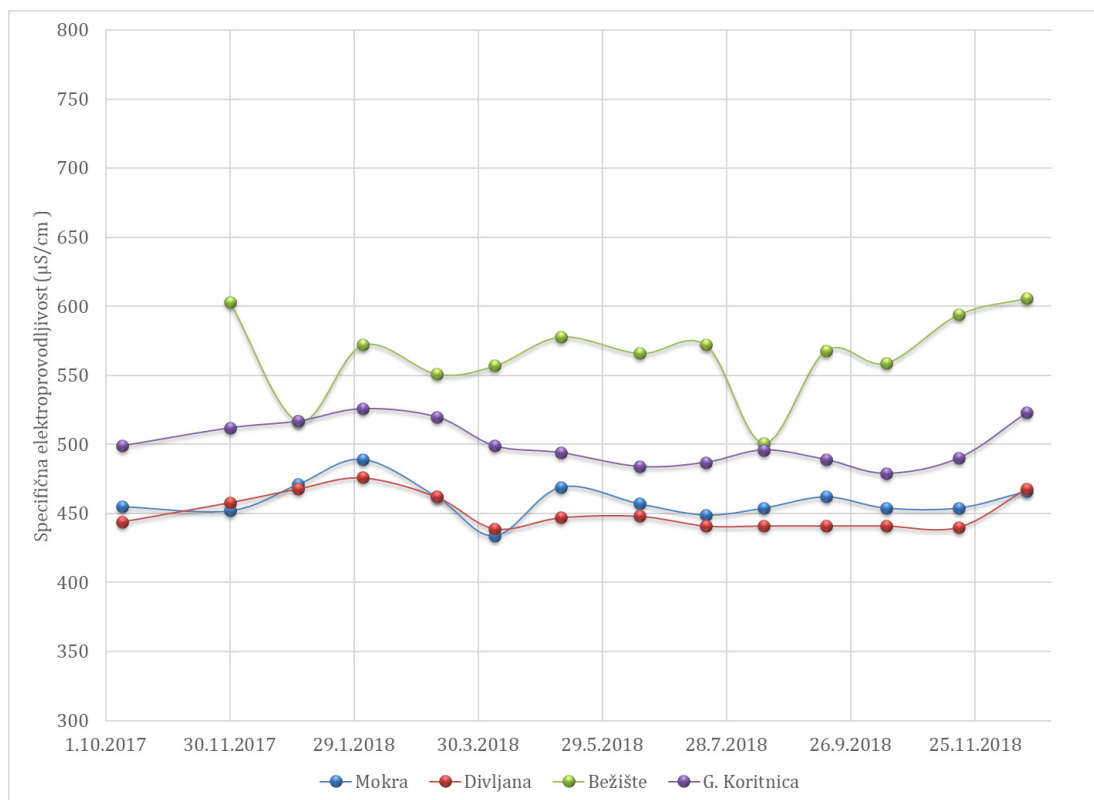
Slika 7.53. Mutnoća podzemne vode na karstnim vrelima

Vrednost pH indeksa je jedan od stabilnijih parametara u podzemnoj vodi karstne izdani istočnih padina Suve planine (Slika 7.54.), varijacija je samo 5% oko srednje vrednosti od 7,37. Najviša vrednost bila je izmerena na vrelu Divljana na kraju leta 2019. godine pH =7,65, a najniža vrednost pH=7,10 je zabeležena na vrelu Bežište, gde je inače i najniži prosek vrednosti pH. Niže pH vrednosti mogu ukazati na kratak boravak podzemne vode u karstnoj izdani, jer nije bilo dovoljno vremena za alkalizaciju infiltrirane kišnice, ali indikuju i uticaj sloja epikarsta koji je detektovan na površini koja predstavlja oblast prihranjivanja vrela Bežište.



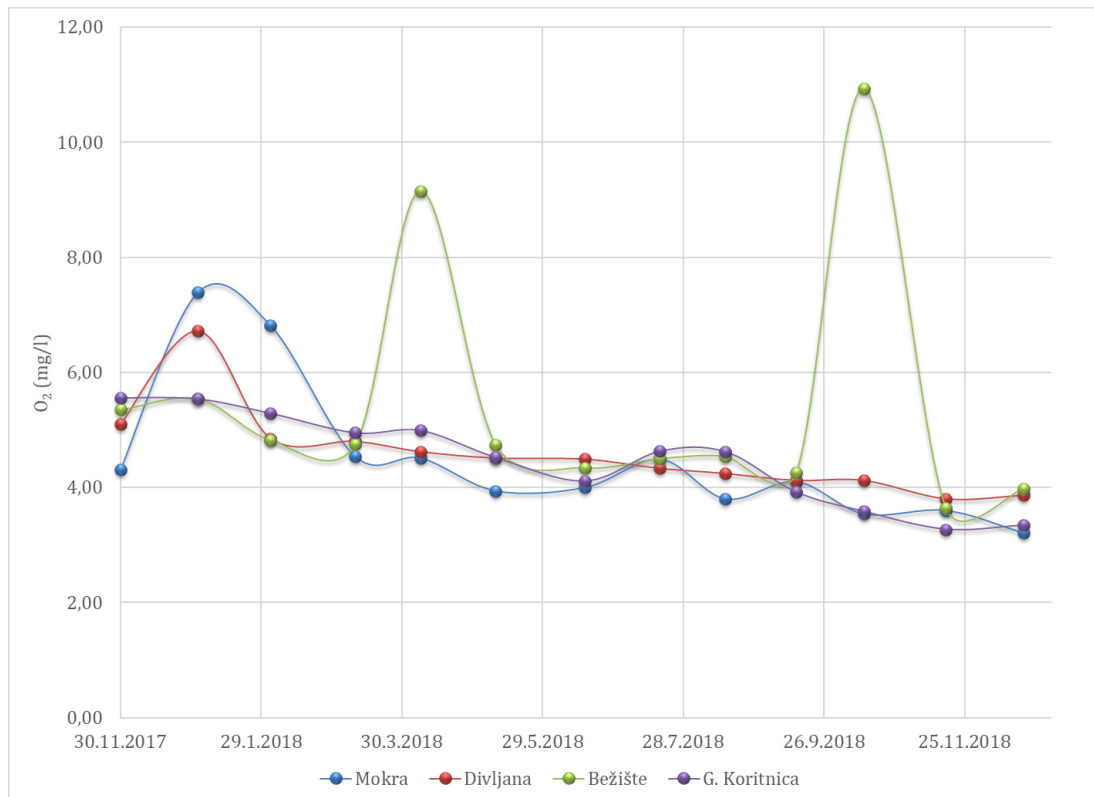
Slika 7.54. pH vrednosti podzemne vode na karstnim vrelima

Srednja vrednost specifične električne provodljivosti, svih vrela, iznosi 494 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dok je maksimum zabeležen na vrelu Bežište iznosio 606 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a minimum na vrelu Mokra 434 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabela 7.11. i Slika 7.55.). Ujednačene vrednosti koje su beležene na vrelima Mokra i Divljana, ukazuju na cirkulaciju podzemnih voda kroz karstne kanale koji dublje zaležu, i na koje zemljište i epikarst više nemaju uticaj. Dok su najveće varijacije zabeležene na vrelu Bežište, na koje verovatno utiču dinamične promene vremenskih prilika tokom godine, kao i prisustvo epikarsta koje podzemnu vodu obogaćuje mineralnim materijama kojih inače nema u krečnjačkim stenama (minerali glina i gvožđe iz zemljišta), a kojih ima i zemljištu i u sloju epikarsta.



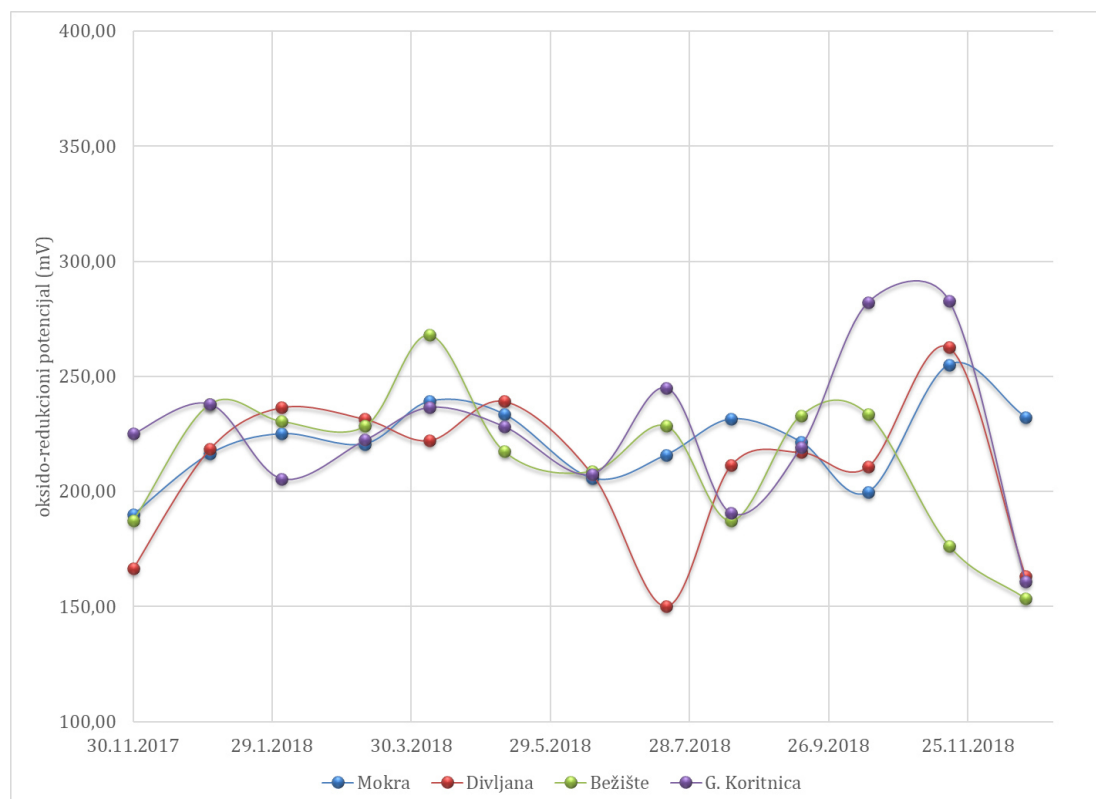
Slika 7.55. Specifična električna provodljivost podzemne vode na karstnim vrelima

Rastvoreni kiseonik ima vrednosti od 0,43 do 10,93 mg/l (Slika 7.56.) i ima trend opadanja na svim vrelima, a najveće varijacije su opet zabeležene na vrelu Bežište.



Slika 7.56. Koncentracija rastvorenog kiseonika u podzemnoj vodi na karstnim vrelima

Oksido-redukциони potencijal se kreće u rasponu vrednosti od 150,0-282,8 mV (Slika 7.57.). Najveću vrednost standardne devijacije pokazuju vrednosti izmerene na vrelu Gornja Koritnica i Divljana, dok je standardna devijacija vrednosti oksido-redukcionog potencijala najmanja u podzemnoj vodi vrela Mokra, ukazujući na najstabilnije uslove formiranja kvaliteta.



Slika 7.57. Vrednosti oksido-redukcionog potencijala u podzemnoj vodi na karstnim vrelima

Koncentracije jona HCO_3^- , Ca^{2+} i Mg^{2+} (Tabela 7.11.), kao najvažnijih parametara u podzemnoj vodi poreklom iz karstne izdani (Slike 7.58.-7.60.), su takođe, analizirane na mesečnom nivou.

Bikarbonati jon (Slika 7.58.) je zastupljen u koncentracijama od 85,42 do 387,45 mg/l, dok je srednja vrednost 283 mg/l. Najveću vrednost standardne devijacije pokazuju vrednosti izmerene na vrelu Bežište, što ponovo dokazuje veliku otvorenost zone prihranjivanja ovog vrela i mešanje podzemne vode iz epikarsta i karstne izdani. U proseku koncentracija bikarbonata najmanje odstupa od aritmetičke sredine u podzemnoj vodi vrela Gornja Koritnica. Može se uočiti pad koncentracije bikarbonata u seriji uzoraka koji su prikupljeni i analizirani u maju 2018. godine, o čemu će više reći biti kasnije.

Jon kalcijuma je zastupljeniji od magnezijuma u svim uzorcima koji su analizirani, osim u jednom uzorku sa vrela Divljana, od 2.2.2018. godine, kada je koncentracija magnezijuma bila 2 puta viša (Slika 7.59.). Koncentracije kalcijuma rastu na svim pojavama sredinom jeseni (13. oktobar 2018. godine). U podzemnoj vodi koncentracije kalcijuma su bile od 24,70 mg/l (Divljana) do 163,52 (Bežište), sa srednjom vrednošću od 84,18 mg/l. Najmanju disperziju, oko prosečne vrednosti, imaju koncentracije kalcijuma u vodi iz vrela Mokra, što još jednom potvrđuje stabilne uslove formiranja kvaliteta podzemne vode u ovom delu karstne izdani. Treba istaći i da su koncentracije kalcijuma blago povišene na vrelu Gornja Koritnica u odnosu na vrela Mokra i Divljana, jer se najveći deo voda koje prihranjuju ovo vrelo filtrira kroz titonske krečnjake, koji sadrže najveći procenat kalcijuma (98%). Međutim u poređenju sa ostala tri vrela, više vrednosti kalcijuma izmerene su na vrelu Bežište i ne mogu se jednostavno objasniti.

Verovatno je ova razlika posledica pojačanog rastvaranja kalcita iz krečnjaka u otvorenoj epikarstnoj izdani, kojom se delimično prihranjuje izdan koja se drenira na vrelu u Bežištu.

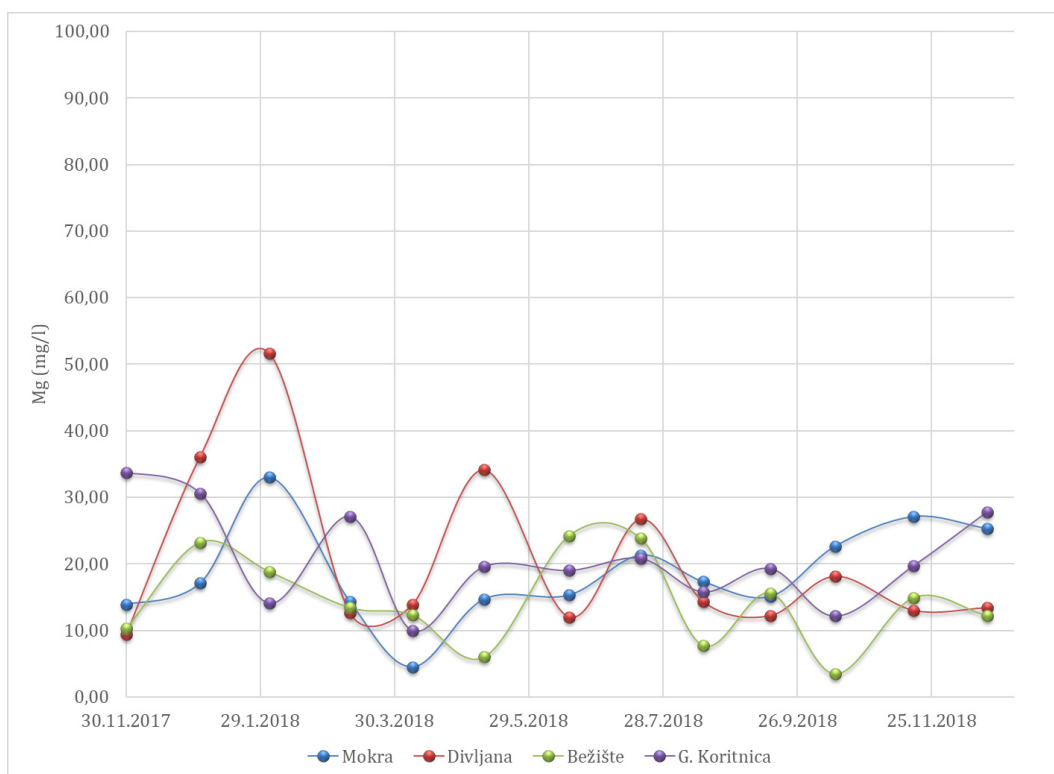


Slika 7.58. Koncentracija bikarbonata u podzemnoj vodi na karstnim vrelima



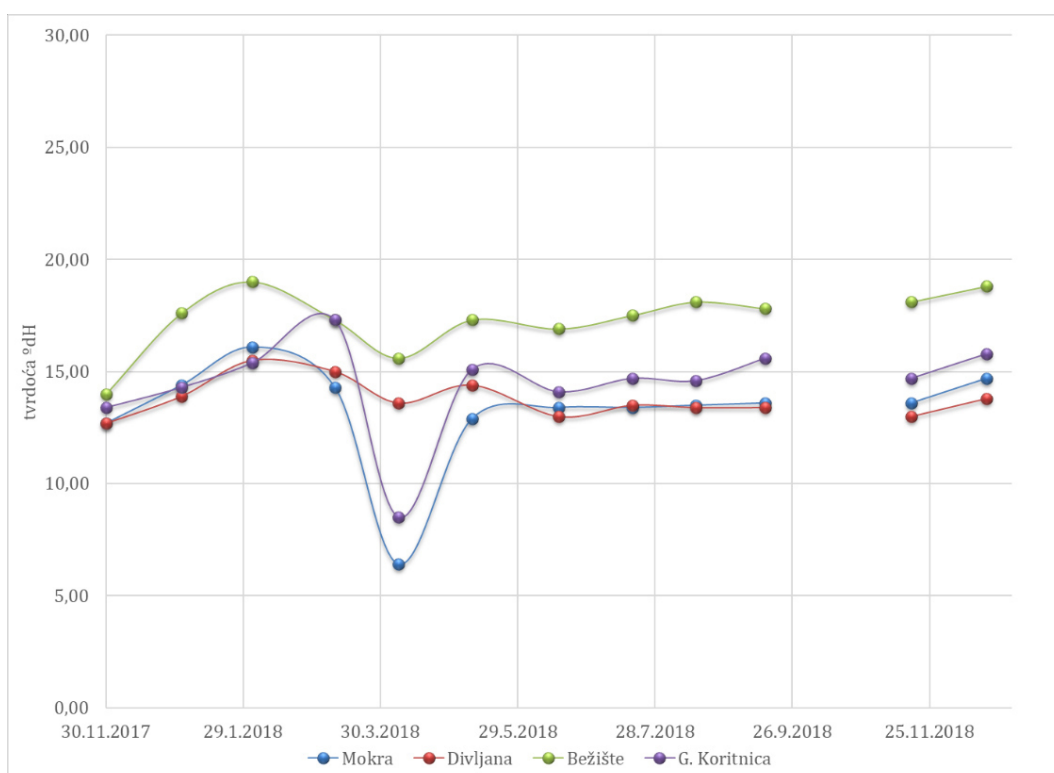
Slika 7.59. Koncentracija kalcijuma u podzemnoj vodi na karstnim vrelima

Magnezijum je detektovan u granicama od 4,50 mg/l (Mokra) do 51,60 mg/l (Divljana), dok je srednja vrednost 20,34 mg/l (Slika 7.60.). Najveću disperziju, oko prosečne vrednosti, imaju koncentracije magnezijuma u vodi iz vrela Divljana.



Slika 7.60. Koncentracija magnezijuma u podzemnoj vodi na karstnim vrelima

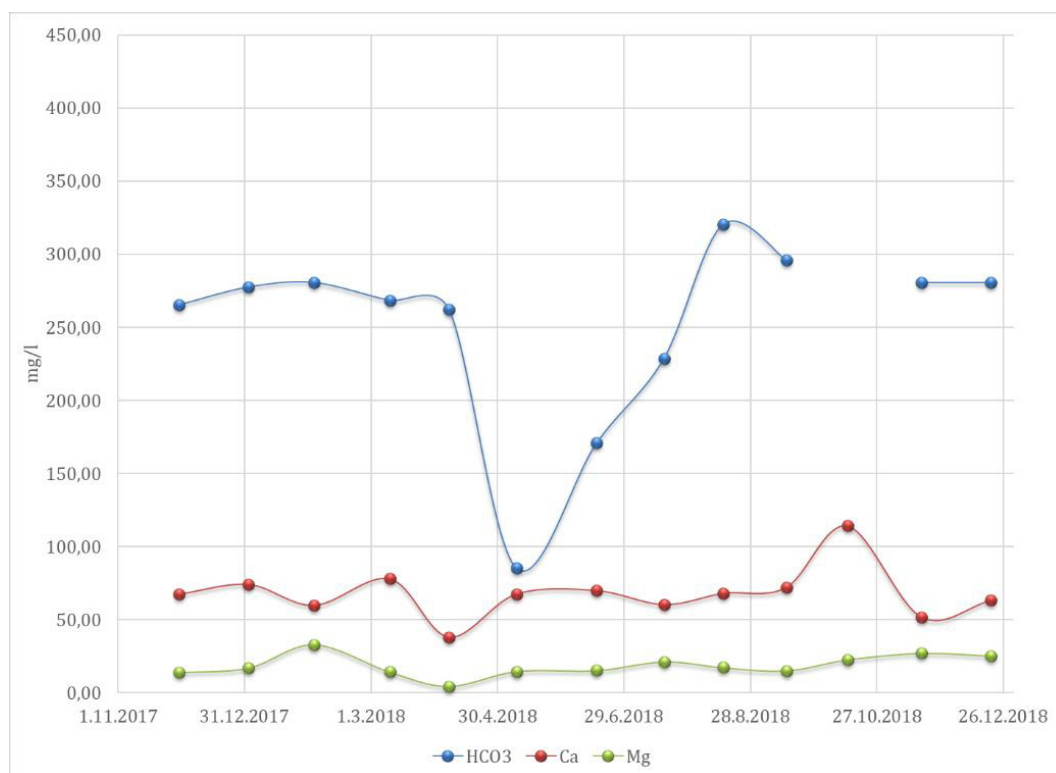
Ukupna tvrdoća se kretala u rasponu od 6,4 do 19 °dH (Slika 7.61.). U skladu sa konstatacijom da je koncentracija kalcijuma uvek viša u podzemnoj vodi sa vrela Bežište stoji i podatak da je i tvrdoća uvek najviša u podzemnoj vodi sa ove pojave.



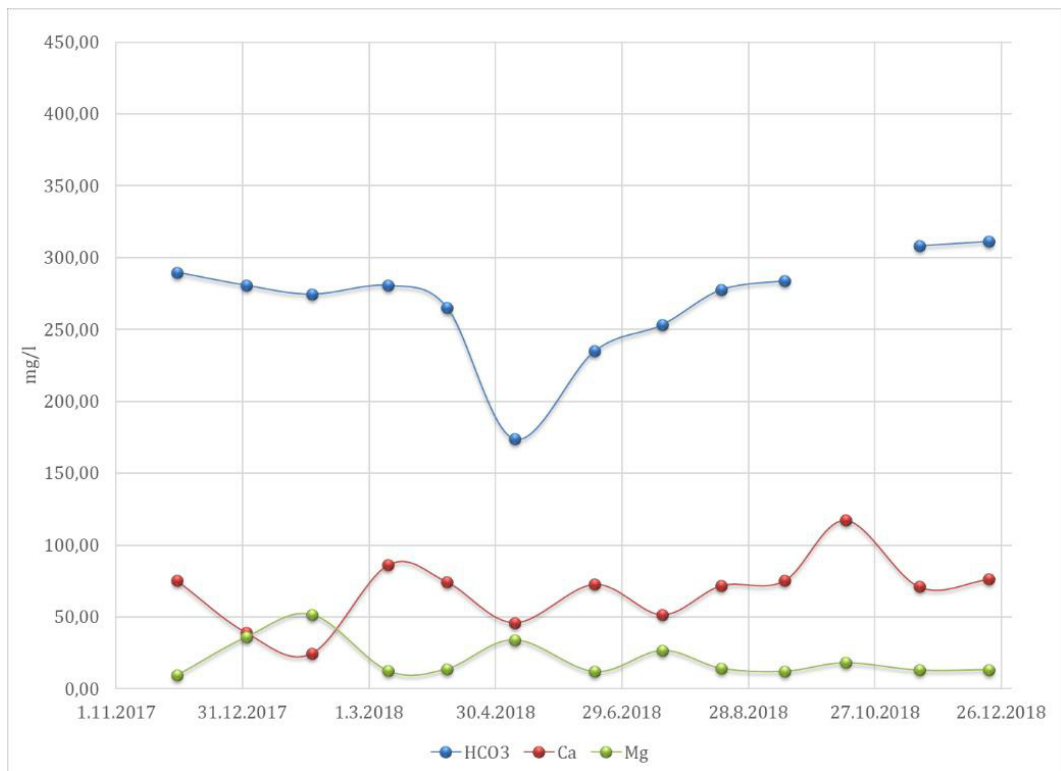
Slika 7.61. Ukupna tvrdoća u podzemnoj vodi na karstnim vrelima

Koncentracije gvožđa i mangana, koji su takođe analizirani za vreme hidrogeoloških istraživanja, su niske i ne prelaze MDK za vode za piće, a da su koncentracije u rasponima od 0,01-1,07 mg/l (gvožđe) tj. 0,07-0,40 mg/l (mangan). Sulfatni jon nije detektovan u dva uzorka sa vrela Divljana (granica detekcije uređaja je 5,00 mg/l), a najveća vrednost je zabeležena na vrelu Bežište 12,20 mg/l.

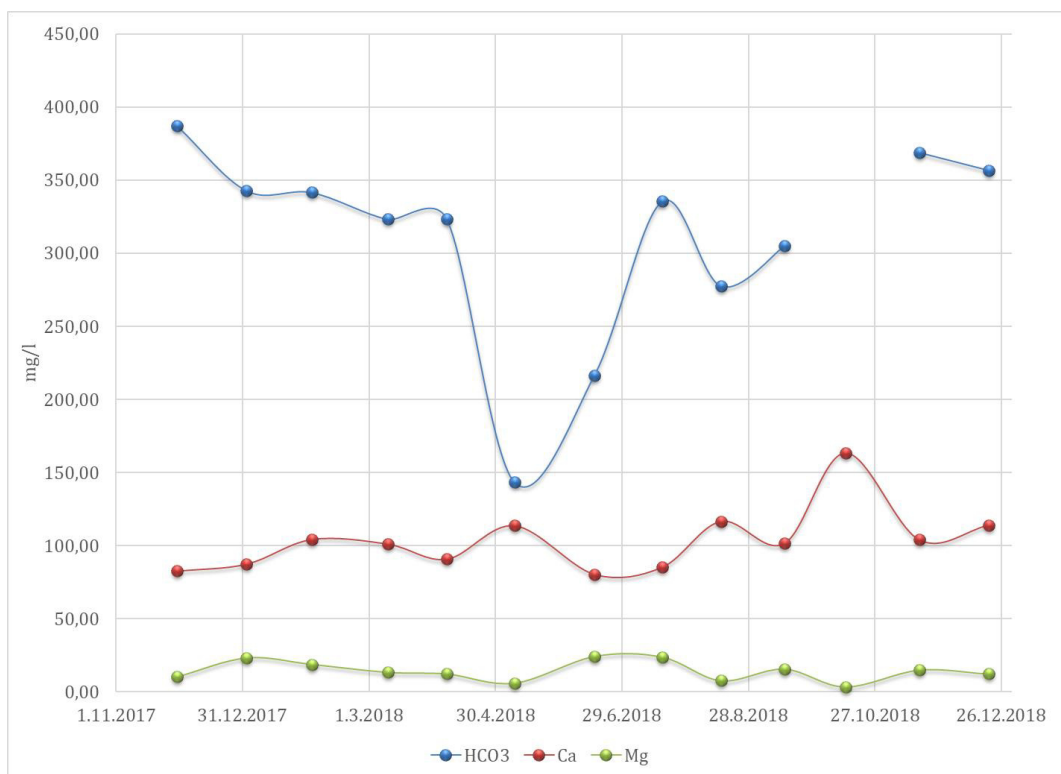
Ukoliko koncentracije kalcijuma, magnezijuma i bikarbonata (Slike 7.62.-7.65.) posmatramo na svakom vrelu posebno, možemo uspostaviti određene odnose između parametara. Jon kalcijuma je zastupljeniji od magnezijuma u svim uzorcima i na svim pojavama, osim u uzorku iz vrela Divljana od 2.2.2018. godine (Slika 7.63.), kada je koncentracija magnezijum jona bila veća. Takođe, možemo uočiti da se na vrelu Divljana koncentracije magnezijuma i kalcijuma još tri puta približavaju jedna drugoj (2.1.2018., 9.5.2018. i 18.7.2018. godine). Smanjivanje koncentracije kalcijuma u odnosu na povećanje koncentracije magnezijuma (Slika 7.62.) uočeno je i kod vrela Mokra (2.2.2018. i 17.11.2018. godine), dok na vrelu Bežište promene nisu toliko uočljive ali postoje (16.6.2018., 18.7.2018., 14.9.2018. i 17.11.2018. godine). Na vrelu Gornja Koritnica ova „pojava“ uočena je 10.3.2018. i 17.11.2018. godine.



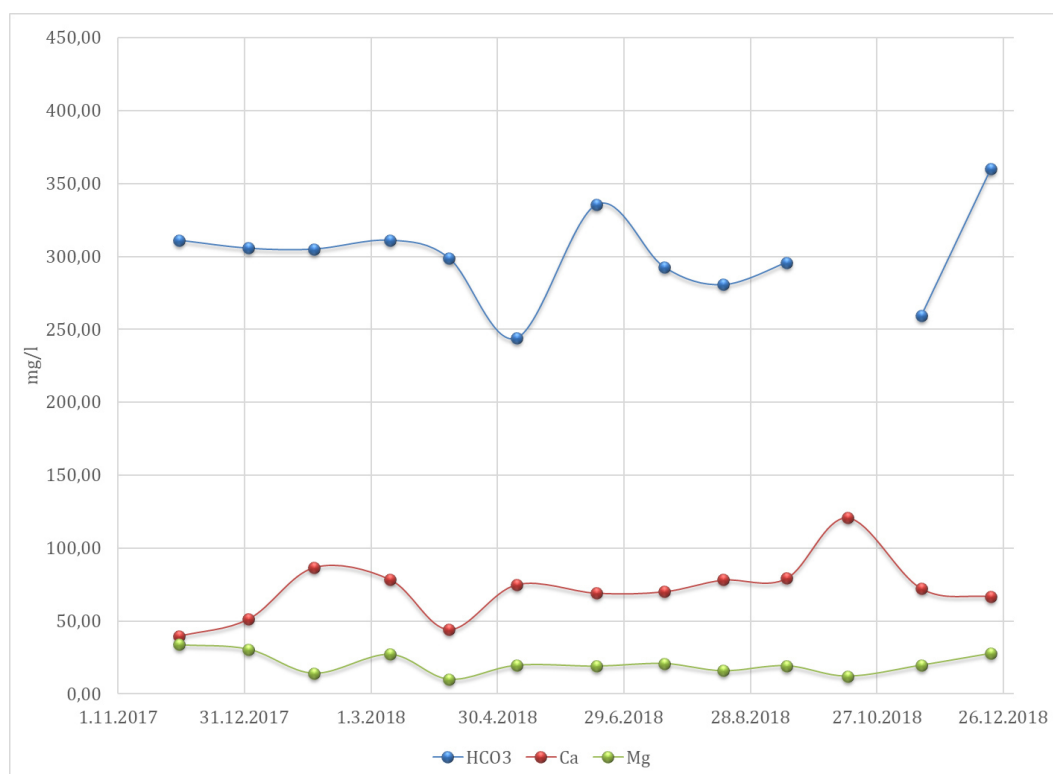
Slika 7.62. Uporedni dijagram koncentracija bikarbonata, kalcijuma i magnezijuma na vrelu Mokra



Slika 7.63. Uporedni dijagram koncentracija bikarbonata, kalcijuma i magnezijuma na vrelu Divljana



Slika 7.64. Uporedni dijagram koncentracija bikarbonata, kalcijuma i magnezijuma na vrelu Bežište

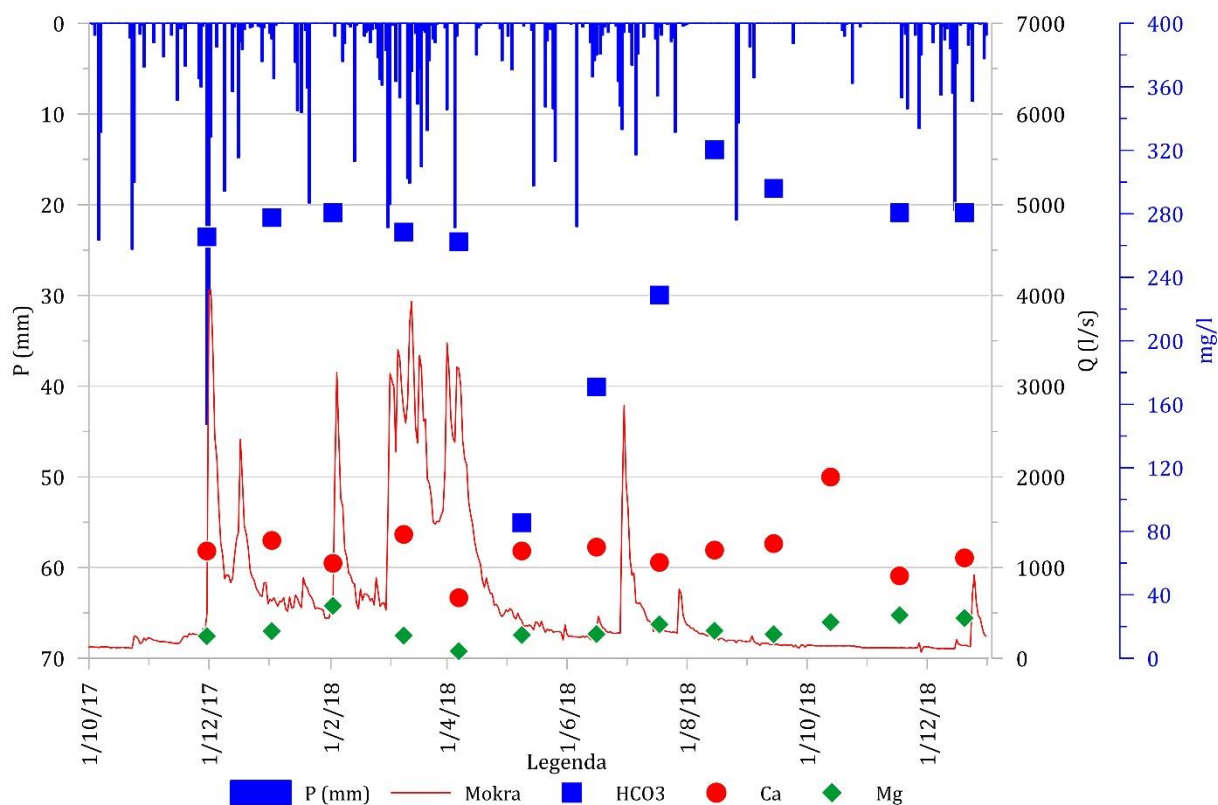


Slika 7.65. Upporedni dijagram koncentracija bikarbonata, kalcijuma i magnezijuma na vrelu G. Koritnica

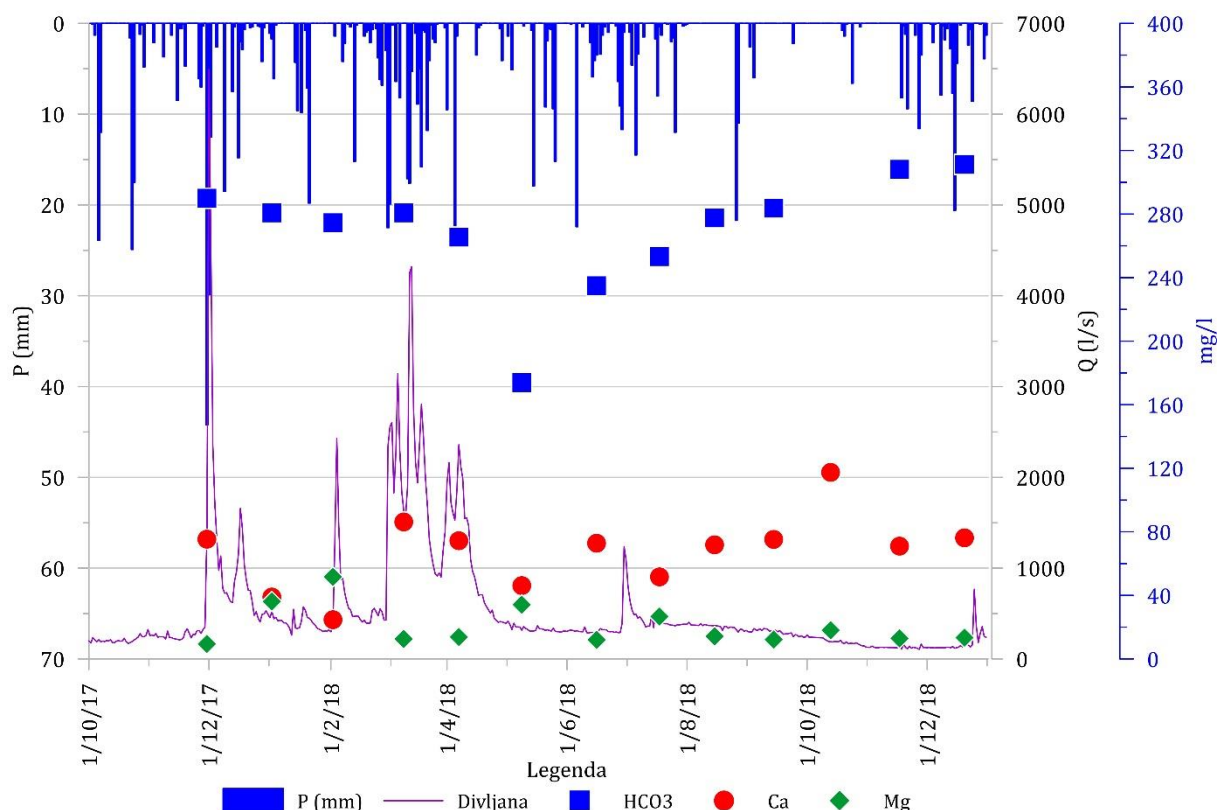
Ukoliko uporedimo koncentracije kalcijuma, magnezijuma i bikarbonata sa izdašnostima vrela Mokra i Divljana, tj. količinama izlučenih padavina možemo donekle da objasnimo promene koncentracija ovih parametara u podzemnoj vodi. U uzorku podzemne vode od 2.2.2018. godine na oba vrela se može uočiti manja koncentracija kalcijuma u odnosu na uzorke iz januara tj. marta. Pad koncentracije kalcijuma uz istovremeno povećanje koncentracije magnezijuma je nastupio u momentu naglog povećanja proticaja na oba vrela, gde su povećanja izdašnosti bila šest tj. sedam puta. Povećanje izdašnosti na vrelu Mokra je sa 530 l/s (2.2.2018. godine) na 3150 l/s (4.2.2018. godine), dok je na vrelu Divljana povećanje bilo sa 350 l/s na 2430 l/s. Ovo opadanje koncentracije kalcijuma 2.2.2018. godine moglo je da posluži kao odličan indikator nailaska poplavnog talasa koji je nastupio već sledećeg dana. Na vrelu Divljana je promena još uočljivija jer je koncentracija magnezijuma u tom trenutku prevazišla koncentraciju kalcijuma. Nailazak poplavnog talasa je verovatno nastupio usled pojačanog topljenja snega usled porasta maksimalne dnevne temperature za skoro 8°C tokom 3 sunčana dana.

Visoke koncentracije bikarbonata u zimskom i prolećnom periodu se poklapaju sa većim vrednostima proticaja na vrelu Mokra (Slika 7.66.), međutim možemo videti da je najveća koncentracija bikarbonata zabeležena upravo u toku recesije. Više koncentracije kalcijuma, takođe, su povezane sa periodima manjih proticaja tj. recesije. Sa druge strane koncentracije Mg su obrnuto proporcionalne veličini proticaja. Sličnu promenu koncentracija kalcijuma i magnezijuma u zavisnosti od količina vode koje ističu, kod vrela Mokra uočio je i *Stevanović* (1991).

U slučaju vrela Divljana koncentracija bikarbonata je u zimskom i prolećnom periodu stabilnija i ne zavisi mnogo od izdašnosti (Slika 7.67.), međutim sa opadanjem izdašnosti krajem aprila, opada i koncentracija HCO₃⁻, a onda kako počinje leto i počne recesioni period vrela Divljana, koncentracija bikarbonata raste.



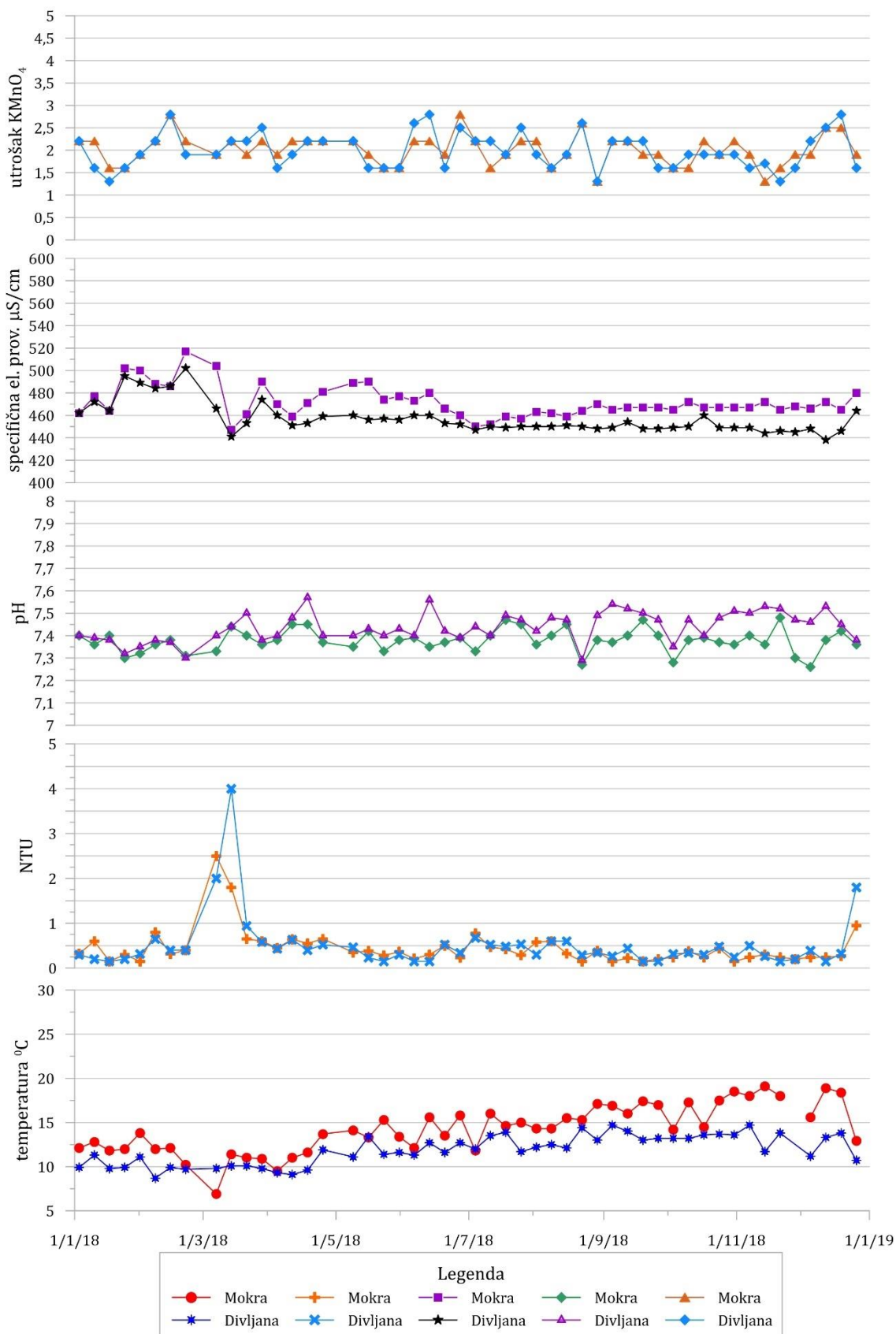
Slika 7.66. Uporedni dijagram padavina, isticanja vrela Mokra i koncentracija Ca^{2+} , Mg^{2+} i HCO_3^-



Slika 7.67. Uporedni dijagram padavina, isticanja vrela Divljana i koncentracija Ca^{2+} , Mg^{2+} i HCO_3^-

Prema sedmodnevnim analizama kvaliteta, koje vrši JKP „Naissus“, na podzemnoj vodi vrela Mokra i Divljana), koji su bili na raspolaganju i za 2018. godinu (Slika 7.68.) temperatura podzemne vode vrela Mokra, se kretala od 6,9 do 19,1°C, dok je na vrelu Divljana taj parametar bio u rasponu od 8,7 do 14,7 °C. U pogledu mutnoće vrednosti na vrelu Mokra su se kretale do

2,5 NTU, a na vrelu Divljana do 4 NTU. Vidimo da je mutnoća prevazišla MDK za vodu za piće u 3 uzorka sa vrela Divljana, od čega su 2 uzeta u martu, a jedan u decembru, dok je na vrelu Mokra mutnoća bila povišena samo u 2 uzorka iz marta.



Slika 7.68. Izmene fizičko-hemijskih parametara podzemne vode na vrelima Mokra i Divljana 2018. godine (JKP „Naissus“)

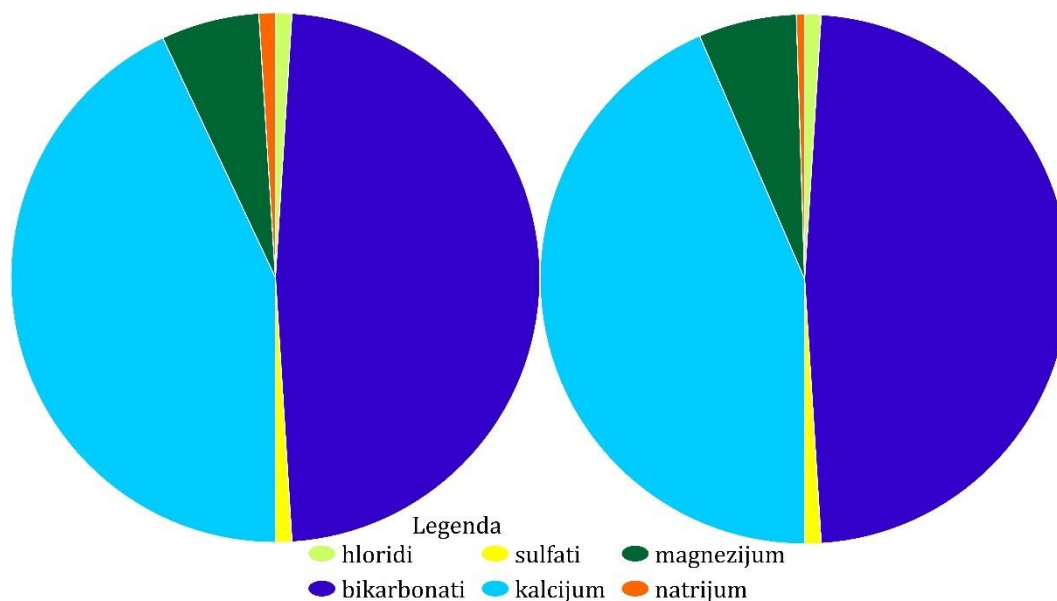
Vrednost pH se kretala od 7,26 do 7,48 na vrelu Mokra i od 7,29 do 7,57 na vrelu Divljana. Vidimo da su vrednosti izuzetno ujednačene, što još jednom potvrđuje postojanje dobro razvijene mreže karstnih kanala, koji zaležu dublje, nego u slučaju vrela Gornja Koritnica i Bežište. A više vrednosti pH u vodi vrela Mokra indikuju duži kontakt vode i krečnjaka, u odnosu na vodu koja ističe na vrelu Divljana.

Specifična električna provodljivost je varirala od 447 do 517 $\mu\text{S}/\text{cm}$ u podzemnoj vodi vrela Mokra i od 438 do 502 $\mu\text{S}/\text{cm}$ u podzemnoj vodi vrela Divljana. Povećanje izdašnosti koje je nastupilo, na početku meseca marta usled obilnih padavina koje su trajale desetak dana, izazvalo je obaranje specifične električne provodljivosti, kao i gore pomenuto povećanje mutnoće na oba vrela. Izdašnost je u periodu od 3. marta do 21. marta, na oba vrela, dostigla svoj maksimum za 2018. godinu. Ova promena izdašnosti je, takođe, uslovlila i obaranje temperature podzemne vode na vrelu Mokra, što samo pokazuje da je intenzitet padavina izlučenih u okviru zone prihranjivanja ova dva vrela bio zaista značajan. Vrednosti temperature vode imaju trend porasta tokom 2018. godine.

Ostatak isparenja na 105°C je kod vrela Mokra bio u opsegu od 266 do 587 mg/l, dok je kod vrela Divljana opseg bio od 256 do 316 mg/l. Utrošak kalijum permanganata je imao male vrednosti, i u podzemnoj vodi oba vrela ima isti raspon vrednosti 1,3-2,8 mg/l.

Nitrati su takođe, detektovani u malim koncentracijama, u podzemnoj vodi vrela Mokra od 1,8 do 4,1 mg/l, a u podzemnoj vodi vrela Divljana od 1,3 do 2,8 mg/l. Nitriti, amonijak i hloridi su bili ispod granice detekcije metode koja je korišćena: $\text{NO}_2^- < 0,005 \text{ mg/l}$, $\text{NH}_3 < 0,04 \text{ mg/l}$ i $\text{Cl}^- < 5 \text{ mg/l}$.

Podzemna voda vrela Mokra i Divljana, prema klasifikaciji Alekina pripada malomineralizovanim vodama hidrokarbonatnoj klasi, kalcijumskoj grupi, II (drugom) tipu ($\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} < \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$) (Slika 7.69.). Tvrdoća vode se kretala od 14,12 do 15,16°dH. Može se i na osnovu ovih podataka zaključiti da su podzemne vode na ova dva vrela praktično istog hemizma i deo jedinstvenog sistema tj. dva blisko povezana podsistem.



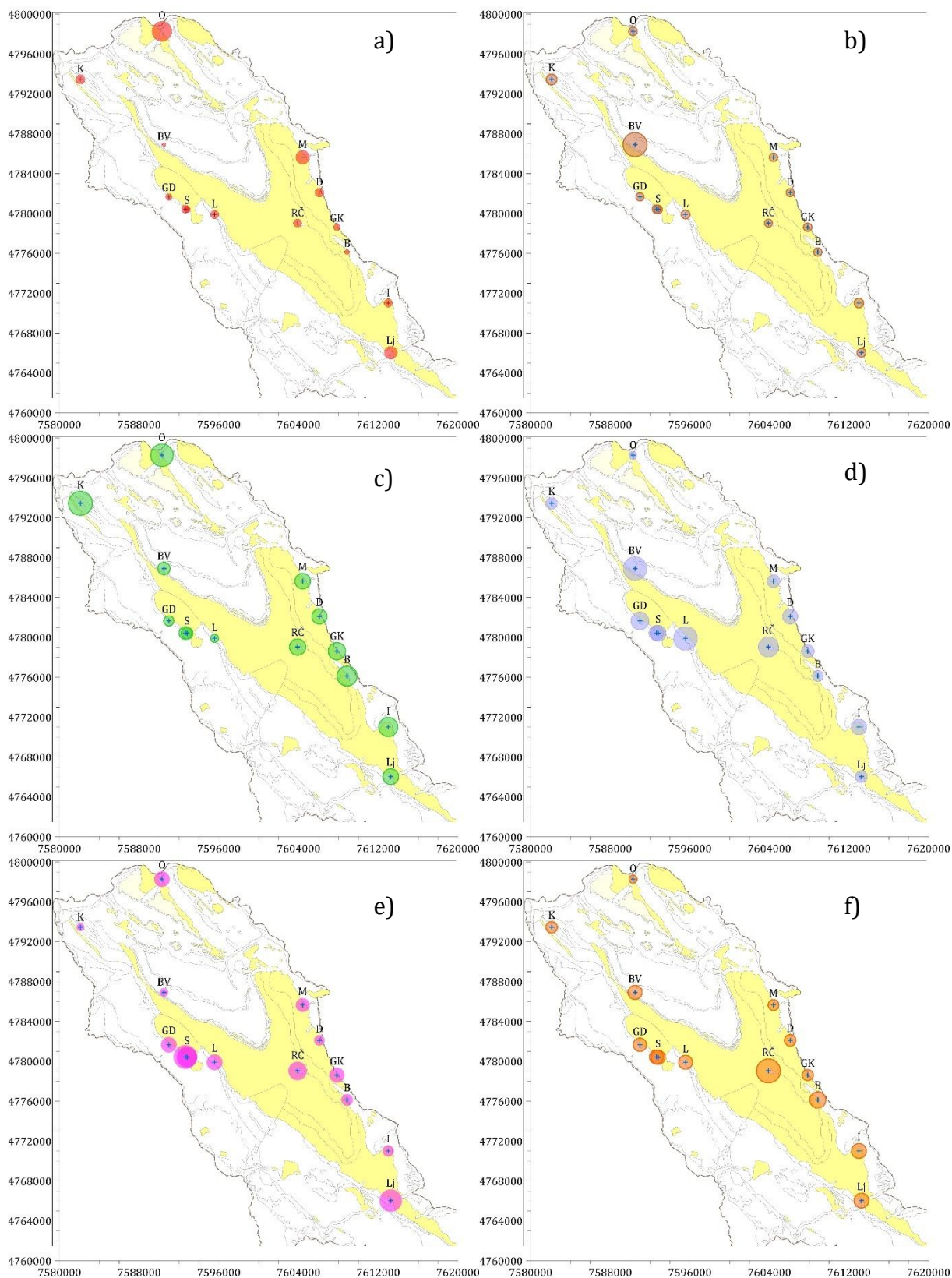
Slika 7.69 Kružni dijagram hemijskog sastava međusobnog odnosa anjona i katjona (u %ekv) podzemnih voda Mokre (levo) i Divljane (desno), na osnovu analiza JKP „Naissus“

Osim mesečnog osmatranja i prikupljanja uzoraka u osnovnoj monitoring mreži u okviru užeg područja istraživanja, vršen je i kvartalni monitoring (merenja fizičko-hemijskih parametara na terenu i skraćene hemijske laboratorijske analize) na svim značajnijim hidrogeološkim pojavama Suve planine (Tabela 7.12. i Slike 7.70.-7.72.): **O - Ostrovica (Banjica); BV - Bojanine vode; K - Koritnik; GD - Gornji Dušnik; S-I - Sopotnica5; S-II - Sopotnica II (OŠ); L - Lazinje; I - Izvor; Lj - Ljuberađa, Rakoš česma - RČ.** Uslovi na terenu nisu dozvolili da se poslednji kvartal (decembar 2018-januar 2019) kompletira, dok je podzemna voda sa Rakoš česme samo 2 puta bila analizirana.

Tabela 7.12. Rezultati kvartalnih terenskih merenja fizičko-hemijskih parametara, kvartalni monitoring

datum	oznaka uzorka	T	mutnoća	pH ¹⁶	Ec	O ₂	Eh
		°C	NTU		(μS/cm)	(mg/l)	(mV)
9. oktobar 2017.	RČ	10,1	0,25	7,73	477	0,91	225,0
10. mart 2018.	O	19,1	0,61	/	601,0	3,84	228,1
9. mart 2018.	BV	7,9	0,63	/	387,0	5,14	178,0
9. mart 2018.	K	10,4	2,09	/	686,0	4,05	216,0
9. mart 2018.	GD	10,2	0,64	/	362,0	5,06	233,4
9. mart 2018.	SI	10,4	0,67	/	390,0	5,10	250,0
9. mart 2018.	S II	11,8	0,52	/	408,0	4,65	267,2
9. mart 2018.	L	11,1	0,67	/	288,0	4,68	288,0
10. mart 2018.	I	7,6	4,65	/	509,0	6,71	246,6
9. mart 2018.	Lj	14,7	2,08	/	468,0	5,15	280,5
16. jun 2018.	O	20,6	1,27	7,13	634,0	3,73	223,3
16. jun 2018.	BV	8,1	0,62	7,92	387,0	4,84	240,5
16. jun 2018.	K	12,4	4,34	7,30	644,0	5,25	241,1
16. jun 2018.	GD	10,3	0,61	7,62	328,0	5,34	275,3
16. jun 2018.	SI	9,9	0,86	7,52	349,0	5,18	238,3
16. jun 2018.	S II	11,2	0,85	7,47	389,0	5,38	259,8
16. jun 2018.	L	12,0	1,92	7,94	279,0	5,13	239,3
16. jun 2018.	I	13,8	1,14	7,67	557,0	4,40	202,8
16. jun 2018.	Lj	15,2	1,23	7,26	468,0	5,75	262,4
14. septembar 2018.	O	21,1	1,00	7,02	632,0	3,02	232,4
14. septembar 2018.	BV	8,6	0,62	7,86	392,0	4,90	192,7
14. septembar 2018.	K	14,0	4,64	7,24	644,0	3,74	146,4
14. septembar 2018.	GD	10,3	0,39	7,58	317,0	3,94	175,5
14. septembar 2018.	SI	10,2	0,64	7,47	373,0	4,71	243,5
14. septembar 2018.	S II	11,2	0,45	7,42	391,0	4,67	241,7
14. septembar 2018.	L	12,0	1,09	7,87	287,0	4,91	159,0
14. septembar 2018.	I	13,2	0,90	7,28	566,0	4,30	189,8
14. septembar 2018.	Lj	15,2	0,76	7,31	458,0	4,49	212,4
14. septembar 2018.	RČ	13,1	0,15	7,70	385,0	7,25	263,0
20. decembar 2018.	Lj	15,2	0,51	7,42	469,00	8,95	192,9
5. januar 2019.	O	20,5	0,47	7,16	550,00	3,45	243,5
5. januar 2019.	K	7,9	4,53	7,89	604,00	4,87	211,5
maksimum		21,1	4,7	7,9	686,0	9,0	288,0
minimum		7,6	0,4	7,0	279,0	3,0	146,4
sr. vrednost		12,5	1,4	7,5	460,6	4,8	227,1

¹⁶ Tokom prve kampanje terenskih istraživanja i merenja došlo je do kvara pH sonde, pa ti rezultati nedostaju

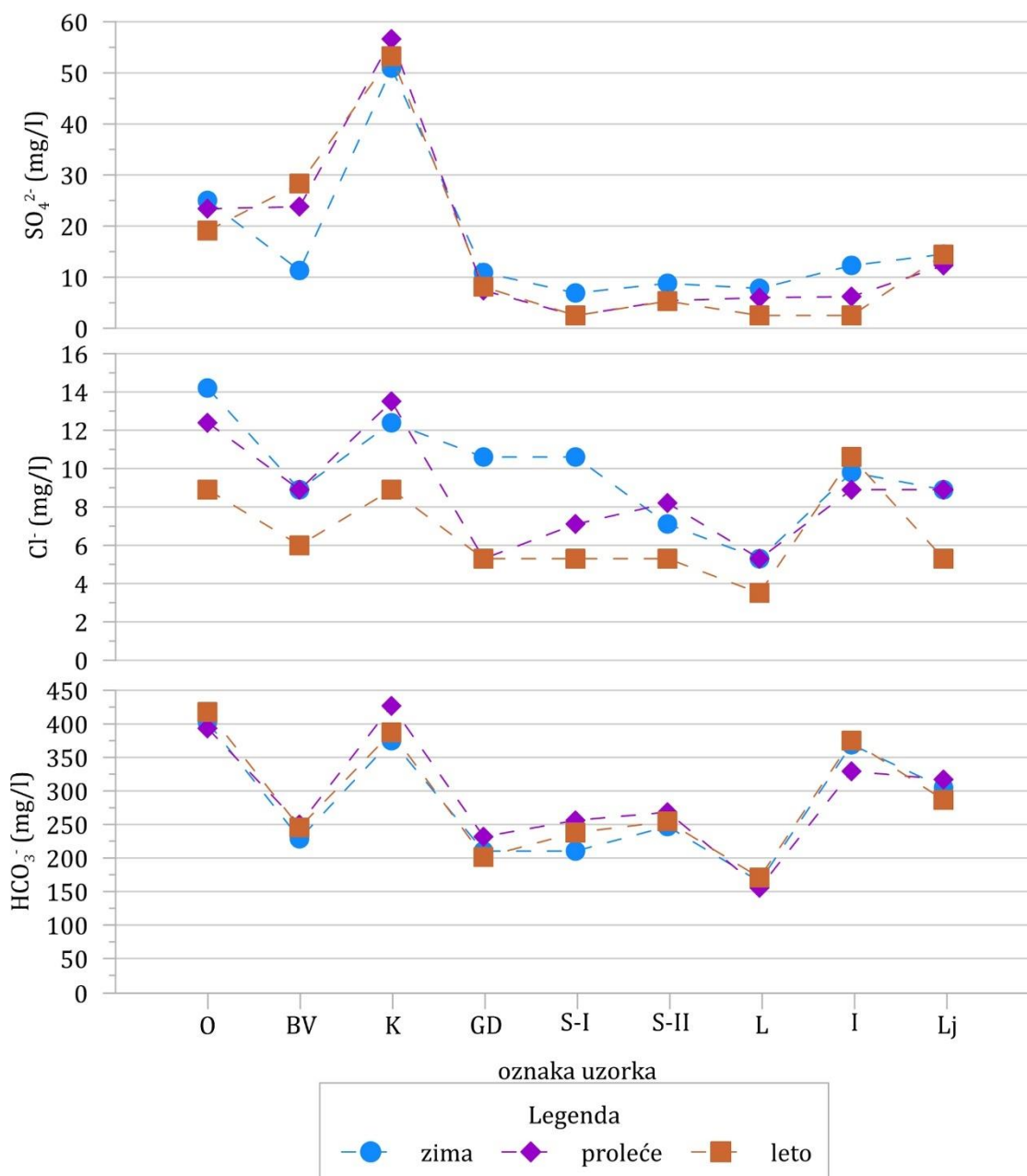


Slika 7.70. Srednje vrednosti osnovnih fizičko-hemijskih parametara zabeleženih tokom monitoringa kvaliteta (oznake kao u tabeli 7.14.), veličina kruga zavisi od izmerene vrednosti: a) temperatura vode, b) mutnoća, c) specifična električna provodljivost, d) pH vrednost, e) oksido-redukциони potencijal, f) rastvoreni kiseonik

Temperatura vode se kretala u rasponu od 7,6 do 21,1 °C, a najviše temperature su redovno beležene na vrelu Ostrovica-Banjica (Slika 7.70.). Vrednosti mutnoće su bile od 0,4 do 4,7 NTU, a najveća je bila na Bojaninim vodama. Specifična električna provodljivost se na osmatranim

pojavama kretala od 279 do 686 $\mu\text{S}/\text{cm}$ i vrlo lepo odražava uslove u kojima je nastala podzemna voda. Vrednost pH indeksa je varirala od 7,0 do 7,9, a najviša vrednost je zabeležena u vodi karstnog vrela Lazinje, koje drenira izdan u potpunosti nastalu u titonskim krečnjacima ($\text{CaCO}_3 > 98\%$). Oksido-redukциони potencijal u podzemnoj vodi karstnih izdani se kretao od 146,4 do 288 mV. Rastvoreni kiseonik u podzemnoj vodi se kretao u koncentraciji od 3,0 do 9,0 mg/l, koji je zabeležen na Rakoš česmi (hypsometrijski najvišem izvoru).

Rezultati skraćениh hemijskih analiza (Slike 7.71. i 7.72.) pokazuju da su skoro sve vode Ca-HCO₃ do Ca-Mg-HCO₃ tipa, iako su u nekim uzorcima zabeležene povišene koncentracije sulfata i hlorida (Koritnik). Jedino je u uzorku podzemne vode sa Gornjeg Dušnika od 10.3.2018. godine registrovana veća koncentracija Na+K, pa je svrstan u Ca-Na-HCO₃ vode.

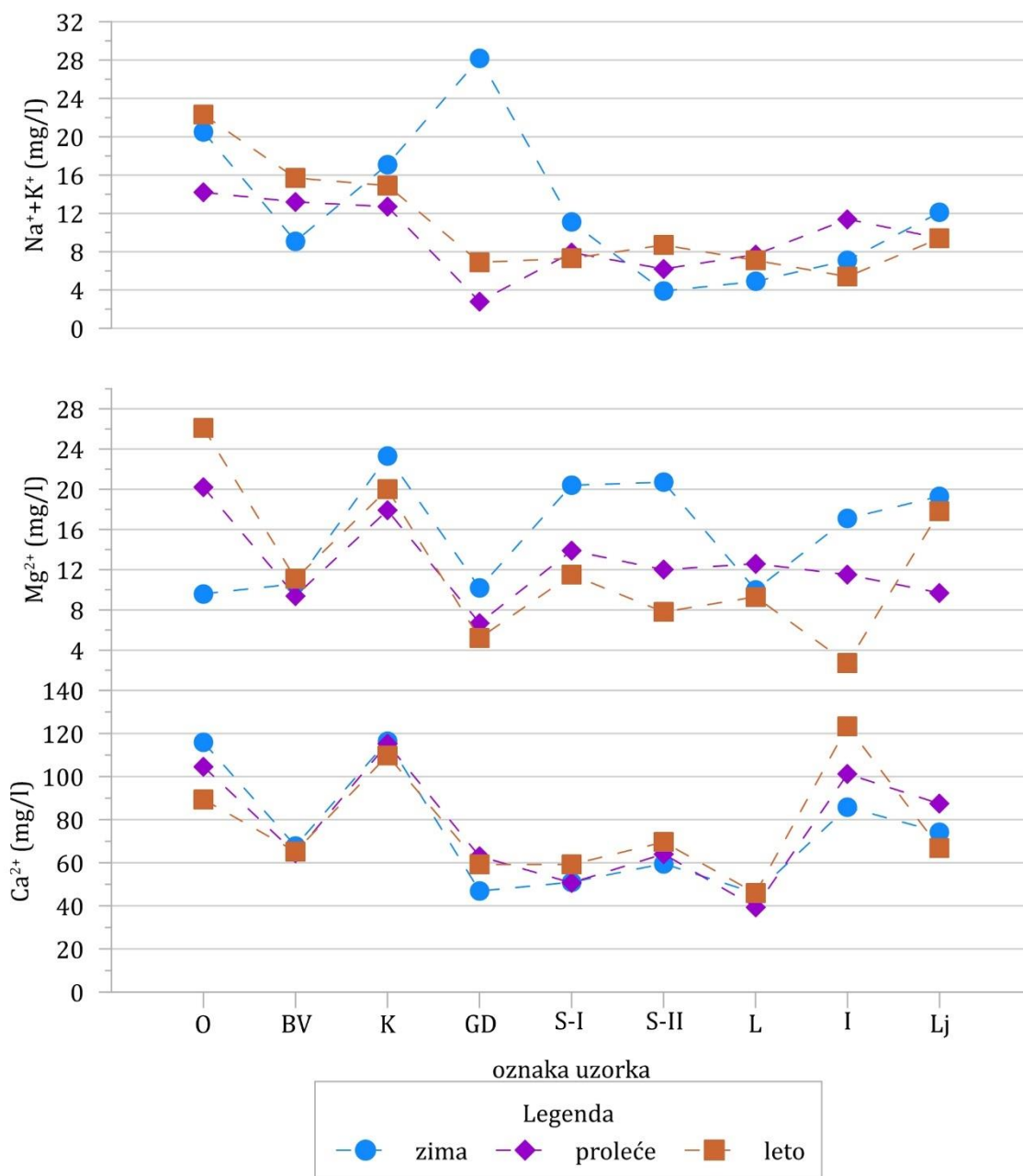


Slika 7.71. Rezultati kvartalnih hemijskih analiza – anjoni; oznake uzoraka kao u tabeli 7.14.

Koncentracija bikarbonata (Slika 7.71.) varira od 155,6 mg/l (Lazinje-9.3.2018. godine) do 427,00 mg/l (Koritnik-9.3.2018), koncentracija hlorida se kreće u granicama 3,5 mg/l (Lazinje-15.9.2018. godine) do 14,2 mg/l (Ostrovica-10.3.2018. godine), a sulfatni jon je izmeren u

koncentracijama od 2,5 mg/l (16.6.2018-Sopotnica 1 i 15.9.2018-Lazinje, Izvor i Rakoš česma) do 56,6 mg/l (Koritnik-16.6.2018. godine).

U pogledu katjona, kao što je ranije rečeno, uglavnom preovladava kalcijum (Slika 7.72.) u granicama od 39,4 mg/l (Lazinje-16.6.2018. godine) do 123,4 mg/l (Izvor-15.9.2018. godine), dok je sledeći po zastupljenosti magnezijum od 2,7 mg/l (Izvor-15.9.2018. godine) do 32,3 mg/l (Ostrovica-5.1.2019. godine). Na kraju koncentracija Na+K, dobijena računskim putem, se kretala od 2,5 mg/l (Koritnik-5.1.2019. godine) do 28,2 mg/l (Gornji Dušnik-9.3.2018. godine).



Slika 7.72. Rezultati kvartalnih hemijskih analiza – katjoni; oznake uzoraka kao u tabeli 7.14.

Vrednosti koje su izmerene u uzorku prokapne vode pećine Peč (PP) pokazuju odstupanja u odnosu na vrednosti izmerene u podzemnoj vodi karstnih vrela. U uzorku koji je uzet 10.3.2018. godine unutar pećine, sa lokacije koja je kasnije u eksperimentima poslužila za uzorkovanje vode (lokacija C tokom opita trasiranja tj. SP1 tokom opita sa kontaminantom), izmerena je pH vrednost od 8,16, vrednost specifične električne provodljivosti je bila 612 μ S/cm. Obe ove vrednosti su značajno više od onih koje su u istom vremenskom preseku izmerene u podzemnoj

vodi karstnih vrela. Koncentracija kalcijuma 65,2 mg/l je niža nego ona izmerena na vrelima Mokra, Divljana i Bežište, ali viša od one na vrelu Divljana. Koncentracija magnezijuma od 13,5 mg/l u procednoj vodi je veća od vrednosti u podzemnoj vodi vrela Divljana i Bežište, ali niža od one u podzemnoj vodi Mokre i Gornje Koritnice, dok je koncentracija bikarbonata od 256,27 mg/l niža od koncentracije ovog jona u podzemnoj vodi sa svih vrela. Koncentracije gvožđa (0,23 mg/l) i sulfata (<5 mg/l), koje su detektovane u uzorku procedne vode, ne pokazuju veća odstupanja od vrednosti koje su zabeležene u podzemnoj vodi sa karstnih vrela. Prilikom drugih dolazaka do pećine Peč tokom 2018. godine nije bilo moguće uzeti uzorak vode, jer nije bilo uočeno značajnije prokapavanje vode kroz tavanicu pećine.

Uzorkovanje vode u cilju utvrđivanja sadržaja mikrokomponenti u vodi, izvršeno je dva puta na četiri hidrogeološke pojave osnovne monitoring mreže (Mokra, Divljana, Bežište i Gornja Koritnica) u različitim hidrogeološkim uslovima. Analiza mikrokomponenti je izvršena na uzorcima od 13.10.2018. godine u okviru laboratorija HET-a. Sa druge strane, uzorak procedne vode uzet u pećini Peč marta 2018. godine, kao i uzorci podzemne vode prikupljeni decembra 2018. godine su analizirani u Laboratoriji za ICP-OES (KAH, HF, UB).

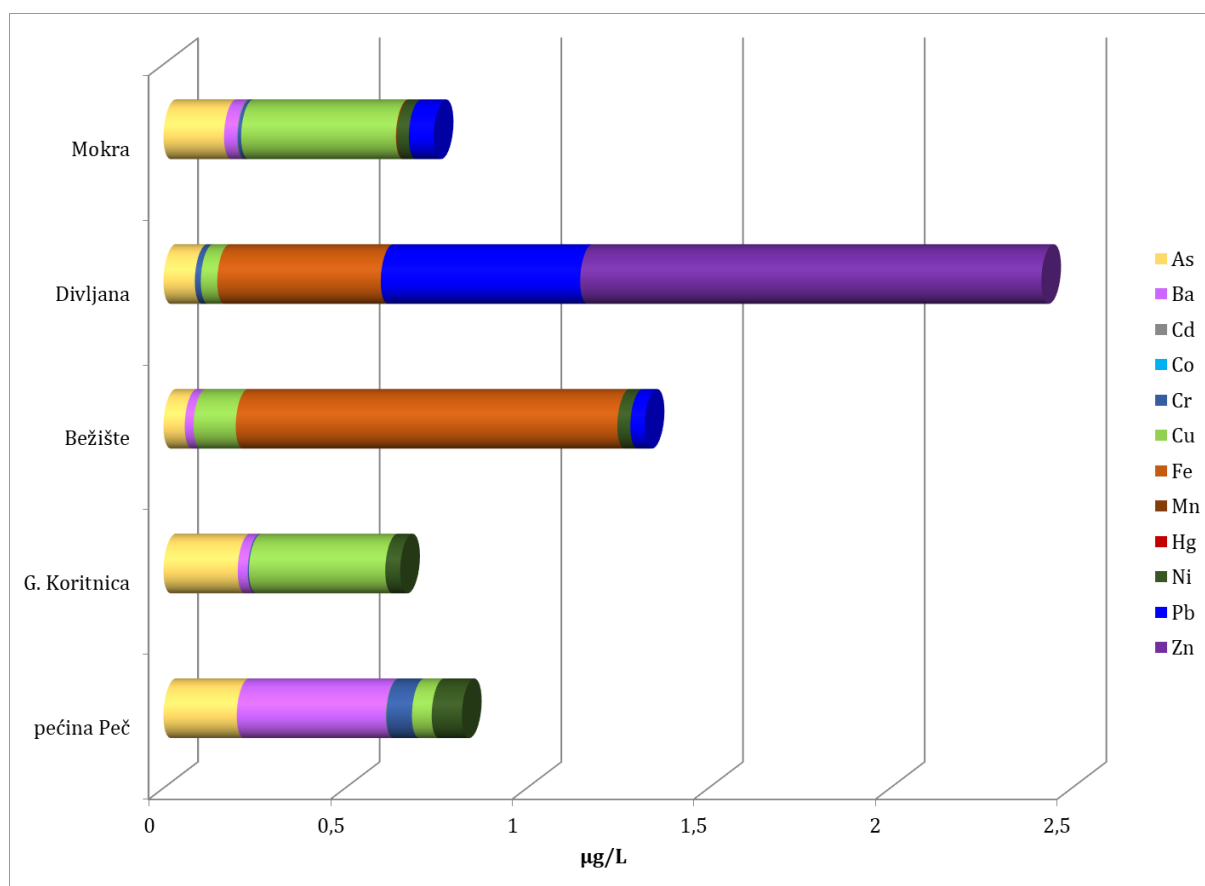
Na osnovu podataka u tabeli 7.13. vidi se da je od analiziranih mikrokomponenti zabeleženo prisustvo cinka u koncentracijama od 6,5 do 28,2 µg/l. Tom istom analizom je određen utrošak kalijum permanganata u granicama koje su dozvoljene za vodu za piće (3,14-4,08 mg/l). Gvožđe i mangan su detektovani samo u vodi vrela Gornje Koritnice, ali u malim koncentracijama 21 µg/l i 2 µg/l, respektivno. Olovo, bakar, arsen i živa nisu detektovani ni u jednom uzorku podzemne vode.

Tabela 7.13. Rezultati analize mikroelemenata izrađene u laboratoriji HET-a (13.10.2018. godine)

Rb.	Parametri	Jedinica	Mokra	Divljana	Bežište	Gornja Koritnica
1	Utrošak KMnO ₄	mg KMnO ₄ /l	3,14	3,45	3,45	4,08
2	TC	mg C/l	65,91	65,88	92,74	76,13
3	IC	mg C/l	64,01	63,63	89,64	70,43
4	TOC	mg C/l	1,90	2,25	3,11	5,70
5	TN	mg N/l	0,69	0,60	0,25	0,55
6	Amonijačni azot	mg N/l	<0,05	<0,05	0,08	0,07
7	Nitritni azot	mg N/l	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
8	Nitratni azot	mg N/l	0,6	0,5	<0,5	<0,5
9	Ukupni fosfor	mg P/l	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
10	Kalcijum Ca	mg CaO/l	114,24	117,38	163,52	120,96
11	Magnezijum Mg	mg MgO/l	22,65	18,12	3,45	12,15
12	Gvožđe Fe	µg/l	<1	<1	<1	21
13	Mangan Mn	µg/l	<1	<1	<1	2
14	Natrijum Na	mg/l	3,82	0,88	0,74	0,98
15	Kalijum K	mg/l	0,87	0,68	0,69	0,80
16	Olovo Pb	µg/l	<2	<2	<2	<2
17	Bakar Cu	µg/l	<1	<1	<1	<1
18	Cink Zn	µg/l	6,5	28,2	19,9	14,6
19	Arsen As	µg/l	<1	<1	<1	<1
20	Živa Hg	µg/l	<1	<1	<1	<1

Analiza mikroelemenata u uzorcima vode od 20.12.2018. godine je pokazala niske sadržaje mikroelemenata (Slika 7.73.) u ispitanim uzorcima. Arsen je detektovan u svim uzorcima u koncentracijama od 0,058 do 0,204 µg/l. Bakar je zabeležen u svim uzorcima u koncentraciji od 0,045 do 0,426 µg/l. Živa nije detektovana ni u jednom uzorku, kao ni kobalt, dok je mangan detektovan samo u uzorku iz vrela Mokra - 0,003 µg/l, a cink samo u uzorku podzemne vode iz

vrela Divljana – 1,269 µg/l. Barijum se kretao u koncentraciji od 0,024 do 0,410 µg/l (nije detektovan u uzorku iz vrela Divljana), dok je najvišu vrednost imao u procednoj vodi. Kadmijum je detektovan samo u procednoj vodi iz pećine Peč u koncentraciji 0,001 µg/l i u vodi vrela Mokra 0,003 µg/l. Hrom nije registrovan u vodi vrela Bežište, dok se u ostalim uzorcima kreće u koncentraciji od 0,003 do 0,070 µg/l. Gvožđe je detektovano u vodi iz Divljane u koncentraciji od 0,45 µg/l i u vodi iz Bežišta 1,050 µg/l. Nikl je zabeležen u rasponu od 0,032 do 0,083 µg/l, ali nije detektovan u uzorku iz vrela Divljana. Olovo je zabeleženo u rasponu od 0,039 do 0,548 µg/l, ali je u podzemnoj vodi iz vrela Mokra i procednoj vodi bilo ispod granice detekcije uređaja.



Slika 7.73. Koncentracije mikroelemenata u podzemnoj vodi karstnih vrela 20.12.2028. godine i u procednoj vodi iz pećine Peč 10.3.2018. izrađene u Laboratoriji za ICP-OES (HF, UB)

U pogledu kvaliteta podzemne vode karstne izdani Suve planine u potpunosti odgovaraju kvalitetu koji se zahteva za vode za piće i u skladu su sa rezultatima koji su dobijeni u drugim delovima Karpato-balkanida (Stevanović, 1991; Milanović S, 2010; Vasić, 2017). Sve vode su bez boje i mirisa, sa povremenim kratkim periodima zamućenja, temperature koja odgovara klimatskim uslovima područja, osim u slučaju viših vrednosti vode na vrelima Banjice Ostrovica i Koritnik, kao i postojanju malo povišene temperature vode od oko 3-5°C na vrelu Mokra. U pogledu osnovnog jonskog sastava preovladava sadržaj kalcijuma i bikarbonata, sa mestimičnim povišenjem sadržaja magnezijuma (Ostrovica), natrijuma/kalijuma (Gornji Dušnik i Koritnik) i sulfata (Koritnik). Sadržaj gvožđa i mangana je registrovan, ali je u niskim koncentracijama <1µg/l, a često i ispod granice detekcije korišćene analitičke metode). Ni jedan ispitivani uzorak nije imao povećan sadržaj organske materije, a analize mikroelemenata su pokazale da vode iz karstne izdani ne sadrže ove elemente u značajnim koncentracijama. Zaključak je da sastav podzemne vode na vrelima i izvorima skoro u potpunosti zavisi od čistoće krečnjaka kroz koje se voda na svom putu kroz karstnu izdan kreće i reakcija koje se u karstnoj izdani dešavaju.

7.6. Rezultati izotopskih metoda

Uzorkovanje kišnice i podzemne vode radi određivanja sastava stabilnih izotopa (^{18}O i ^2H) vršeno je jednom mesečno, kao što je navedeno u poglavlju 5.2.3.

Analiza i sinteza rezultata koji su dobijeni analizom izotopa uzoraka kišnice, snega i podzemnih voda, urađena je prema metodologiji koja je razvijena za izradu LIML Kučajsko-beljaničkog masiva (Vasić, 2017; Vasić et al, 2019, 2020). Formiranje LIML bilo je neophodno kako bi se razumelo i pratilo poreklo podzemnih voda na istočnim padinama Suve planine. Korišćenjem GIML ili druge lokalne/regionalne linije padavina formirane u Srbiji dobili bi se nedovoljno precizni rezultati istraživanja (Vasić, 2017).

Uzorci kišnice i snega sakupljani su pomoću „RainCo“ kolektora, na lokacijama vrela Mokra koja je na nadmorskoj visini od 352 m i pećine Peč na nadmorskoj visini od 885 m (Slike 7.74. i 7.75, Tabela 7.14.), a istovremeno je vršeno uzorkovanje podzemne vode sa karstnih vrela Mokra, Divljana, Bežište i Gornja Koritnica.

Na kraju svakog meseca, ukoliko je bilo padavina, voda je presipana u bočice (Slika 7.75.). U zimskom periodu vršeno je i uzorkovanje snega radi utvrđivanja sadržaja stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H . Iste bočice su korišćene za uzorkovanje podzemne vode karstnih vrela za izradu analiza stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H .

Za potrebe izrade LIML, iskorišćeno je ukupno 26 uzoraka kišnice i snega, po 13 uzoraka sa obe lokacije (Tabela 7.14.). Za svaku od lokacija je konstruisana LIML, koja služi za preciznije tumačenje podataka izotopskih analiza padavina i podzemnih voda. Lokalne izotopske meteorske linije za lokacije Mokra i Peč (Slike 7.76. i 7.77.), su daljom obradom i sumiranjem poslužile za formiranje LIML za lokaciju Suva planina (Slika 7.79.).



Slika 7.74. Priprema i instaliranje „RainCo“ kolektora na lokaciji pećine Peč



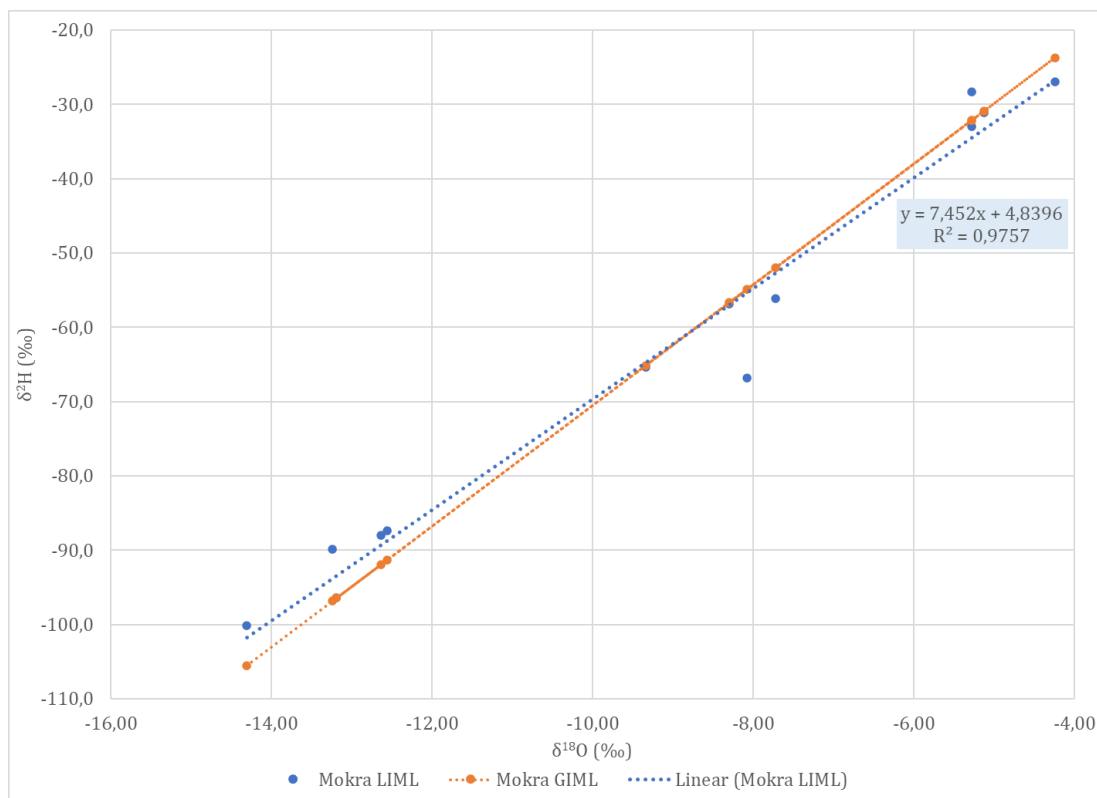
Slika 7.75. Uzorkovanje kišnice iz „RainCo“ kolektora na lokaciji Mokra (levo) i pećine Peč (desno)

Tabela 7.14. Rezultati analiza stabilnih izotopa ^{18}O i ^2H , kišnice i snega (Institut Atomki)

Rb.	oznaka uzorka+datum	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ StDev	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ StDev	$\delta^{17}\text{O}$ (‰)	$\delta^{17}\text{O}$ StDev
1.	3s (30.11.2017.)	-174,0	0,3	-22,93	0,11	-12,07	0,05
2.	1k (2.1.2018.)	-89,9	0,1	-13,24	0,06	-7,06	0,03
3.	3k (2.1.2018.)	-88,7	0,1	-13,45	0,06	-7,05	0,06
4.	1k (02.02.2018.)	-87,4	0,1	-12,56	0,06	-6,64	0,04
5.	3s (02.02.2018.)	-81,5	0,2	-11,74	0,08	-6,20	0,05
6.	3k (02.02.2018.)	-80,2	0,8	-11,43	0,19	-6,17	0,06
7.	1k (10.3.2018.)	-96,4	0,0	-13,19	0,15	-7,03	0,05
8.	3k (10.3.2018.)	-87,3	0,4	-12,36	0,06	-6,58	0,08
9.	1k (7.4.2018)	-56,1	0,0	-7,73	0,15	-4,05	0,11
10.	3k (7.4.2018)	-64,3	0,2	-8,78	0,11	-4,70	0,05
11.	1k (9.5.2018)	-31,1	0,3	-5,13	0,08	-2,61	0,04
12.	3k (10.5.2018)	-32,3	0,2	-5,58	0,09	-2,90	0,04
13.	1k (16.6.2018)	-33,0	0,4	-5,28	0,16	-2,80	0,04
14.	3k (16.6.2018)	-31,8	0,3	-5,22	0,10	-2,73	0,05
15.	1k (18.7.2018)	-28,3	0,0	-5,28	0,11	-2,64	0,05
16.	3k (18.7.2018)	-35,6	0,4	-6,30	0,07	-3,28	0,09
17.	1k (15.8.2018)	-56,8	0,6	-8,30	0,09	-4,28	0,07
18.	3k (14.8.2018)	-68,2	0,0	-9,57	0,10	-5,40	0,05
19.	1k (14.9.2018)	-26,9	0,3	-4,24	0,08	-2,45	0,04
20.	3k (14.9.2018)	-40,9	1,6	-7,09	0,11	-3,77	0,08
21.	1k (13.10.2018)	-65,4	0,5	-9,34	0,07	-4,75	0,05
22.	3k (13.10.2018)	-63,7	0,3	-8,14	0,07	-4,04	0,04
23.	1k (17.11.2018)	-66,8	0,2	-8,08	0,09	-4,22	0,06
24.	1k (20.12.2018)	-88,0	0,3	-12,64	0,06	-6,98	0,03
25.	1s (20.12.2018)	-100,2	0,4	-14,31	0,06	-7,79	0,03
26.	3s (20.12.2018)	-127,2	0,9	-18,61	0,15	-9,63	0,09

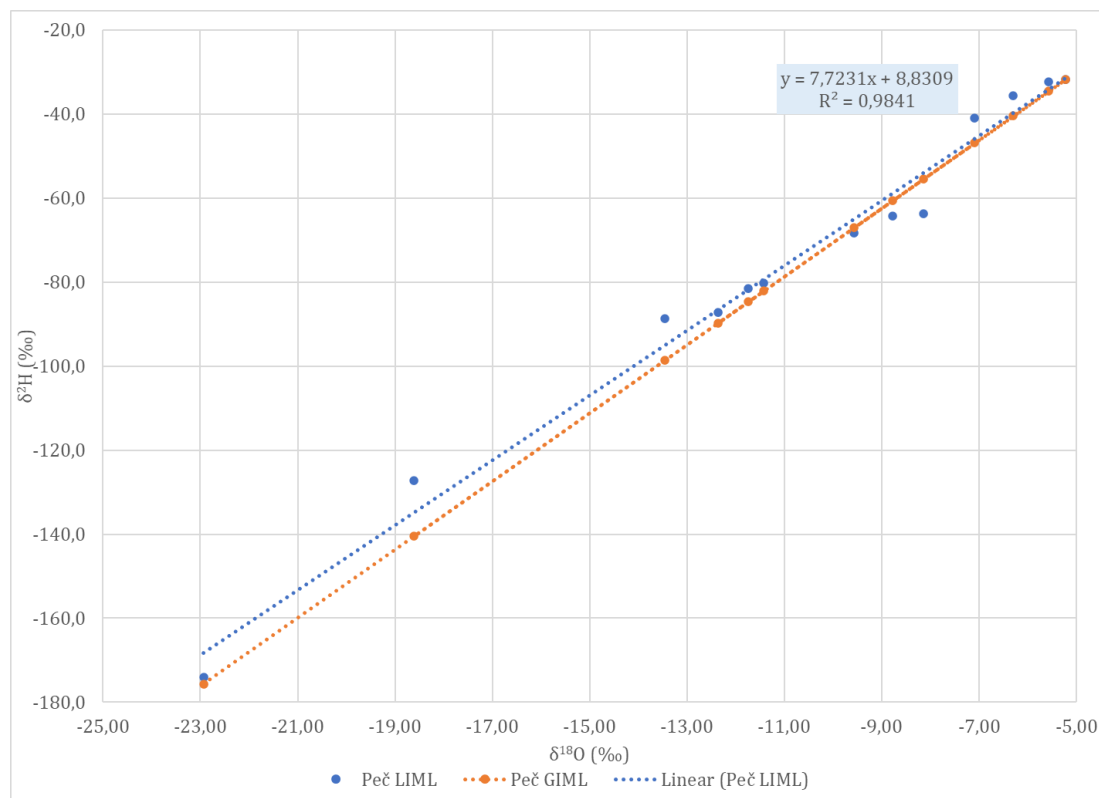
Napomena: 1 – lokacija Mokra, 3 – lokacija pećina Peč; k – kišnica, s – sneg

Analizom dijagrama prikazanog na slici 7.76 zapaža se da LIML za lokaciju Mokra preseca GIML tako da je jedan deo ispod, a jedan deo iznad GIML. Uzorci padavina koji se na dijagramu nalaze iznad GIML su uglavnom prikupljeni tokom hladnijih meseci (januar-mart 2018. godine i decembar 2018. godine) i imaju lakši izotopski sastav, a najlakši je izmeren u uzorku snega od 20. decembra 2018. godine ($\delta^2\text{H} = -127,2$ ‰; $\delta^{18}\text{O} = 18,61$ ‰). Svi uzorci prikupljeni u ostalom periodu godine nalaze se ispod GIML. Uzorci sa težim izotopskim sadržajem prikupljeni su tokom toplog perioda 2018. godine (maj-septembar). Jedino se uzorak od 18.7.2018. godine nalazi iznad GIML i odraz je prethodnog izuzetno kišnog perioda (u periodu između dva uzorkovanja palo je više od 80 mm kiše).



Slika 7.76. Konstruisana lokalna izotopska meteorska linija (LIML) za lokaciju Mokra i Globalna izotopska meteorska linija (GIML)

U slučaju LIML za lokaciju Peč, izražen je teži izotopski sastav u prolećnim i letnjim mesecima (Slika 7.77.), dok su uzorci iz hladnijeg dela godine sa lakšim vrednostima $\delta^{18}\text{O} = -18,61 \text{‰}$ (kiša-decembar 2018. godine) i $\delta^{18}\text{O} = -22,93 \text{‰}$ (sneg-novembar 2017. godine). Linije LIML i GIML za lokaciju pećine Peč imaju samo jednu tačku preklapanja, uzorak od juna 2018. godine. Što znači da cela LIML leži iznad GIML, međutim, sadržaj izotopa u uzorcima od aprila, avgusta i oktobra uslovio je da se na dijagramu nalaze ispod GIML, usled činjenice da su prikupljeni tokom mesečnih perioda sa najmanjim sumama mesečnih padavina.

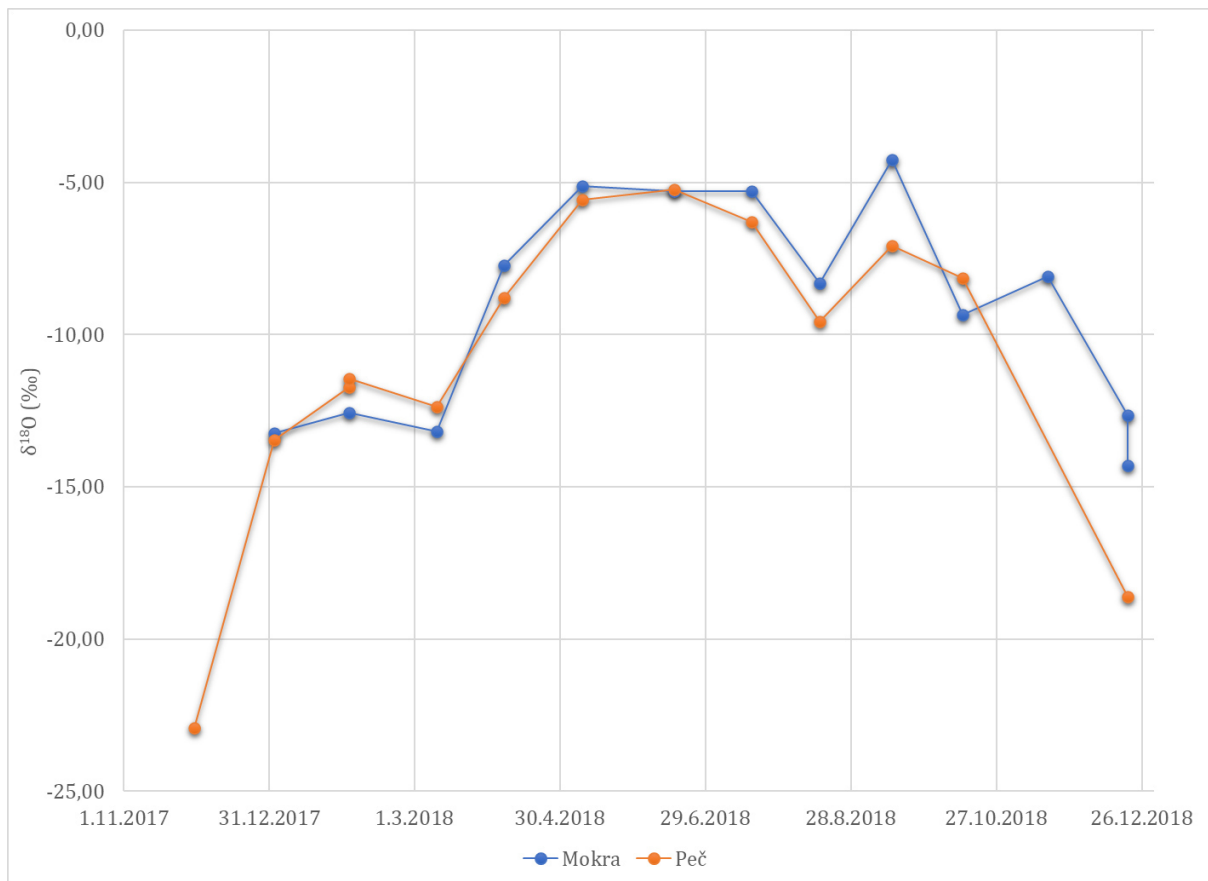


Slika 7.77. Konstruisana lokalna izotopska meteorska linija (LIML) i Globalna izotopska meteorska linija (GIML) za lokaciju Peč

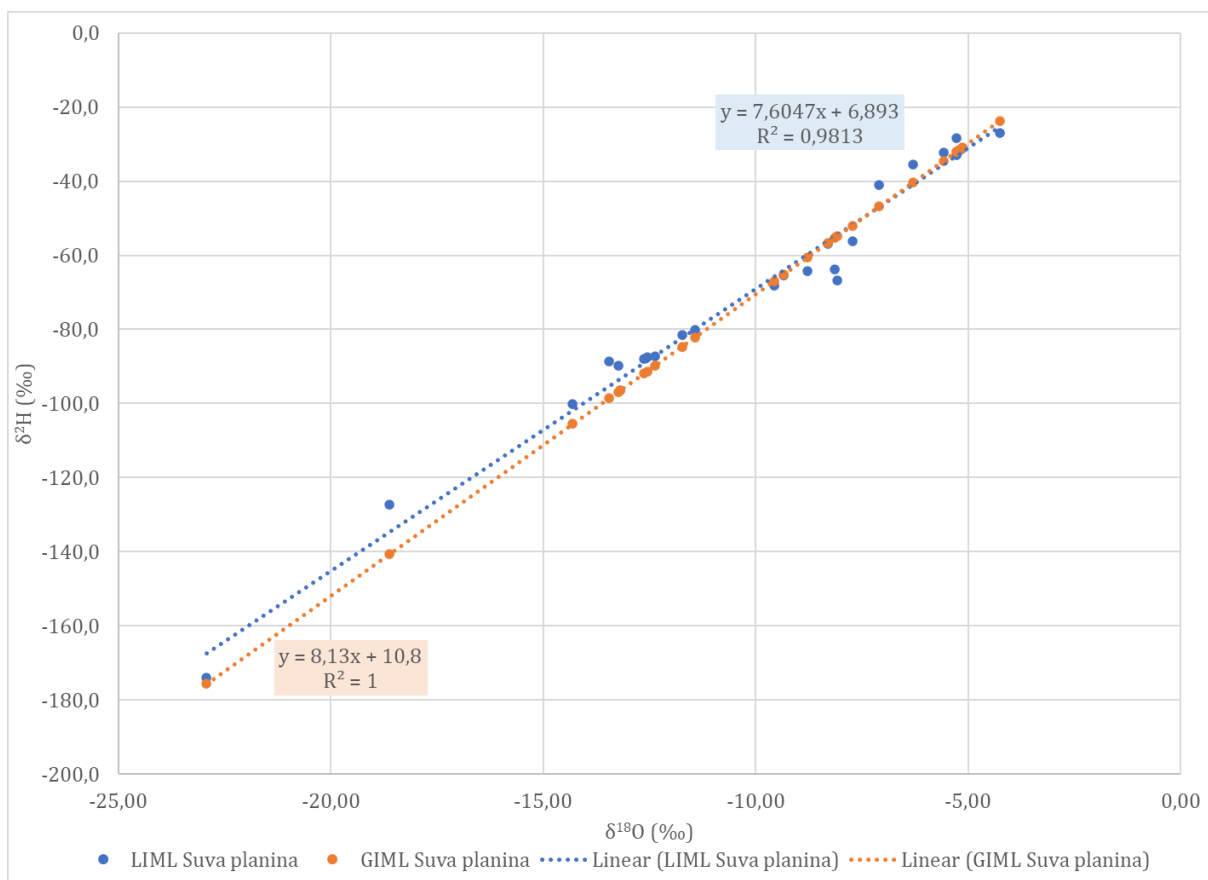
Analizom sadržaja stabilnih izotopa u padavinama sa lokacija Mokra i Peč uočeni su i određeni izotopski efekti (Vasić, 2017): temperaturni efekat, zatim efekat nadmorske visine (izotopski lakše padavine su na višim planinskim predelima), kao i količinski efekat (junske kiše 2018. godine, na lokaciji Mokra).

Analiza sadržaja stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ u padavinama tokom godine (Slika 7.78.) pokazuje da su padavine izlučene na lokaciji pećine Peč, uglavnom formirane u višim predelima ili su duže bile pod uticajem vazduha sa vodenom parom koja potiče sa većih nadmorskih visina, dok su padavine izlučene na lokaciji Mokra nastale isparavanjem voda sa nižih nadmorskih visina. Može se uočiti i uticaj izotopskog temperaturnog efekta, koji se vidi u variranju izotopskog sastava $\delta^{18}\text{O}$ prema godišnjem dobu (Vasić, 2017).

Lokalna izotopska meteorska linija Suve planine dobijena je nanošenjem svih uzoraka na zajednički dijagram (Slika 7.71.), a odražava srednji izotopski sadržaj svih padavina sakupljenih na dve lokacije tokom perioda uzorkovanja (decembar 2017-decembar 2018). Linija LIML Suve planine sa GIML zaklapa oštar ugao, i veći deo nalazi se iznad GIML.



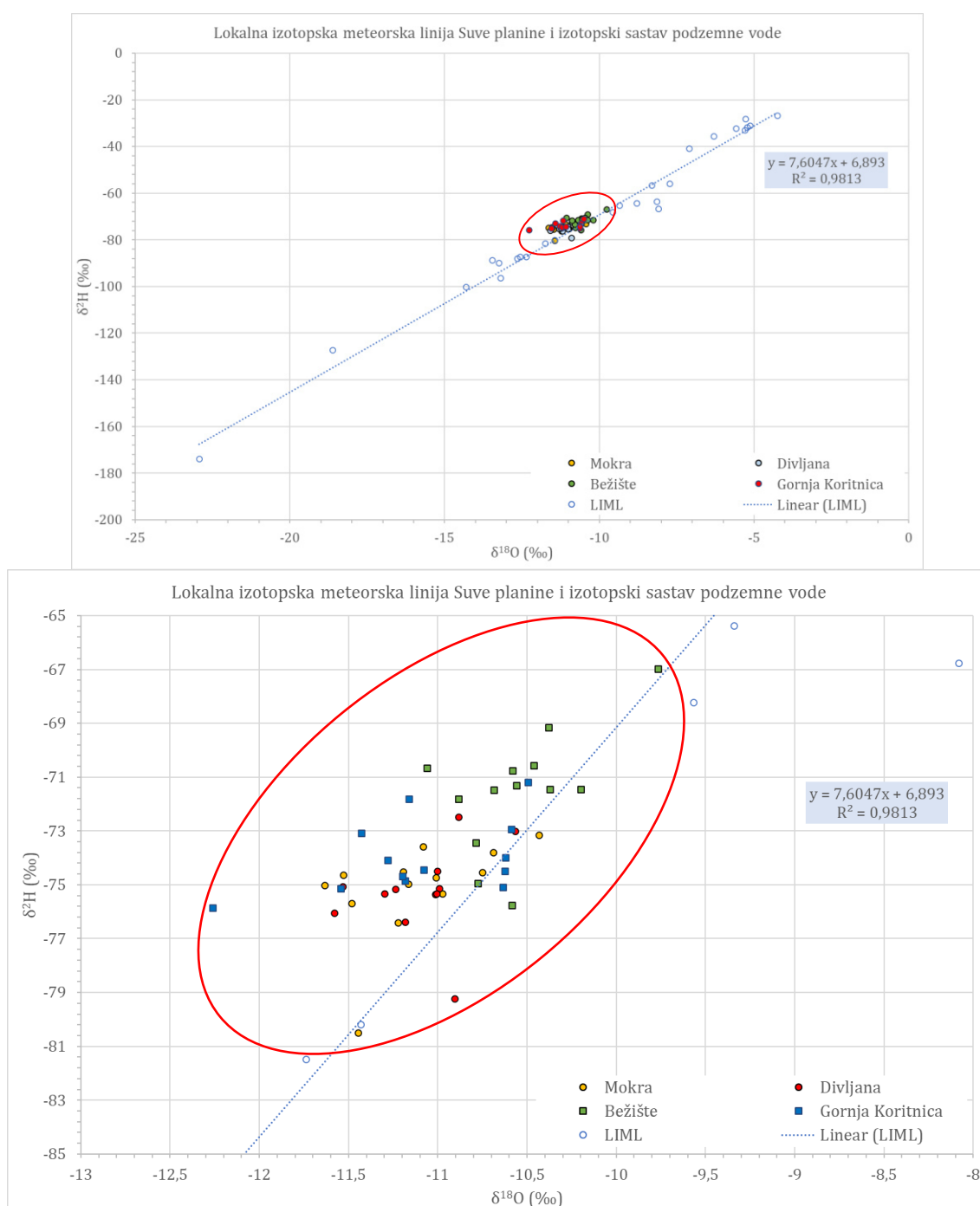
Slika 7.78. Sezonski trend promene sadržaja stabilnog izotopa $\delta^{18}O$ za lokacije Mokra i Peč



Slika 7.79. Konstruisana lokalna izotopska meteorska linija (LIML) za Suvu planinu i Globalna izotopska meteorska linija (GIML)

7.6.1. Povezanost padavina i podzemnih voda i srednje vreme zadržavanja podzemnih voda u podzemlju

Izotopski sastav stabilnih izotopa (^{18}O i ^2H) podzemnih voda sva četiri vrela je sličan (Slike 7.80.) i može se videti na osnovu prikazanih dijagrama da su izotopi uglavnom locirani iznad LIML. Izotopski sastav vode hipsometrijski najvišeg vrela Bežište ukazuje na „najteži“ izotopski sastav (vrednosti najbliže 0). Uzrok najtežeg izotopskog sastava podzemne vode vrela Bežište pokazuje da je ova voda imala najkraći kontakt sa stenama kroz koje je cirkulisala u odnosu na podzemnu vodu koja se drenira na druga tri vrela.

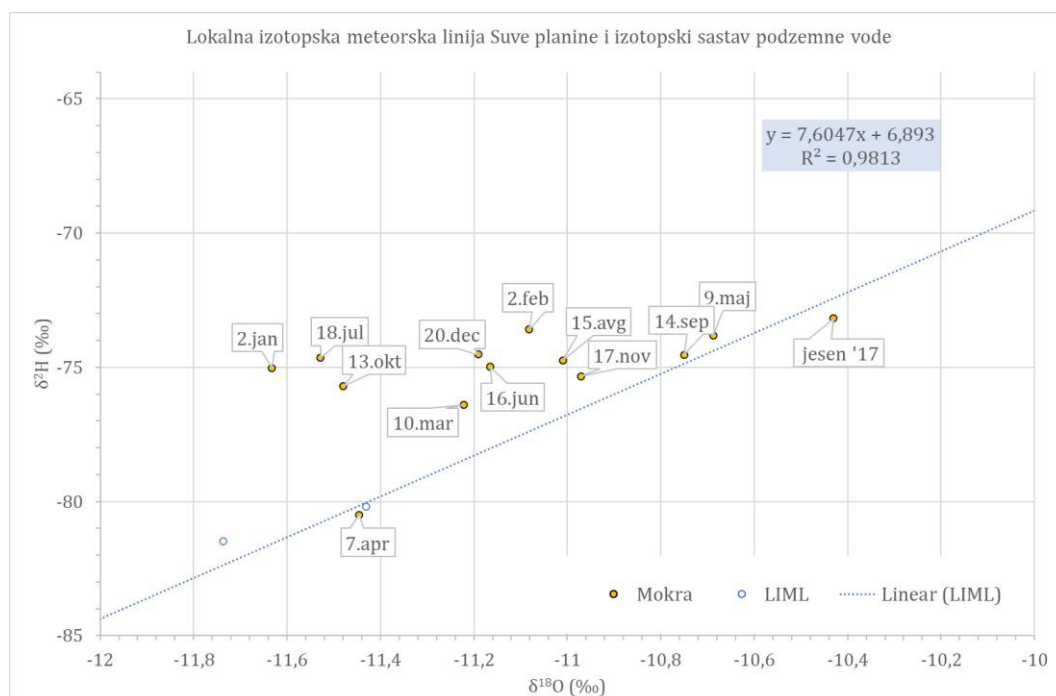


Slika 7.80. Izotopski sastav stabilnih izotopa u podzemnim vodama upoređen sa lokalnom izotopskom meteorskom linijom (dole uvećan detalj dijagrama)

Analiza rezultata stabilnih izotopa ($\delta^{18}\text{O}$ i δD) u podzemnoj vodi (Slika 7.80.), pokazuje da postoji direktna veza sa padavinama. Na osnovu rasporeda tačaka koje su u neposrednoj blizini

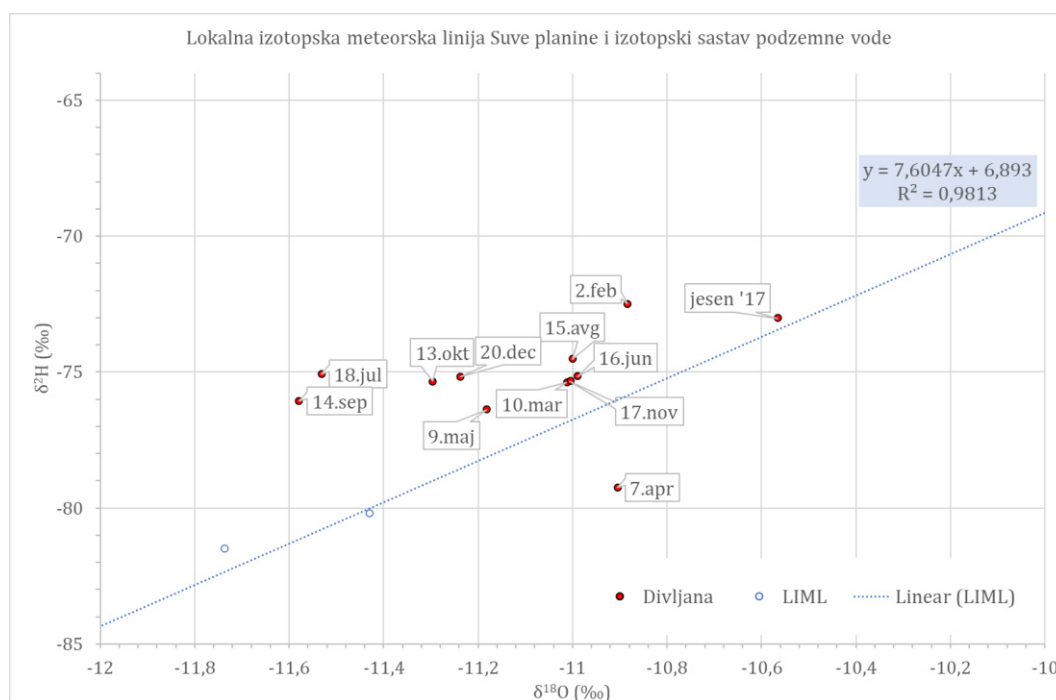
LIML, zaključuje se da se radi podzemnim vodama koje su formirane u otvorenim izdanima sa brзом vodozamenom, kakva i jeste karstna izdan nastala na istočnim padinama Suve planine. Voda u karstnom izdanskome sistemu istočnih padina Suve planine provodi između nekoliko dana i nekoliko meseci.

Sadržaj stabilnog izotopa δD u podzemnoj vodi vrele Mokra (Slika 7.81) kreće se od -73,2 do -80,5‰, dok se za $\delta^{18}O$ vrednosti kreću od -10,4 do -11,6‰. Izotopski sastav podzemne vode iz vrele Mokra ukazuje da podzemne vode generalno provode duži vremenski period u podzemlju. Međutim, vrednosti $\delta^{18}O$ i δD za 30. novembar 2017. godine su teže od vrednosti u preostalom periodu osmatranja, ukazujući na najkraći kontakt vode sa stenom, a uzevši u obzir da je izdašnost vrele već 1.12.2017. godine bila maksimalna u osmatranom periodu (2015-2018), zaključka je da su vrednosti izotopa indikator nailaska „poplavnog“ talasa (olujne padavine i nagli porast nivoa podzemnih voda). Vrednosti analiziranih izotopa u podzemnoj vodi za 7. april 2018. godine se skoro preklapaju sa vrednostima izotopa u padavinama (Slika 7.81.), pokazujući da je u prolećnom periodu prihranjivanje vrele Mokra direktno od obilnih martovskih padavina koje su prevazišle 120 mm.



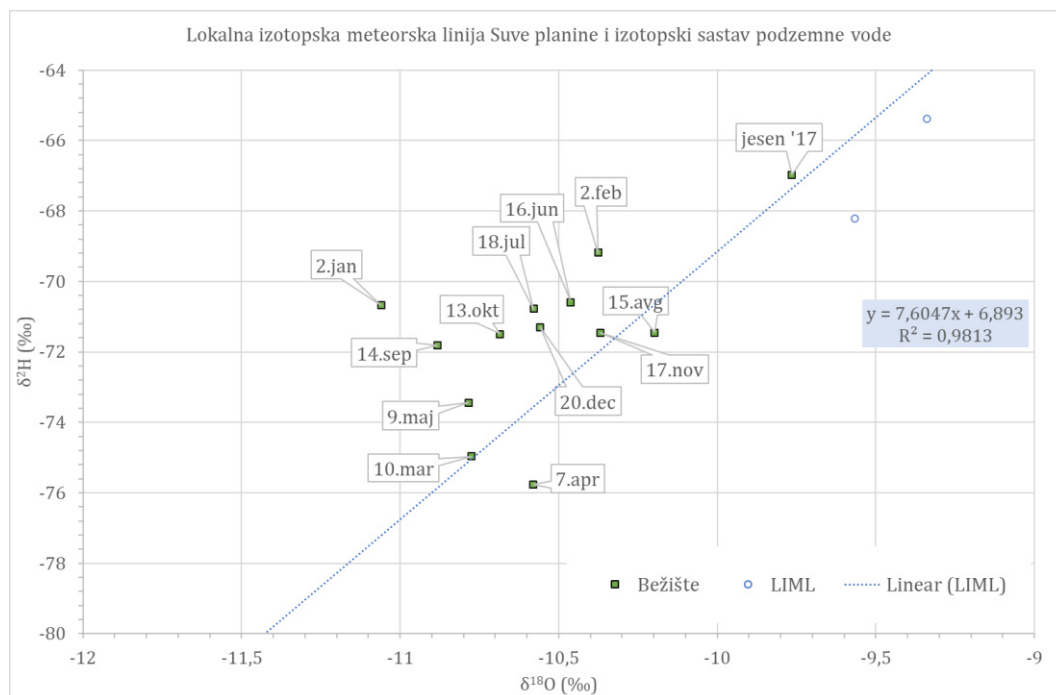
Slika 7.81. Izotopski sastav stabilnih izotopa u podzemnoj vodi vrele Mokra upoređen sa lokalnom izotopskom meteorskom linijom

Sadržaj stabilnih izotopa δD u podzemnoj vodi vrele Divljana kreće se od -72,5 do -79,2‰, dok se za izotop kiseonika vrednosti kreću od -10,6 do -11,6‰. Uzorci se nalaze iznad meteorske linije (Slika 7.82.), jedino se tačka koja definiše položaj izotopa za 7. april 2018. godine nalazi ispod LIML, kao i u slučaju uzorka podzemne vode vrele Mokra. Međutim, vrednosti $\delta^{18}O$ i δD za 30. novembar 2017. godine su dosta teže od vrednosti u preostalom periodu osmatranja, ukazujući na kratak kontakt vode sa stenom, koji je izazvan većom količinom padavinama iz prethodnog jesenjeg perioda (oktobar-novembar), kao i kod vrele Mokra. Podzemne vode vrele Divljana, takođe, provode duži vremenski period u podzemlju, ali neznatno kraće od podzemnih voda vrele Mokra, na šta ukazuju male razlike (<0,1‰) između srednjih vrednosti izotopa kiseonika i deuterijuma. Iz čega se da zaključiti da podzemna voda koja se drenira na ova dva vrela potiče iz zajedničke izdani tj. da u podzemlju postoji dobra povezanost kaverni i kanala koja snabdevaju vodom ova dva vrela.



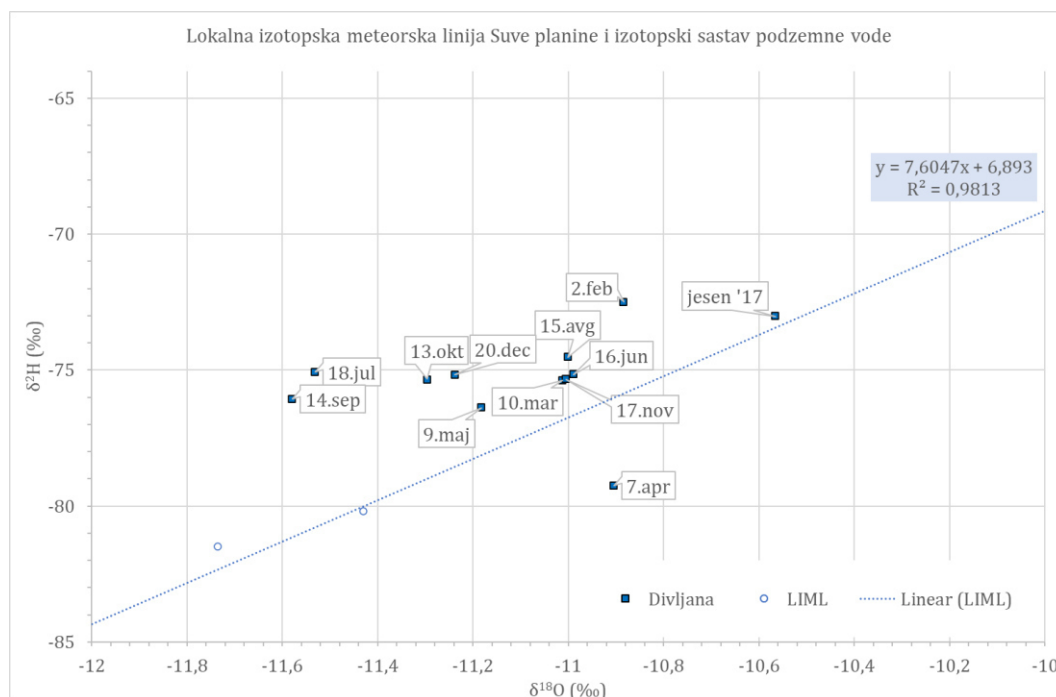
Slika 7.82. Izotopski sastav stabilnih izotopa u podzemnoj vodi vrela Divljana upoređen sa lokalnom izotopskom meteorskom linijom

Sadržaj stabilnih izotopa u podzemnoj vodi vrela Bežište kreće se od -67,0 do -75,8‰ za izotop δD , dok su vrednosti $\delta^{18}O$ od -9,76 do -11,06‰. Izotopi se nalaze iznad meteorske linije (Slika 7.83.), ali se tačke koje definišu sadržaj izotopa za 7. april i 15. avgust 2018. godine nalaze ispod LIML, dok se vrednosti za 30.11.2017., 10.3. i 17.11. 2018. godine nalaze neposredno uz LIML, što indikuje neku od sekundarnih frakcionacija u izotopskom sastavu voda (Vasić, 2017). Može se zaključiti da podzemne vode koje ističu na vrelu Bežište provode u podzemlju najkraći period u odnosu na podzemne vode ostala tri vrela. Na ovaj zaključak, navodi i činjenica da je najteži izotopski sastav zabeležen na ovom vrelu u proseku 3,5‰ veće vrednosti δD i 0,5‰ više vrednosti $\delta^{18}O$ u odnosu na vrednosti sa ostala tri vrela. U uzorku od 30. novembra 2017. godine su vrednosti analiziranih izotopa najteže od vrednosti svih uzoraka u preostalom periodu osmatranja: $\delta^{18}O = -9,76‰$ i $\delta D = -67,0‰$, ukazujući na dosta kratak kontakt podzemne vode sa krečnjačkom stenom.



Slika 7.83. Izotopski sastav stabilnih izotopa u podzemnoj vodi vrela Bežište upoređen sa lokalnom izotopskom meteorskom linijom

Sadržaj stabilnih izotopa u podzemnoj vodi vrela Gornja Koritnica kreće se od -71,2 do -75,9‰ za izotop δD , dok se za kiseonik vrednosti kreću od -10,49 do -12,26‰. Izotopi se nalaze iznad meteorske linije (Slika 7.84.), ali se tačke koje definišu položaj izotopa za 10. mart, 7. april i 15. avgust 2018. godine nalaze ispod LIML, dok se vrednosti za 30.11.2017. godine nalaze neposredno uz LIML, ukazujući na neku od sekundarnih frakcionacija u izotopskom sastavu voda, pa se može zaključiti da podzemne vode vrela Gornja Koritnica provode duži period u podzemlju, ali kraće od podzemne vode vrela Mokra i Divljana. Vrednosti izotopa od 30. novembra 2017. godine i 2. februara 2018. godine su dosta teže od vrednosti u preostalom periodu osmatranja, što ukazuje na kratak kontakt vode sa stenom.



Slika 7.84. Izotopski sastav stabilnih izotopa u podzemnoj vodi vrela Gornja Koritnica upoređen sa lokalnom izotopskom meteorskom linijom

U uzorcima kišnice, kada je bilo dovoljno vode, vršeno je merenje fizičko-hemijskih parametara i vršenje hemijske analize radi određivanja nekih parametara jonskog sastava (HCO_3^- , Ca^{2+} i Mg^{2+}). Rezultati su prema očekivanjima pokazali niske vrednosti pH i specifične električne provodljivosti, a samim tim ni u pogledu sadržaja određivanih jona nije bilo iznenađujućih rezultata (Tabela 7.15.). Najniža pH vrednost od 5,45 je izmerena u kišnici sa lokacije Mokra, dok je najviša vrednost zabeležena u kišnici sa lokacije pećine Peč. Što se tiče specifične električne provodljivosti, najviša vrednost je izmerena u kišnici sa lokacije pećina Peč, a najniža u kišnici sa lokacije Mokra. Srednja vrednost koncentracije bikarbonata u kišnici sa lokacije pećine je viša i iznosi 14,71 mg/l, srednja koncentracija kalcijuma i magnezijuma su takođe, više na lokaciji pećine i iznose 5,84 mg/l tj. 1,43 mg/l.

Tabela 7.15. Vrednosti osnovnih fizičko-hemijskih parametara i određenih jona u kišnici

	datum	pH	Ec	HCO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	tvrdća
			$\mu\text{S}/\text{cm}$	mg/l	mg/l	mg/l	$^\circ\text{dH}$
lokacija Mokra	2.1.2018.	6,80	12	3,05	3,60	1,70	0,90
	2.2.2018.	5,45	11	6,10	3,00	0,90	0,60
	10.3.2018.	6,35	26	15,25	3,40	0,70	0,60
	7.4.2018.	5,60	41	12,20	4,00	1,30	0,90
	9.5.2018.	5,45	73	21,36	10,40	2,70	2,10
	16.6.2018.	6,65	20	21,36	5,60	0,90	1,00
	18.7.2018.	6,60	71	15,25	4,60	1,30	1,00
	<i>max</i>	<i>6,80</i>	<i>73</i>	<i>21,36</i>	<i>10,40</i>	<i>2,70</i>	<i>2,10</i>
	<i>min</i>	<i>5,45</i>	<i>11</i>	<i>3,05</i>	<i>3,00</i>	<i>0,70</i>	<i>0,60</i>
	<i>sr. vrednost</i>	<i>6,13</i>	<i>36</i>	<i>13,51</i>	<i>4,94</i>	<i>1,36</i>	<i>1,01</i>
lokacija pećina Peč	2.1.2018.	6,95	15	4,27	4,40	2,20	1,10
	2.2.2018.	5,60	67	12,20	4,00	1,80	1,00
	2.2.2018.*	6,50		6,10	1,00	0,60	
	7.4.2018.	5,75	43	21,36	5,20	2,40	1,30
	10.5.2018.	5,60	82	24,41	10,80	2,10	2,00
	16.6.2018.	6,80	18	21,36	5,20	1,10	1,00
	18.7.2018.	6,75	27	15,25	7,60	0,50	1,20
	14.8.2018.	6,70	33	15,25	7,00	0,60	1,10
	14.9.2018.	6,75	77	12,20	7,40	1,60	1,40
	<i>max</i>	<i>6,95</i>	<i>82</i>	<i>24,41</i>	<i>10,80</i>	<i>2,40</i>	<i>2,00</i>
	<i>min</i>	<i>5,60</i>	<i>15</i>	<i>4,27</i>	<i>1,00</i>	<i>0,50</i>	<i>1,00</i>
	<i>sr. vrednost</i>	<i>6,38</i>	<i>45</i>	<i>14,71</i>	<i>5,84</i>	<i>1,43</i>	<i>1,26</i>

*vrednosti izmerene u otopljenom snegu

7.7. Rezultati sprovedenih eksperimenata

Kako bi se proverila mogućnost prečišćavanja podzemne vode i u okviru nadizdanske zone, čiji je sastavni deo epikarst sprovedena su dva opita u prirodnim uslovima. Na ovaj način su dobijeni podaci pomoću kojih je određen vremenski okvir u kojem se procesi izmene kvaliteta odigravaju, kao i u kojoj meri se dešavaju u epikarstu.

Prvo je sproveden opit trasiranja pomoću Na-fluoresceina da bi se odredila brzina kretanja „nadizdanskog“ toka na lokaciji pećine Peč, a nakon toga na istoj lokaciji je sproveden opit sa „lakim“ kontaminantom, pomoću kojeg je definisana brzina kretanja zagađujuće supstance i

proces njenog menjanja u funkciji vremena tj. dužine puta kroz podzemlje. Nakon obavljenih opita sprovedena je kvantitativna i kvalitativna analiza dobijenih podataka.

Rezultati terenskih eksperimenata su dalje iskorišćeni za formiranje fizičkog modela, koji simulira epikarst u laboratorijskim uslovima. Model je simulirao prirodne uslove filtracije vode sa kontaminantom hemijskog porekla. U budućnosti će pomoći da se prikažu različite ekscesne situacije sa različitim kombinacijama kontaminanata u laboratorijskim uslovima.

7.7.1. Rezultati terenskih eksperimenata

7.7.1.1. Opit trasiranja

Opit trasiranja je izveden na lokaciji pećine Peč, koja se nalazi u ataru sela Bežište, a koja je detaljno opisana u poglavlju 7.2. Ova lokacija je odabrana, jer omogućava da se na malom prostoru i uz minimalnu upotrebu opreme izvede opit obeležavanja u okviru nadizdanske zone i isprati kretanje infiltrirane vode kroz povlatne slojeve pećine sačinjene od zemljišta, epikarsta i karstifikovanog krečnjaka, i njeno prikupljanje na mestima gde je voda kapala sa tavanice pećine. Na osnovu trenskih istraživanja i iskustva drugih istraživača, koji su se bavili sličnim istraživanjima (Kogovšek & Šebela, 2004; Kogovšek, 2010) izabrana je mikrolokacija, za nalivanje pripremljenog trasera. Mikrolokacija za unošenje trasera se nalazila na površi iznad pećine na udaljenju od 20 metara od vertikalnog odseka iznad ulaza u pećinu Peč, koliko u stvari iznosi i dužina pristupačnog pećinskog kanala/dvorane (Slika 7.85.). Odabirom ove mikrolokacije omogućeno je da cela dužina tavanice pećine bude poligon za prikupljanje uzoraka procedne vode koja bi nosila traser. Tokom opita trasiranja, osim uzimanja uzoraka za precizno određivanje koncentracije korišćenog trasera Na-fluoresceina, vršeno je i merenje specifične električne provodljivosti i temperature vode.

Transport opreme do pećine Peč, koja je bila potrebna za obavljanje opita je obavljen 16. i 17. februara 2019. godine, kada je preneti voda, posude za prikupljanje procedne vode, levci i bočice za uzorke, kao i oprema za kampovanje.

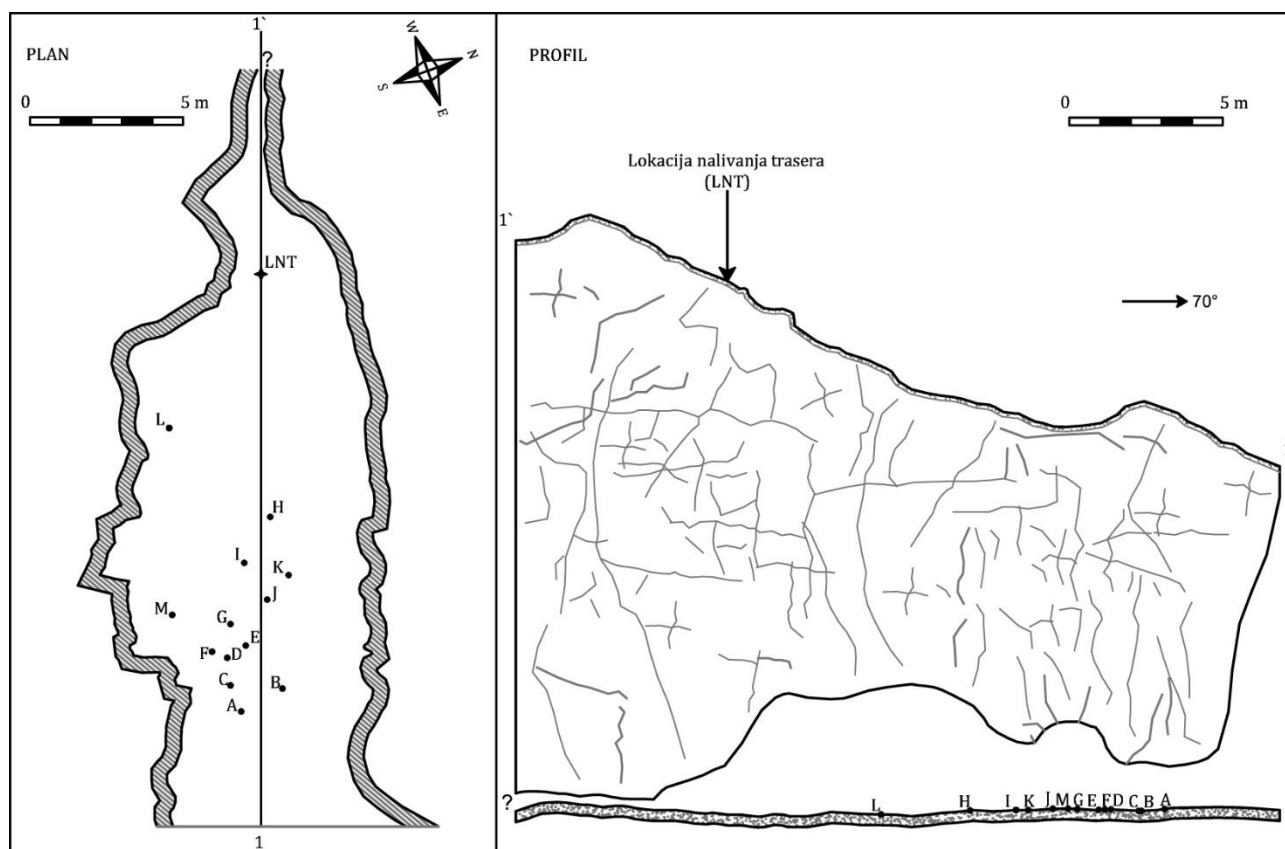
Na lokacijama unutar pećine Peč, na kojima su uočeni tragovi kapanja vode postavljene su posude 16. februara (Slika 7.85. i Slika 7.86.) da bi se odredile količine vode koje se proceduju, i na taj način definisale lokacije na kojima će biti moguće vršiti uzorkovanje vode tj. lokacije na kojima se procedi dovoljno vode za uzimanje uzorka, u toku monitoringa. Na početku je uočeno 13 lokacija na kojima su postavljene posude, a tačke su označene slovima abecede od A do M (Slika 7.85.). Lokacija na kojoj su bili uočljivi tragovi kapanja vode, a koja je bila najdalja od ulaza pećine Peč je lokacija L, lokacija najbliža ulazu je lokacija A. U periodu 16-17. februar je praćeno punjenje posuda procednom vodom i na osnovu količina vode koja se u posudama nakupljala i njihovog položaja unutar pećine, odlučeno je da se uzorci za analizu uzimaju na lokacijama A, B, C, D, F, G, H, I, L i M. Količine vode koje su procedivale su varirale od lokacije do lokacije i iznosile su od 0,0001 l/s do 0,0006 l/s (0,66 l/h do 2,4 l/h). Sumarna količina vode koja se procedivala na početku opita iznosila je oko 25 l/h. Međutim, tokom vršenja monitoringa uočeno je konstantno opadanje količina vode koje se proceduju, tako da je na lokacijama A, B, G i M, bilo moguće samo povremeno uzorkovanje procedne vode za proveru sadržaja Na-fluoresceina, a na lokacijama E, J i K, nije bilo moguće izmeriti specifičnu električnu provodljivost i temperaturu vode u nekoliko vremenskih preseka. Poslednjeg dana opita 23.2.2019. godine količina vode je na svim lokacijama drastično opala, tako da su količine procedne vode iznosile, od lokacije do lokacije, između 0,18 i 0,36 l/h. Sumarna količina vode koja se procedivala na kraju opita iznosila je oko 6 l/h.

Prikupljanje nultog uzorka je obavljeno u 12 časova 17. februara na svih 10 lokacija. Uzorkovanje je obavljeno i sledećeg dana u 12h, nakon čega je organizovano i izvršeno nalivanje rastvora boje na odabranoj mikrolokaciji (lokacija nalivanja trasera - LNT) iznad pećine Peč.

Boja je rastvorena na licu mesta u neposrednoj blizini mikrolokacije, koja je odabrana za unošenje rastvora u sredinu. U posudu zapremine 10l dodato je 50 g Na-fluoresceina. U cilju bolje rastvorljivosti, fluorescein je prethodno rastvoren u alkoholu (Slika 7.87. gore). Takođe, u sklopu priprema i organizacije opita trasiranja napravljeni su standardi trasera određenih koncentracija za vizuelno osmatranje pojave trasera uz pomoć fluo-lampe (Slika 7.87. dole).

Nalivanje fluorescentne boje je izvršeno 18.2.2019. godine u 13h (Slika 7.87.), nakon čega je na istoj mikrolokaciji nasuto još 80 litara čiste vode, da bi se pospešilo kretanje trasera, u zimskim uslovima koji su vladali na terenu. Za pospešivanje kretanja trasera iskorišćena je podzemna voda sa vrela Bežište, čija je specifična električna provodljivost iznosila 537 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Uzorci vode su prikupljeni u određenim vremenskim razmacima i vizuelno osmatrani pomoću fluo-lampe na prisustvo obeleživača do 23.2.2019. godine u 10h. Uzorci su kasnije poslani na preciznu determinaciju sadržaja Na-fluoresceina pomoću fluorometra u okviru Laboratorije HET.



Slika 7.85. Plan i profil pećine Peč, sa lokacijom nalivanja trasera (LNT) i lokacijama na kojima je vršeno uzorkovanje



Slika 7.86. Priprema lokacija za prikupljanje uzoraka procedne vode



Slika 7.87. Priprema trasera za opit (gore) i „standarda“ za vizuelno osmatranje pojave trasera (dole)

Uzimanje prvog uzorka vode je obavljeno u 14 h, na svih 10 prethodno određenih lokacija, a zatim nastavljeno u određenim vremenskim razmacima u skladu sa brzinom punjenja posuda (na 2 do 4 sata) tokom 18. i 19. februara (Slika 7.89.). Između svaka dva uzorkovanja celokupna oprema za prikupljanje uzoraka (plastične posude i levci) je ispirana destilovanom vodom, da bi se uklonili tragovi trasera, ukoliko ih je bilo u prethodnom uzorku.



Slika 7.88. Nalivanje rastvora trasera na lokaciji iznad pećine, uz „ispiranje“ čistom vodom

Pojavljivanje trasera je praćeno vizuelnim ispitivanjem prikupljenih uzoraka pomoću fluo-lampe (Slika 7.90.) na kraju svakog ciklusa od 24h.



Slika 7.89. Prikupljanje uzoraka tokom opita trasiranja



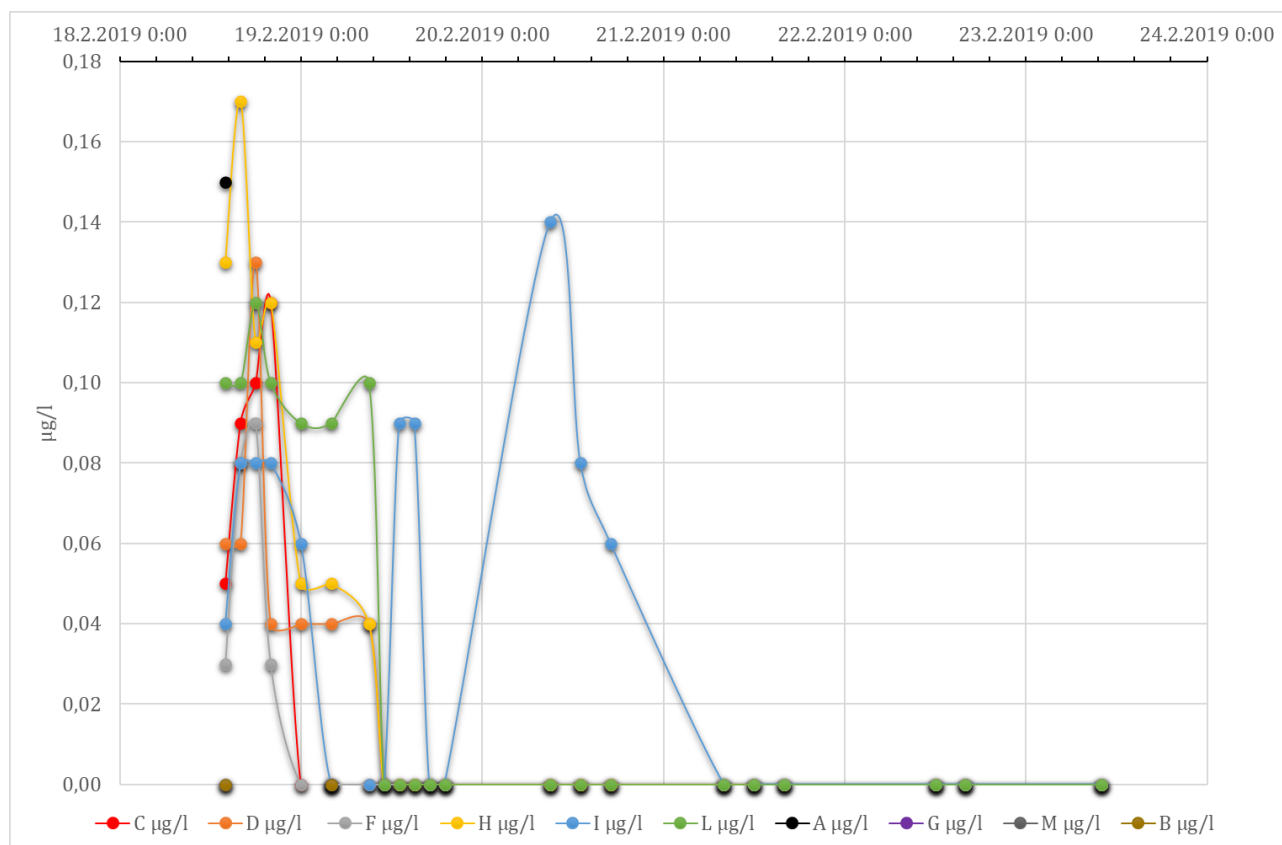
Slika 7.90. Vizuelno ispitivanje prikupljenih uzoraka pomoću fluo-lampe i prikupljeni uzorci

S obzirom da u poslednja dva uzorka uzeta 19. februara, pomoću fluo-lampe nije bio uoćen traser, frekvencija uzorkovanja je tokom 20. februara smanjena, međutim, u uzorcima od 20. februara je detektovano prisustvo Na-fluoresceina, pa je uzorkovanje nastavljeno i 21. i 22. februara. S obzirom da u uzorcima od 21. i 22. februara ipak nije ustanovljena nova pojava trasera, poslednji uzorak je uzet 23. februara u 10h.

Tokom monitoringa se pokazalo da na nekim lokacijama, ipak, nema dovoljno vode u posudama za uzimanje uzorka u istim vremenskim presecima, pa je uzorkovanje istovremeno obavljano samo na lokacijama C, D, F, H, I i L, a na lokacijama A, B, G i M uzorak je osim u prvom intervalu uzet još jednom 19.2.2019. godine u 4h. Uzorkovanje je u početku vršeno na svaka 2 sata, međutim, količina procedne vode se smanjila tokom noći, a onda ponovo povećala tokom sledećeg dana, ali nije se izjednačila sa početnom većom količinom. Tako da je interval uzorkovanja promenjen u skladu sa promenama količine vode koja je procurivala.

Pojavljivanje obeleživača je prikazano na dijagramima isticanja trasera (Slike 7.91.). Sa dijagrama se vidi pojavljivanje trasera na više lokacija na početku uzorkovanja 18.2.2019. godine u 14h, a kasnije se koncentracije trasera i lokacije pojavljivanja menjaju od jednog vremenskog preseka do drugog.

Uočava se da je traseru trebao samo 1 sat (verovatno i manje) da stigne do skoro svih delova pećine (Slika 7.91.), jer je nalivanje trasera obavljeno u 13h, a uzimanje prvog uzorka u 14h. Natrijum fluorescein je detektovan u uzorcima sa lokacija: A, C, D, F, H, I i L, u određenim koncentracijama, dok na lokacijama B, G i M nije bio detektovan ni u jednom uzorku.



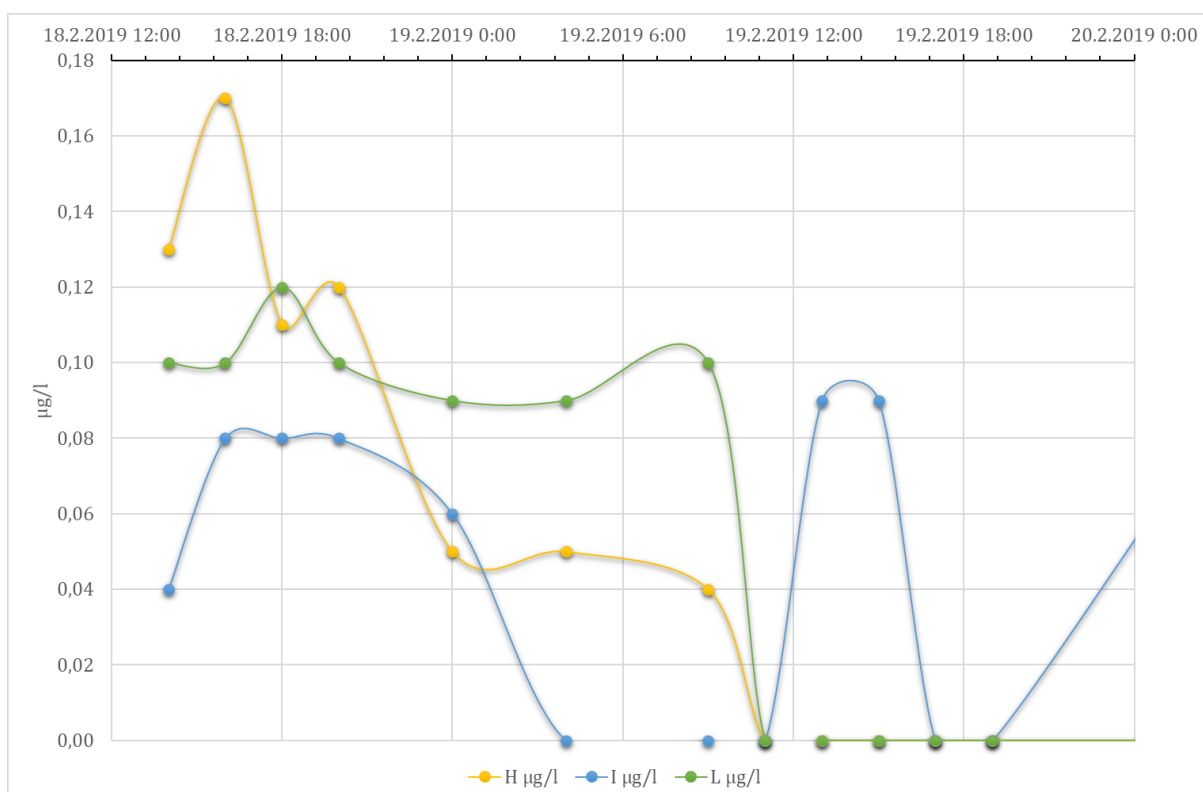
Slika 7.91. Dijagram isticanja Na-fluoresceina, na izdvojenim lokacijama unutar pećine Peč

Moguće je izdvojiti tri grupe lokacija prema položaju u pećini i prema količini vode koja se proceđivala: prva grupa H, I i L; druga grupa C, D i F; treća grupa A, B, G i M. Stoga su određeni delovi dijagrama (Slika 7.91.) podeljeni prema lokacijama i vremenskim presecima da bi se lakše pratilo kretanje koncentracije Na-fluoresceina prema lokacijama (Slike 7.92-7.94.).

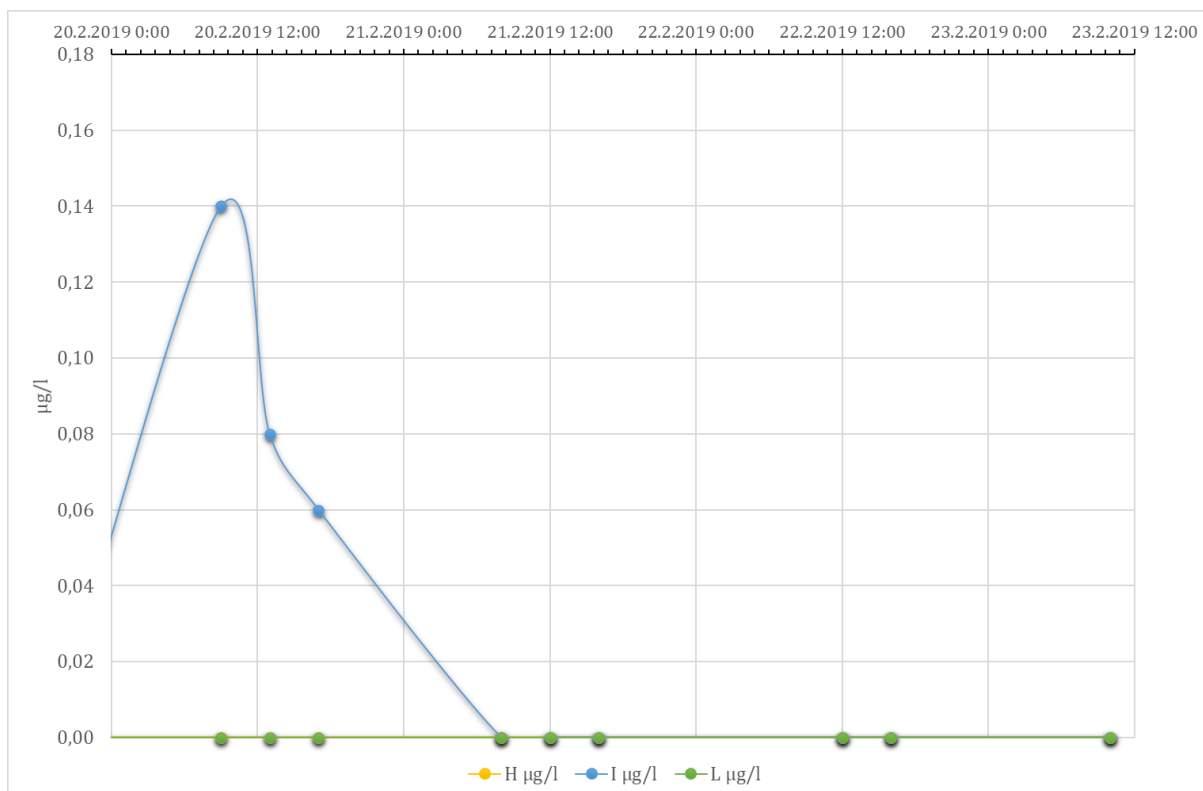
Na lokacijama grupe: H, I, L, traser se pojavio u prvom uzorku (Slike 7.92. i 7.93.), a najveća koncentracija je bila na lokaciji H (0,13 µg/l). Najviša koncentracija obeleživača, uopšte, tokom monitoringa je zabeležena na lokaciji H u 16h 18.2.2019. godine (0,17 µg/l), nakon čega su na toj lokaciji beležene niže koncentracije sve do 9h 19.2.2019. godine i od tog momenta Na-

fluorescein nije detektovan. Uočava se da se traser na lokaciji I pojavljuje u tri talasa (u određenim uzorcima nije detektovan traser), pri čemu je koncentracija u drugom talasu (0,09 $\mu\text{g/l}$) veća nego prilikom prvog pika na toj lokaciji (0,08 $\mu\text{g/l}$), a u trećem (0,14 $\mu\text{g/l}$) veća nego u drugom (Slike 7.92. i 7.93.). Na toj lokaciji je traser, takođe, detektovan poslednji put 53 sata nakon nalivanja. Na drugim lokacijama, na kojima se traser pojavljivao u nekom trenutku, poslednji uzorci sa bojom su detektovani 21 sat nakon nalivanja traser. To je bio i slučaj sa lokacijom L, na kojoj je obeleživač prvi put detektovan 18.2.2019. godine u 14h, u koncentraciji 0,10 $\mu\text{g/l}$, a poslednji put 19.2.2019. godine u 9h, dok je najveća koncentracija od 0,12 $\mu\text{g/l}$ zabeležena 18.2.2019. godine u 18h.

Kriva intenziteta obeleživača na lokaciji H, ukazuje da voda do ove lokacije kretala dispergovanim sistemom pukotina i kaverni (Milanović P, 1979), kriva intenziteta sa lokacije I ima slične odlike, jedino su koncentracije iz talasa u talas pojavljivanja traser veće, pa se može pretpostaviti da je to posledica toka kroz šupljine sa većim gradijentom. Kriva intenziteta traser na lokaciji L pokazuje razvučeniji talas, bez dovoljno izraženog maksimuma (iako postoji jedan pik), što indikuje sporiji tok vode ka toj lokaciji ili su kaverne manjih dimenzija od onih koje vode ka lokaciji H.



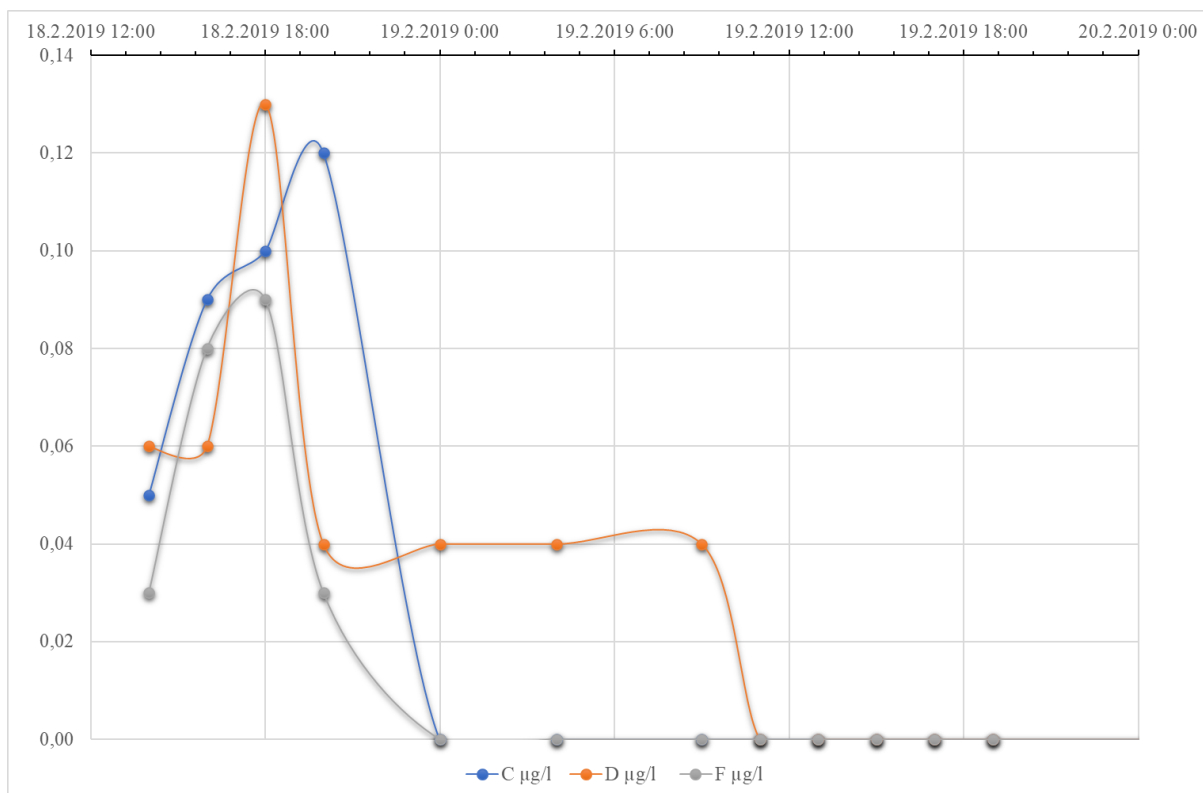
Slika 7.92. Dijagram isticanja Na-fluoresceina, na lokacijama H, I, L, u periodu 18.2.-20.2.2019. godine



Slika 7.93. Dijagram isticanja Na-fluoresceina, na lokacijama H, I, L, u periodu 20.2.-23.2.2019. godine

Traser je na lokacijama grupe: C, D i F (bliže ulazu u pećinu) detektovan u istom trenutku (Slike 7.94. i 7.95.) u prvom uzorku nakon nalivanja rastvorenog obeleživača, a najveća koncentracija je bila na lokaciji D. Na lokacijama D i F pik je traser dostigao 18.2.2019. godine u 18h, na lokaciji D je konstatovana i najveća koncentracija u ovoj grupi (0,13 µg/l), dok je pik na lokaciji C (0,12 µg/l) postignut istog dana u 20h. Na lokacijama C i F Na-fluorescein nije više detektovan ni jednom uzorku nakon 18.2.2019. godine u 20h, dok je na lokaciji D bio prisutan u uzorcima do 19.2.2019. godine u 9h (Slika 7.94.).

Kriva intenziteta trasera na lokaciji C, ukazuje na talas gde koncentracija u svakom sledećem uzorku raste i nakon izraženog maksimuma naglo opada (Milanović P, 1979), kriva intenziteta sa lokacije D ima slične odlike, jedino pad koncentracije trasera nije nagao, pa se može pretpostaviti da je to posledica toka kroz šupljine manjeg promera od onih kojima je voda dospela na lokaciju C, s obzirom da je rastojanje od lokacije C do lokacije D samo 0,9 metara. Kriva intenziteta trasera na lokaciji F je potpuno istih odlika kao na lokaciji C, jedino su koncentracije niže, što znači da je voda ka toj lokaciji, takođe, prolazila kroz kaverne manjih dimenzija.



Slika 7.94. Dijagram isticanja Na-fluoresceina, na lokacijama C, D, F, u periodu 18.2.-20.2.2019. godine

U trećoj grupi lokacija: A, B, G, M, u kojoj su prikupljene najmanje količine vode u posudama, pa je i broj uzoraka najmanji (Slika 7.95.), traser je detektovan samo na lokaciji A, u prvom uzorku, koji je uzet nakon nalivanja trasera, u koncentraciji od 0,15 µg/l.

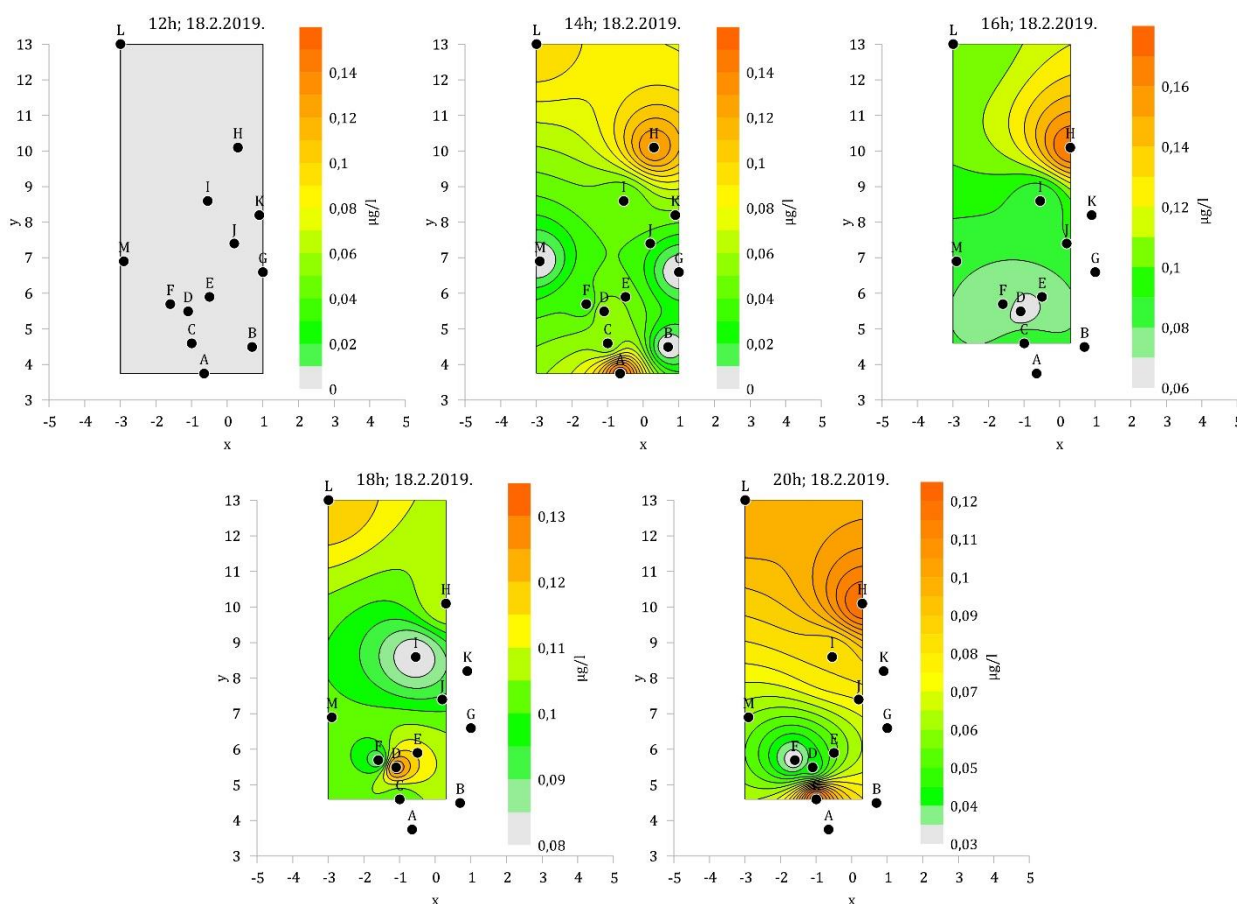


Slika 7.95. Dijagram isticanja Na-fluoresceina, na lokacijama A, B, G, M, u periodu 18.2.-20.2.2019. godine

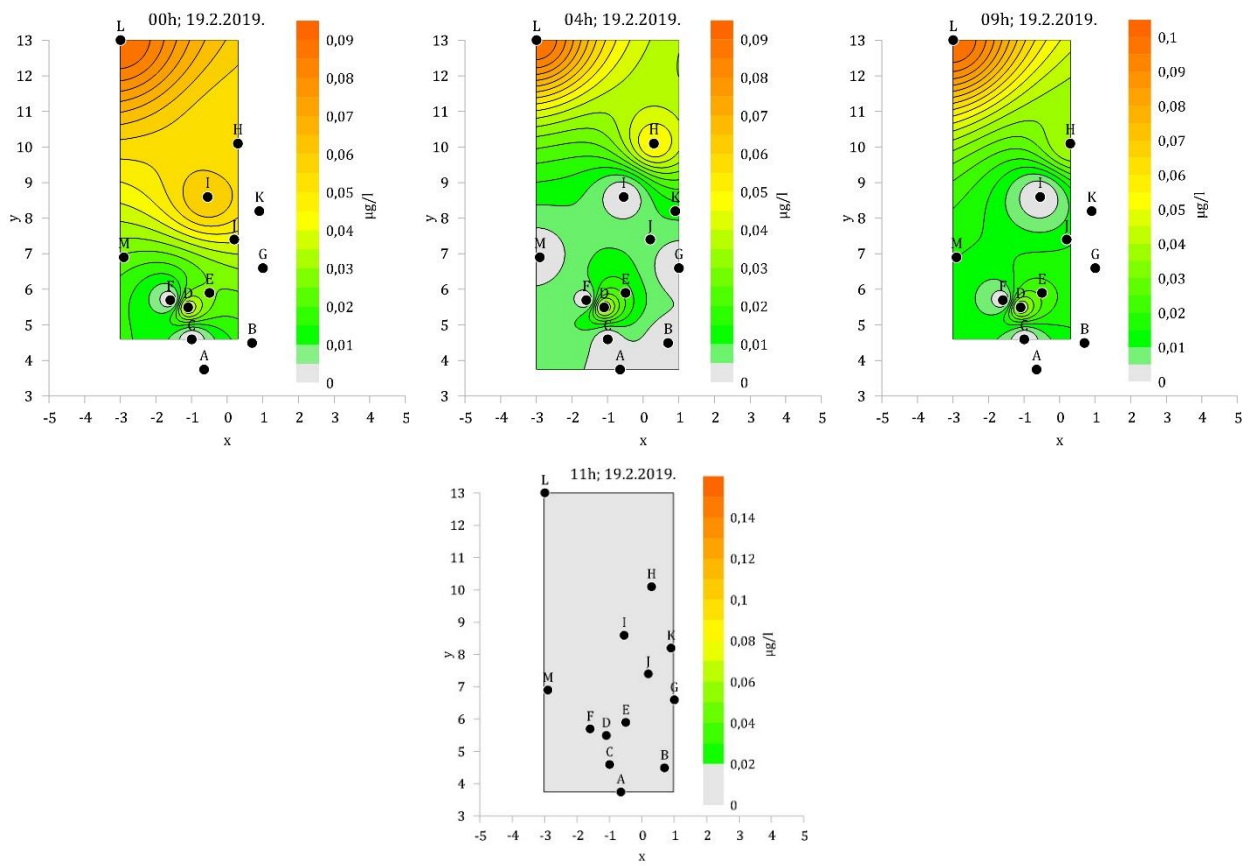
Činjenica je da je traser za najviše 1 sat prešao pravolinijsku distancu od 17 metara, do mesta procurivanja, na tavanici iznad lokacije H (gde je zabeležena najveća koncentracija), a da je detektovan i na lokaciji A (pravolinijsko rastojanje 22 metra) i na lokaciji L (15 metara) u istoj seriji uzoraka. Stoga se vrednost proračunate fiktivne brzine kretanja vode kroz sloj epikarsta i karstifikovanog krečnjaka, na lokaciji pećine Peč, kreće u intervalu od 0,0041 m/s do 0,0060 m/s, što je u skladu sa vrednostima koje su dobijene tokom opita trasiranja za određene karstne izdani na prostoru Karpato-balkanida na teritoriji Srbije (0,0045-0,222 m/s; Stevanović, 1991).

Osim gore navedene kvalitativne analize izvršena je i kvantitativna analiza opita trasiranja (Milanović P, 1979), na osnovu koje je zaključeno da je oko 3,5% trasera isteklo tokom opita trasiranja. Razlog ovako male količine isteklog trasera se može naći u delimičnoj adsorpciji trasera na čestice zemljišta (*terra rosa* ili minerale glina) koje se nalaze u epikarstu i suspendovane u vodi (Milanović P, 1981) i razgranatosti mreže kanala, koji su sifonskog karaktera u određenim delovima, pa kada traser dospe u kanal ne može da nastavi kretanje dok ne dođe do infiltracije veće količine vode sa površine i povećanja pritiska.

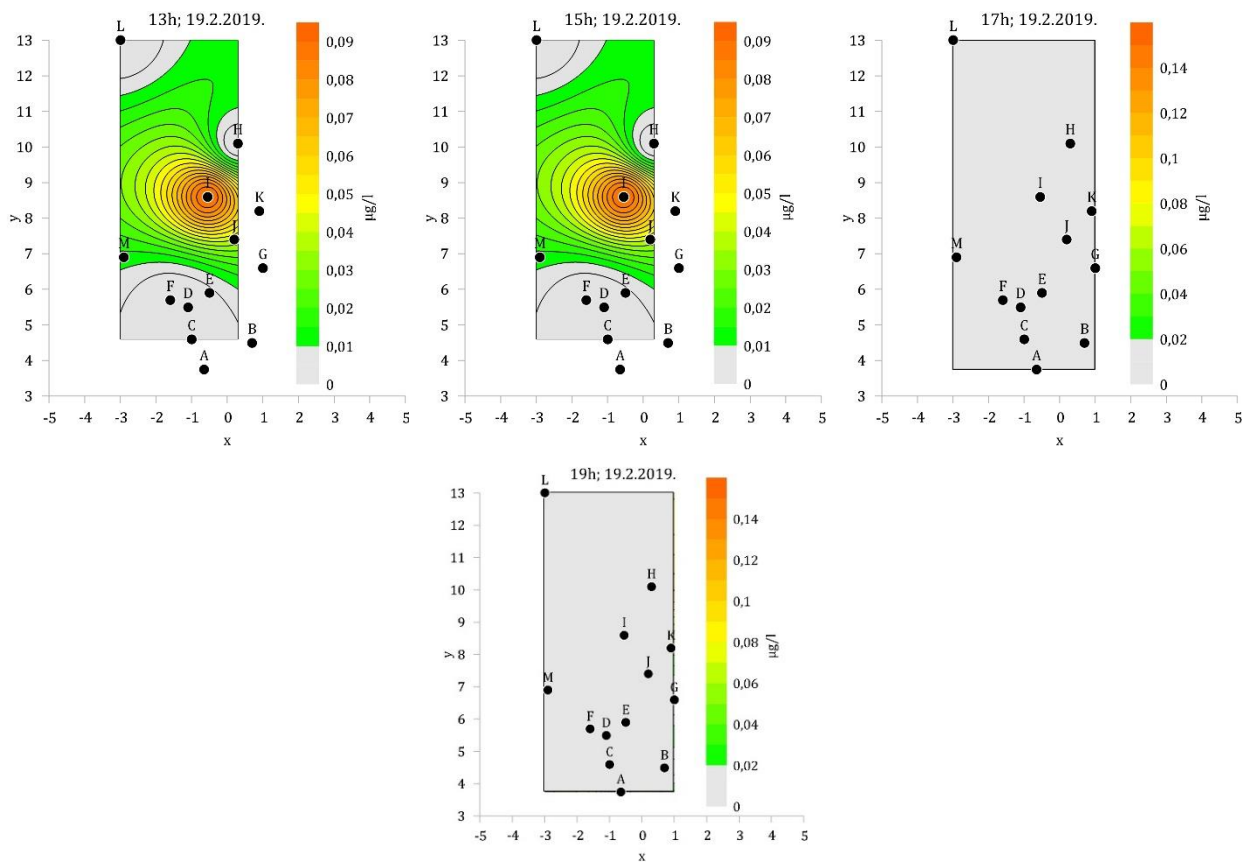
Napravljene su karte izolinija koje pokazuju promenu koncentracije obeleživača u vremenu i u okviru prostora pećine Peč na lokacijama od A do M (Slika 7.96.-7.100.), pri čemu su koordinate tačaka prikazane u lokalnom referentnom sistemu u odnosu na tačku ulaza u pećinu Peč, kojoj su za ove potrebe dodeljene koordinate (0, 0). Prikazane su karte za sve vremenske preseke uzorkovanja zaključno sa 21.2.2019. godine u 8h, jer je to prvi vremenski presek nakon koga traser nije detektovan ni na jednoj lokaciji do kraja monitoringa.



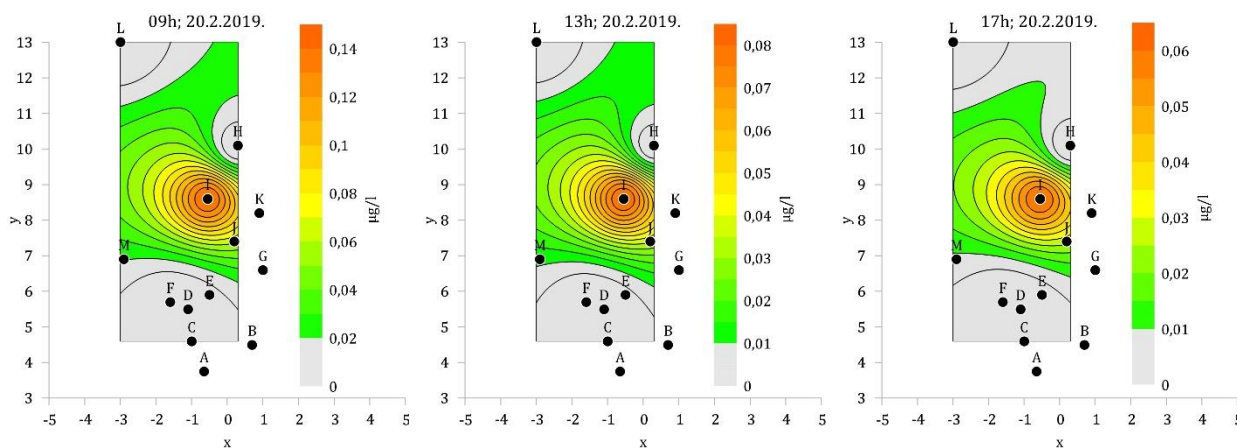
Slika 7.96. Koncentracija obeleživača tokom 18.2.2019. godine u pećini Peč (lokacije sa Slike 7.85.)



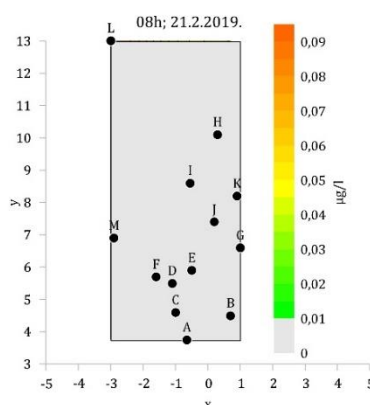
Slika 7.97. Koncentracija obeleživača tokom 19.2.2019. godine u pećini Peč (lokacije sa Slike 7.85.)



Slika 7.98. Koncentracija obeleživača tokom 19.2.2019. godine u pećini Peč (lokacije sa Slike 7.85.)

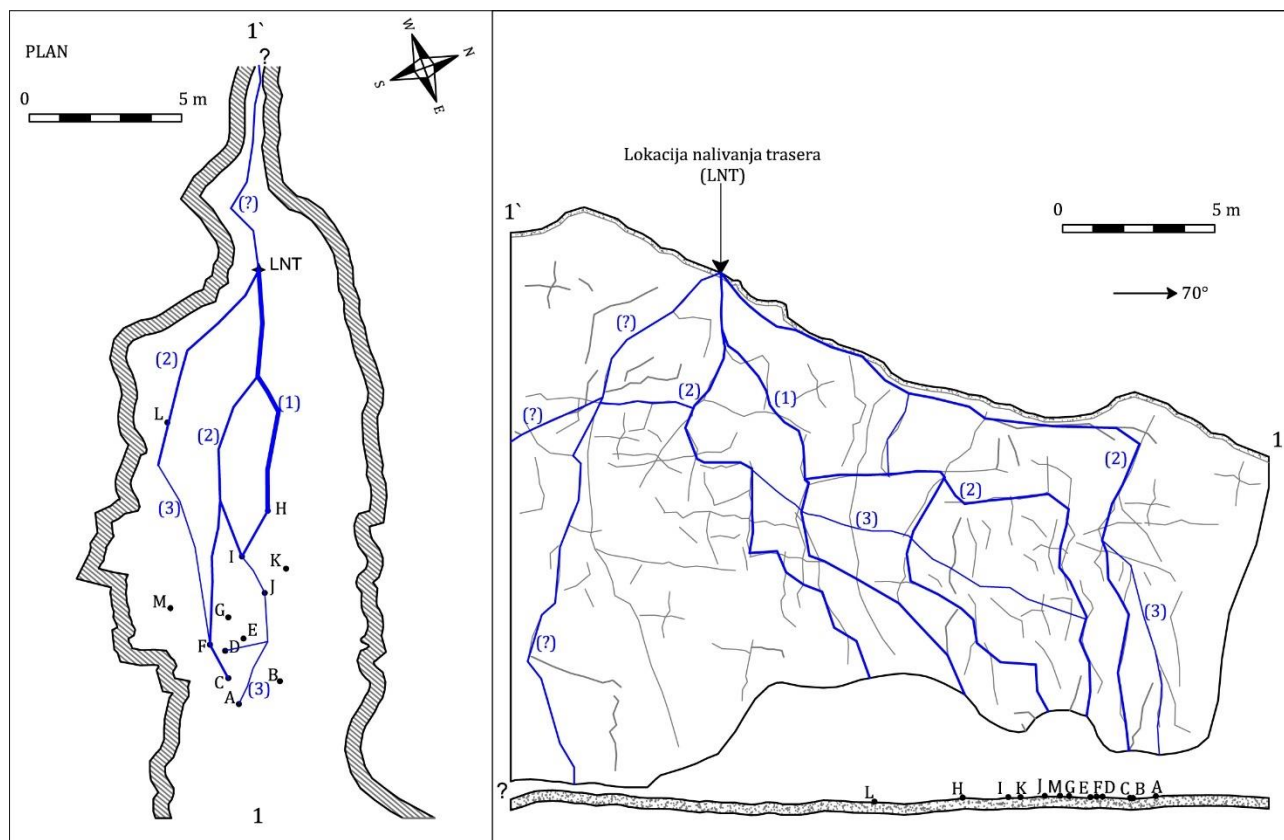


Slika 7.99. Koncentracija obeleživača tokom 20.2.2019. godine u pećini Peč (lokacije sa Slike 7.85.)



Slika 7.100. Koncentracija obeleživača tokom 21.2.2019. godine u pećini Peč (lokacije sa Slike 7.85.)

Na osnovu ovih rezultata može se zaključiti da je sistem pukotina i kaverni, dobro razvijen u povlatnim slojevima pećine, kao i da je epikarst vrlo dobro razvijen (Slika 7.101.). Najverovatnije su prisutni i tzv. drenovi (kanal 1 na slici 7.101.), koji vodu brzo sprovode iz gornjih slojeva zemljišta kroz epikarst i nadizdansku zonu do mesta isticanja vode. Pravac označen sa (1) oslikava pravac kretanja podzemne vode do lokacije H, gde je zabeležena najveća koncentracija trasera. Pravci označeni sa (2) prikazuju pravce kretanja do preostalih 5 lokacija na kojima je vršen konstantni monitoring, a pravci označeni sa (3) označavaju šupljine najmanjeg promera tj. pravce kojima voda najduže putuje do pojavljivanja na tavanici pećine Peč. Distanca koju podzemna voda prelazi od mesta infiltriranja (LNT) do mesta pojavljivanja na tavanici pećine, utiče na vreme koje voda provodi u podzemlju, ali je prohodnost i veličina šupljina (kanali (1) i (2), na slici 7.101.) kojima se voda kreće primaran faktor u ovom slučaju. Na kraju treba napomenuti da verovatno postoje i kanali kojima se podzemna voda kretala ka dubljim delovima pećine (kanali (?), na slici 7.101.), a čije se pojavljivanje u vidu prokapne vode nije moglo ispratiti i izmeriti usled malih dimenzija kanala koji postoji na kraju pećine Peč.



Slika 7.101. Pretpostavljena mreža kanala kojima se kretao traser, kroz tavanicu pećine Peč; (1) – primarni kanali (drenovi), (2) – primarni kanali, manjih dimenzija, (3) – sekundarni kanali, (?) – pretpostavljeni kanali kojima se kreće podzemna voda

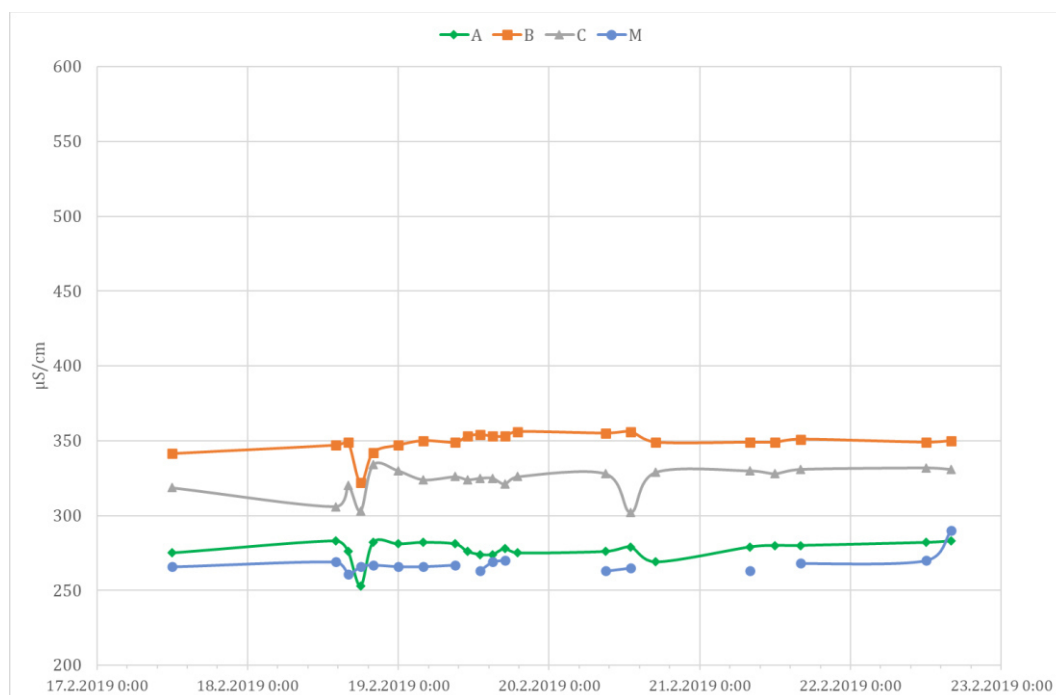
Merenja specifične električne provodljivosti (E_c) su vršena u istim vremenskim intervalima (Slika 7.102.), kada je vršeno i uzorkovanje vode, osim u slučajevima kada nije bilo dovoljno vode u posudama, npr. u posudi K posle merenja 19.2.2019. godine u 17h nije više bilo vode. Rezultati merenja pokazuju na određenu konstantnost veličine specifične električne provodljivosti na jednoj lokaciji, ali i razliku između „susednih“ lokacija (Slike 7.103.-7.105.).



Slika 7.102. Merenja temperatura i specifične električne provodljivosti proceđne vode, tokom opita

Najveće vrednosti su beležene na lokaciji H (504-514 $\mu\text{S}/\text{cm}$), a najniže na lokaciji A (253-283 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Slično kao i kod praćenja koncentracije trasera i količine vode u posudama i kod

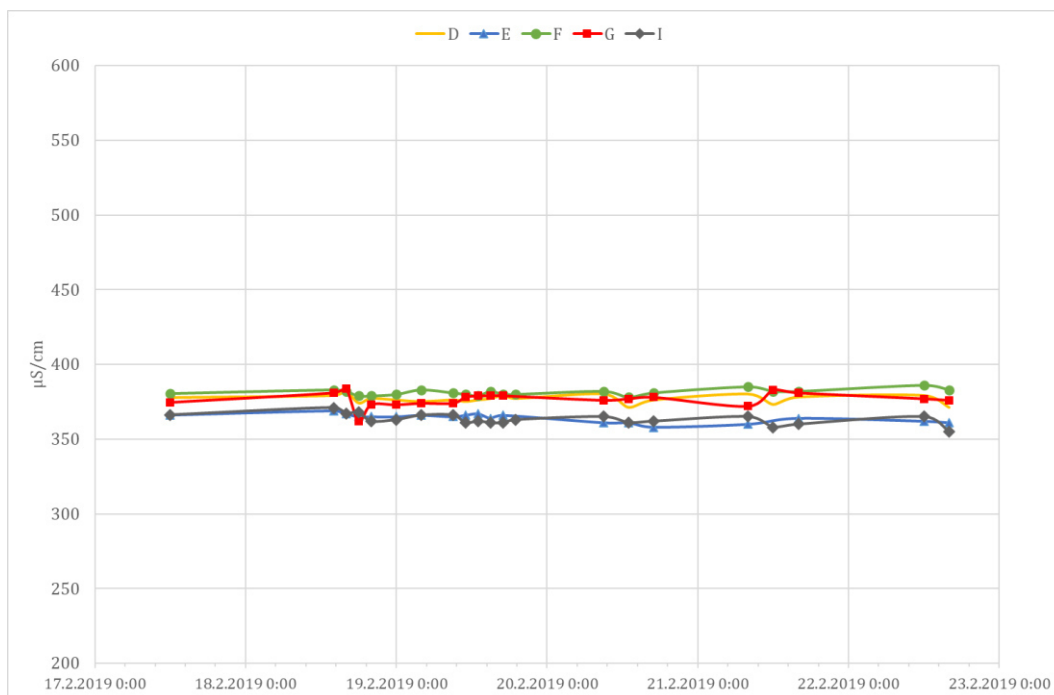
izmerenih vrednosti specifične električne provodljivosti uočene su određene pravilnosti. U skladu sa izmerenim vrednostima kreirane su grupe lokacija sa sličnim vrednostima: grupa 1: lokacije A, B, C i M, vrednosti E_c ispod $360 \mu\text{S}/\text{cm}$; grupa 2: lokacije D, E, F, G i I, vrednosti E_c između 355 i $390 \mu\text{S}/\text{cm}$; grupa 3: lokacije H, J, K, L, vrednosti E_c iznad $410 \mu\text{S}/\text{cm}$.



Slika 7.103. Dijagram vrednosti specifične električne provodljivosti na lokacijama A, B, C, M

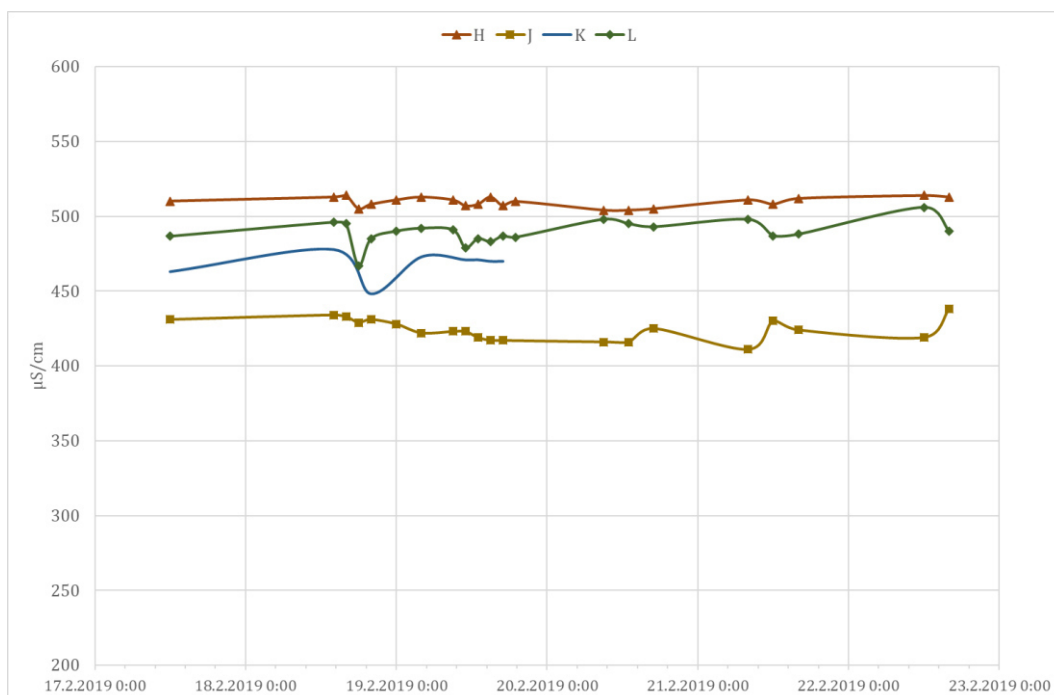
Grupa lokacija 1 uslovno se može posmatrati kao najbliža ulazu, a istovremeno to su lokacije iznad kojih se nalazi najdeblji sloj karstifikovanog krečnjaka, što verovatno utiče na ujednačene i niže vrednosti merenja E_c na ovim lokacijama (Slika 7.103). S obzirom na to da je traser detektovan samo na lokacijama A (jednom) i lokaciji C, možemo pretpostaviti da kanali koji se dreniraju nad ovim lokacijama ne pripadaju glavnoj mreži kanala (osim lokacije C), pa se verovatno na njima brzo drenira voda koja se infiltrirala direktno iznad lokacija, i samim tim nije mogla da se obogati mineralima, čija bi se koncentracija odrazila na merenja specifične električne provodljivosti. Lokacija M, je u grupu 1 uvrštena zbog niskih vrednosti E_c , iako se nalazi malo dalje od ulaza u pećinu. Razlog niskih vrednosti je verovatno brzo dreniranje infiltrirane vode, koja je u šupljine unutar tavanice pećine ušla direktno iznad lokacije M.

Lokacije dublje unutar pećine (grupa 2) imaju vrednosti specifične električne provodljivosti između 355 - $390 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Slika 7.104.), pokazuju jako slične odlike u pogledu izmerenih vrednosti specifične električne provodljivosti, iako su lokacije D, F i I deo glavne mreže kanala, a E i G nisu. Voda koja se drenira na ovim lokacijama je imala dovoljno vremena da homogenizuje svoj sastav u pogledu rastvorenih mineralnih materija, što vidimo i po jako malim promenama u vrednostima E_c , koje su merene na svakoj lokaciji.



Slika 7.104. Dijagram vrednosti specifične električne provodljivosti na lokacijama D, E, F, G, I

Lokacije koje su najdalje od ulaza u pećinu (grupa 3) imaju vrednosti specifične električne provodljivosti između 411-514 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Slika 7.105.). Lokacije H i L su deo primarne mreže kanala, od čega je lokacija H najbolje povezana sa površinom terena. Sa druge strane lokacija K se nalazi van glavne mreže, a s obzirom na to da je voda na toj lokaciji prestala da se proceđuje tokom drugog dana opita, možemo reći da je deo mreže kanala koji imaju samo lateralnu povezanost sa kanalima sekundarne mreže. Debljina nadsloja iznad lokacija H i L je oko 5 metara, pa se vrednost E_c u vodi, iako prolazi kroz epikarst i krečnjačke kanale, nije bitno promenila u odnosu na vrednost koja je zabeležena u vodi koja je nalivena zajedno sa traserom.

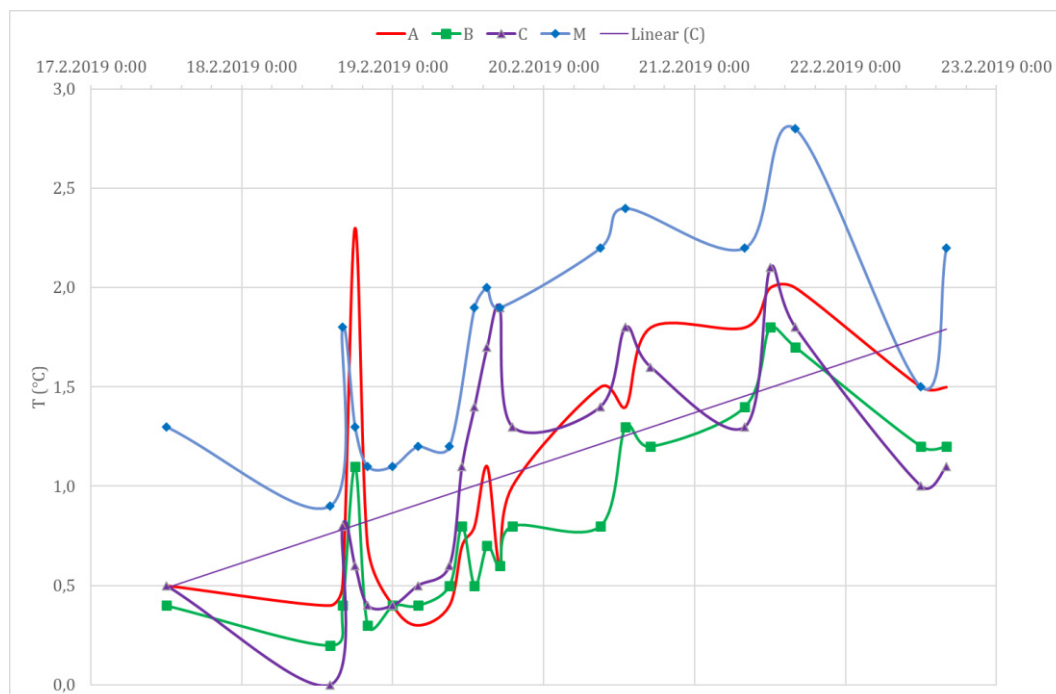


Slika 7.105. Dijagram vrednosti specifične električne provodljivosti na lokacijama H, J, K, L

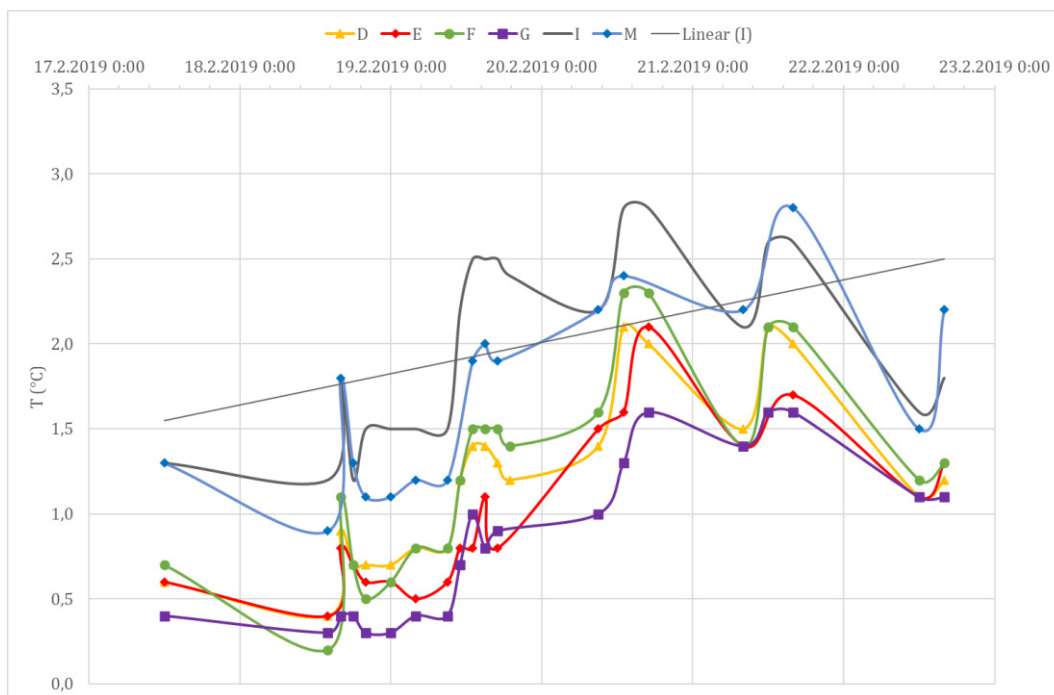
Izmerene vrednosti specifične električne provodljivosti ukazuju na različite debljine sloja epikarsta i karstifikovanog krečnjaka u povlati pećine. Lokacije koje su svrstane u grupu 1, sa

najnižim izmerenim vrednostima E_c , predstavljaju lokacije na kojima se infiltrirana voda brzo drenira kroz pukotine i kaverne karstifikovanog krečnjaka, pa nije mogla da se obogati mineralima. Epikarst je iznad ovog dela pećine slabije razvijen ili mnogo manje debljine. Na lokacijama svrstanim u grupu 2 vrednosti specifične električne provodljivosti su malo više, jer je infiltrirana voda imala više vremena da homogenizuje svoj sastav, što se vidi u malim promenama vrednosti specifične električne provodljivosti. Više izmerene vrednosti E_c u tom delu pećine su, najverovatnije posledica prisustva razvijenijeg epikarsta u povlati pećine. Iako je debljina nadsloja iznad lokacija grupe 3 oko pet metara, voda na svom putu prolazi kroz deblji sloj zemljišta i epikarsta nego iznad drugih delova pećine, pa se obogatila mineralnim materijama. Sa druge strane pošto se na lokacijama 3. grupe drenira primarna mreža kanala, voda koja je nalivena sa obeleživačem (sa vrela Bežište) imala je najveći uticaj na vrednosti specifične električne provodljivosti. Jedino su na lokaciji I beležene niže vrednosti specifične električne provodljivosti u odnosu na najbliže lokacije (J i K), pa predstavlja svojevrsnu anomaliju.

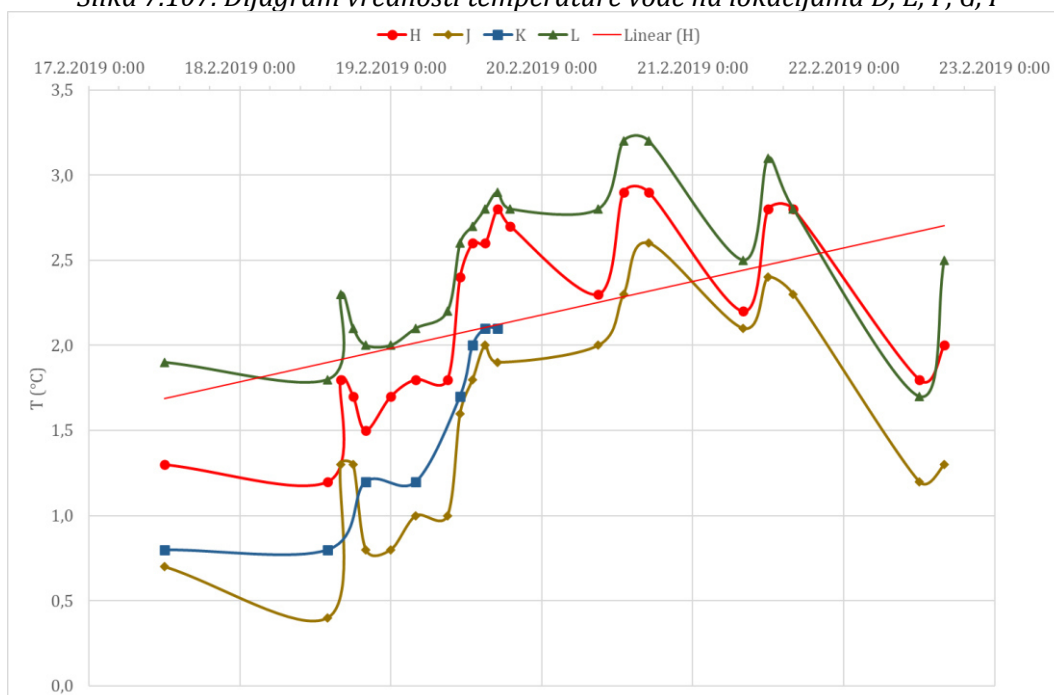
Usled niske temperature vazduha, rezultate monitoringa temperature procedne vode (Slike 7.106.-7.108.) treba uzeti sa određenom rezervom. Lokacije su prikazane u skladu sa podelom u grupe, kao u slučaju specifične električne provodljivosti. Temperaturni trend pokazuje porast tokom vremena, koji je sličan za sve tri odabrane lokacije. Međutim, kao što je rečeno na početku poglavlja, temperature vazduha su poslednjeg dana testa jako opale, pa je došlo do zamrzavanja vode u skoro svim posudama, stoga merenje nije bilo moguće obaviti. Najniži prosek temperature vode izmeren je na lokaciji B ($0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$), dok je najveću amplitudu imala temperatura vode merena na lokaciji A ($0,3\text{ do }3,3^{\circ}\text{C}$) što je i očekivano ako se u obzir uzme da su lokacije A i B na samom ulazu u pećinu i direktno izložene uticaju temperature vazduha iz spoljašnjosti (Slika 7.106.). U proseku najtoplija procedna voda sa temperaturom od $2,5^{\circ}\text{C}$ je bila na najudaljenijoj lokaciji L (Slika 7.108.).



Slika 7.106. Dijagram vrednosti temperature vode na lokacijama A, B, C, M



Slika 7.107. Dijagram vrednosti temperature vode na lokacijama D, E, F, G, I



Slika 7.108. Dijagram vrednosti temperature vode na lokacijama H, J, K, L

7.7.1.2. Eksperiment sa kontaminantom

U cilju definisanja sposobnosti epikarsta da „preradi“ određene zagađujuće supstance na osnovu dužine boravka vode u podzemlju, ali i na osnovu sastava ove nadzidanske zone sproveden je *in situ* eksperiment, radi definisanja parametara epikarsta, funkcionisanja procesa samoprečišćavanja zavisno od vrste i količine zagađujuće supstance, kao i uticaja izlučenih padavina i otopljenog snega u prirodnim uslovima. Rezultati eksperimenta su kasnije iskorišćeni za formiranje i tariranje modela koji simulira rad epikarstnog sistema u laboratorijskim uslovima.

Eksperiment je sproveden u vremenskim uslovima završetka zimskog perioda, prilikom pojačanog otapanja snežnog pokrivača i početka intenzivnijeg lučenja padavina u vidu kiše.

Količine izlučenih padavina su bile visoke, palo je 35-40 mm kiše u roku od 24h (tokom drugog dana testa 8.3.2020. godine), a onda su usledile i snežne padavine tokom trećeg dana, koje su se topile i na taj način, takođe, povećale potencijal za infiltriranje vode u epikarst.

Količine vode koje su proceđivale su varirale od lokacije do lokacije, ali postojala je promena količine vode i tokom odvijanja opita:

- 6-7. mart: $\Sigma Q=15-20$ l/h;
- 7-8. mart: $\Sigma Q=25-30$ l/h;
- 8-9. mart: $\Sigma Q=28-32$ l/h;
- 10. mart: $\Sigma Q=30-34$ l/h;
- 11-12 mart: $\Sigma Q=35-40$ l/h;
- 13. mart: $\Sigma Q=15-30$ l/h.

Opit je izveden na lokaciji pećine Peč, kao i opit trasiranja pomoću Na-fluoresceina. Odabrana je ova lokacija jer je prethodno bila definisana brzina kretanja podzemne vode i utvrđeno je na kojim se lokacijama procedna voda može prikupljati. Kao „laki“ kontaminant upotrebljen je rastvor stajskog đubriva i podzemne vode iz bunara (bunar i staja su u vlasništvu Dejana N. iz sela Bežište), koji se nalazi nedaleko od staje. Lokacija nalivanja kontaminanta (LNK) je ista ona na kojoj je ubačen fluorescentni traser (Slika 7.109.) tokom opita trasiranja sprovedenog 2019. godine. Prikupljanje vode za mikrobiološku i hemijsku analizu je vršeno na tri lokacije:

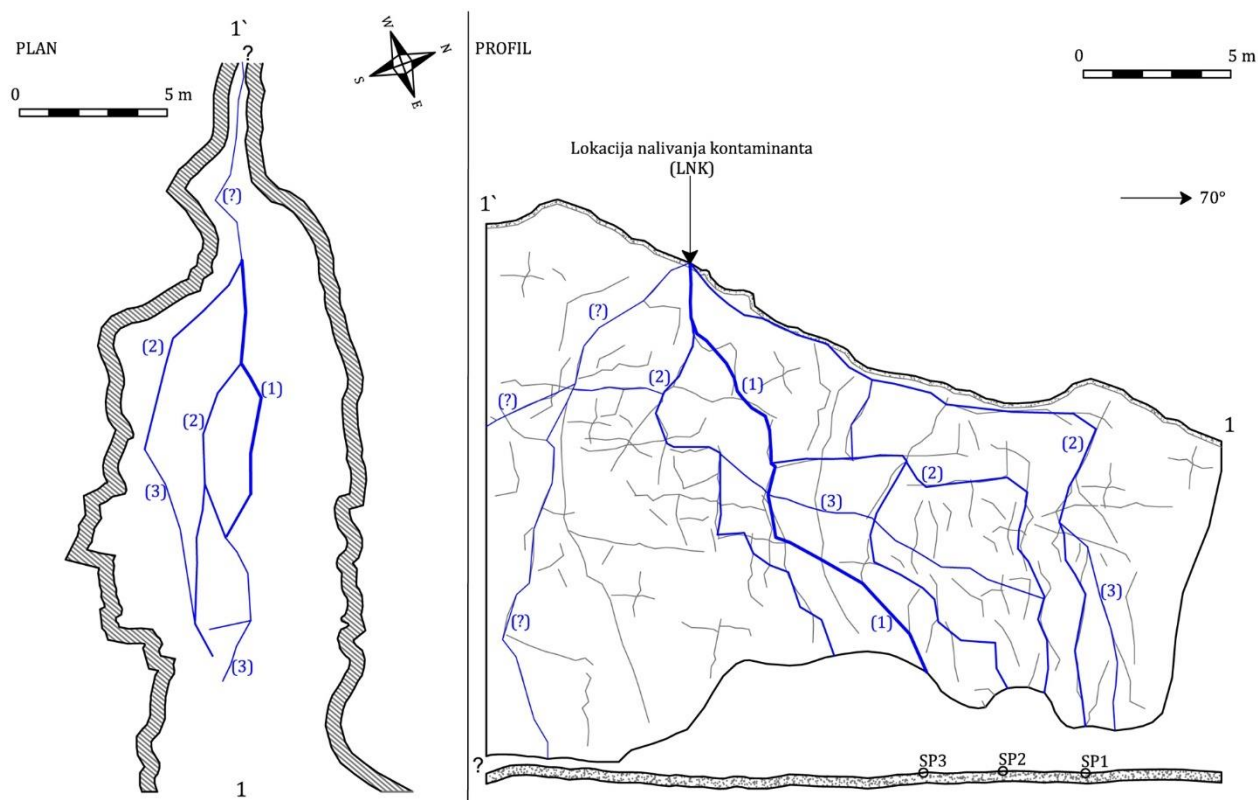
- SP1 - blizu ulaza u pećinu (lokacija C u opitu trasiranja),
- SP2 - lokacija bliže „sredini“ pećinskog kanala (lokacija H u opitu trasiranja), i
- SP3 - lokacija najdalje od ulaza (lokacija L u opitu trasiranja), na kojoj je ovom prilikom bilo registrovano intenzivnije kapanje vode.

Odabrane su ove tri lokacije jer je opitom trasiranja pokazano da na najbolji način odražavaju rad mreže kanala u epikarstu i karstifikovanom krečnjaku. Sa druge strane nije bilo moguće i iz tehničkih razloga uzorkovati vodu sa više lokacija.

Za potrebe definisanja hemijskog zagađenja praćena je koncentracija azotne trijade (NH_3 , NO_2^- i NO_3^-) na lokaciji SP1, a mereni su osnovni fizičko-hemijski parametri (specifična električna provodljivost, pH, Eh, TDS i sl.) pomoću terenskog uređaja.

Za potrebe definisanja mikrobiološkog zagađenja izrađene su analize sledećih parametara: ukupne koliformne bakterije u 100 ml; koliformne bakterije fekalnog porekla u 100 ml; ukupan broj aerobnih mezofilnih bakterija u 1 ml (na 37°C tokom 48h); streptokoke fekalnog porekla u 100 ml MF; *Proteus* vrste; sulfitoredukujuće klostridije u 100 ml; *Pseudomonas aeruginosa* u 100 ml.

Prikupljanje „nultog“ uzorka procedne vode pre drugih eksperimentalnih radova je obavljeno 6. marta u 16h, na lokaciji SP1 (Slika 7.109. i Tabela 7.16.).



Slika 7.109. Mreža kanala u tavanici pećine Peč, lokacija nalivanja kontaminanta (LNK) i lokacije na kojima je vršeno uzorkovanje procedne vode

Uzorkovanje uzoraka na sve tri lokacije pre unošenja kontaminanta u sistem obavljeno je još dva puta, 7.3.2020. godine u 6 h i u 12h, nakon čega je organizovano i izvršeno nalivanje kontaminanta na odabranu lokaciju iznad pećine Peč (Slike 7.109. i 7.110.).

Nalivanje kontaminanta je izvršeno 7.3.2020. godine u 12:10 h, a uzorci vode su prikupljeni u određenim vremenskim razmacima na tri lokacije unutar pećine i analizirani su na prisustvo mikrobiološkog i hemijskog zagađenja sve do 13.3.2020. godine u 6 h (Tabela 7.16.).

Nalivanje kontaminanta na zemljište iznad pećine Peč je obavljeno u dva vida:

- 1) 10 litara rastvora (oznaka uzorka SP K) stajskog đubriva i bunarske vode,
- 2) 10 kg čvrstog ostatka stajnjaka koji je iskorišćen za pravljenje rastvora, nakon čega je izvršeno nalivanje bunarske vode.

Za ispiranje nanetog kontaminanta i pospešivanje njegove infiltracije iskorišćeno je 20 litara podzemne vode iz bunara (oznaka uzorka SP D), za koju se sa pravom pretpostavljalo da je zagađena osokom od stajskog đubriva (Slika 7.110. desno).

U sklopu istraživanja, uzet je i uzorak podzemne vode iz vrela u Bežištu (SP B).



Slika 7.110. Nanošenje kontaminanta na lokaciji iznad pećine u vidu rastvora i čvrste materije (levo) i „ispiranje“ vodom iz bunara (desno)

Svi uzorci za vršenje mikrobiološke analize su uzeti u sterilne plastične vrećice (Slika 7.111.) i nakon toga čuvani u prenosnom frižideru, do dostavljanja Centru za higijenu i humanu ekologiju, Instituta za javno zdravlje u Nišu (IZJZ Niš). Uzorci su dostavljani u IZJZ Niš u jutarnjim časovima svakog radnog dana, za vreme vršenja monitoringa.

Uzimanje prvog uzorka procedne vode nakon nalivanja kontaminanta obavljeno je 8. marta u 16 h, na prethodno određenim lokacijama (SP1-SP3). Oznake uzoraka su kreirane tako da nakon slovne oznake SP stoji cifra koja označava broj uzorka, a druga cifra označava lokaciju uzorkovanja 1, 2 ili 3. Uzorkovanje je vršeno u određenim vremenskim razmacima (Tabela 7.16.), do 13.3.2020. godine u 6 h, kada je uzeta poslednja serija uzoraka procedne vode. Između svaka dva uzorkovanja posude za prikupljanje uzoraka su ispirane destilovanom vodom.



Slika 7.111. Oprema za uzimanje uzoraka i postupak uzorkovanja

Tabela 7.16. Oznake i vreme uzorkovanja procedne vode i tip analize koji je izvršen

rb. uzorka	datum	čas	oznaka uzorka	tip analize	rb. uzorka	datum	čas	oznaka uzorka	tip analize*
1	6.3.2020	16:00	SP1	M+H*	44	9.3.2020	18:00	SP151	M+H
2	7.3.2020	6:00	SP21	M+H	45	9.3.2020	18:00	SP152	M
3	7.3.2020	6:00	SP22	M	46	9.3.2020	18:00	SP153	M
4	7.3.2020	6:00	SP23	M	47	10.3.2020	0:00	SP161	M+H
5	7.3.2020	12:00	SP31	M+H	48	10.3.2020	0:00	SP162	M
6	7.3.2020	12:00	SP32	M	49	10.3.2020	0:00	SP163	M
7	7.3.2020	12:00	SP33	M	50	10.3.2020	6:00	SP171	M+H
8	7.3.2020	12:00	SP K**	M+H	51	10.3.2020	6:00	SP172	M
9	7.3.2020	12:00	SP D***	M+H	52	10.3.2020	6:00	SP173	M
10	7.3.2020	12:00	SP B****	M+H	53	10.3.2020	12:00	SP181	M+H
11	7.3.2020	16:00	SP41	M+H	54	10.3.2020	12:00	SP182	M
12	7.3.2020	16:00	SP42	M	55	10.3.2020	12:00	SP183	M
13	7.3.2020	16:00	SP43	M	56	10.3.2020	18:00	SP191	M+H
14	7.3.2020	20:00	SP51	M+H	57	10.3.2020	18:00	SP192	M
15	7.3.2020	20:00	SP52	M	58	10.3.2020	18:00	SP193	M
16	7.3.2020	20:00	SP53	M	59	10.3.2020	22:00	SP201	M+H
17	8.3.2020	0:00	SP61	M+H	60	10.3.2020	22:00	SP202	M
18	8.3.2020	0:00	SP62	M	61	10.3.2020	22:00	SP203	M
19	8.3.2020	0:00	SP63	M	62	11.3.2020	6:00	SP211	M+H
20	8.3.2020	4:00	SP71	M+H	63	11.3.2020	6:00	SP212	M
21	8.3.2020	4:00	SP72	M	64	11.3.2020	6:00	SP213	M
22	8.3.2020	4:00	SP73	M	65	11.3.2020	14:00	SP221	M+H
23	8.3.2020	8:00	SP81	M+H	66	11.3.2020	14:00	SP222	M
24	8.3.2020	8:00	SP82	M	67	11.3.2020	14:00	SP223	M
25	8.3.2020	8:00	SP83	M	68	11.3.2020	22:00	SP231	M+H
26	8.3.2020	12:00	SP91	M+H	69	11.3.2020	22:00	SP232	M
27	8.3.2020	12:00	SP92	M	70	11.3.2020	22:00	SP233	M
28	8.3.2020	12:00	SP93	M	71	12.3.2020	6:00	SP241	M+H
29	8.3.2020	16:00	SP101	M+H	72	12.3.2020	6:00	SP242	M
30	8.3.2020	16:00	SP102	M	73	12.3.2020	6:00	SP243	M
31	8.3.2020	16:00	SP103	M	74	12.3.2020	12:00	SP251	M+H
32	8.3.2020	20:00	SP111	M+H	75	12.3.2020	12:00	SP252	M
33	8.3.2020	20:00	SP112	M	76	12.3.2020	12:00	SP253	M
34	8.3.2020	20:00	SP113	M	77	12.3.2020	18:00	SP261	M+H
35	8.3.2020	22:00	SP121	M+H	78	12.3.2020	18:00	SP262	M
36	8.3.2020	22:00	SP122	M	79	12.3.2020	18:00	SP263	M
37	8.3.2020	22:00	SP123	M	80	13.3.2020	0:00	SP271	M+H
38	9.3.2020	6:00	SP131	M+H	81	13.3.2020	0:00	SP272	M
39	9.3.2020	6:00	SP132	M	82	13.3.2020	0:00	SP273	M
40	9.3.2020	6:00	SP133	M	83	13.3.2020	6:00	SP281	M+H
41	9.3.2020	12:00	SP141	M+H	84	13.3.2020	6:00	SP282	M
42	9.3.2020	12:00	SP142	M	85	13.3.2020	6:00	SP283	M
43	9.3.2020	12:00	SP143	M					

Napomena: * M+H – mikrobiološka i hemijska analiza, M – mikrobiološka analiza; ** - SP K uzorak rastvora kontaminanta; *** - SP D uzorak podzemne vode iz bunara Dejana N. iz Bežišta; **** - SP B uzorak podzemne vode iz vrela Bežište

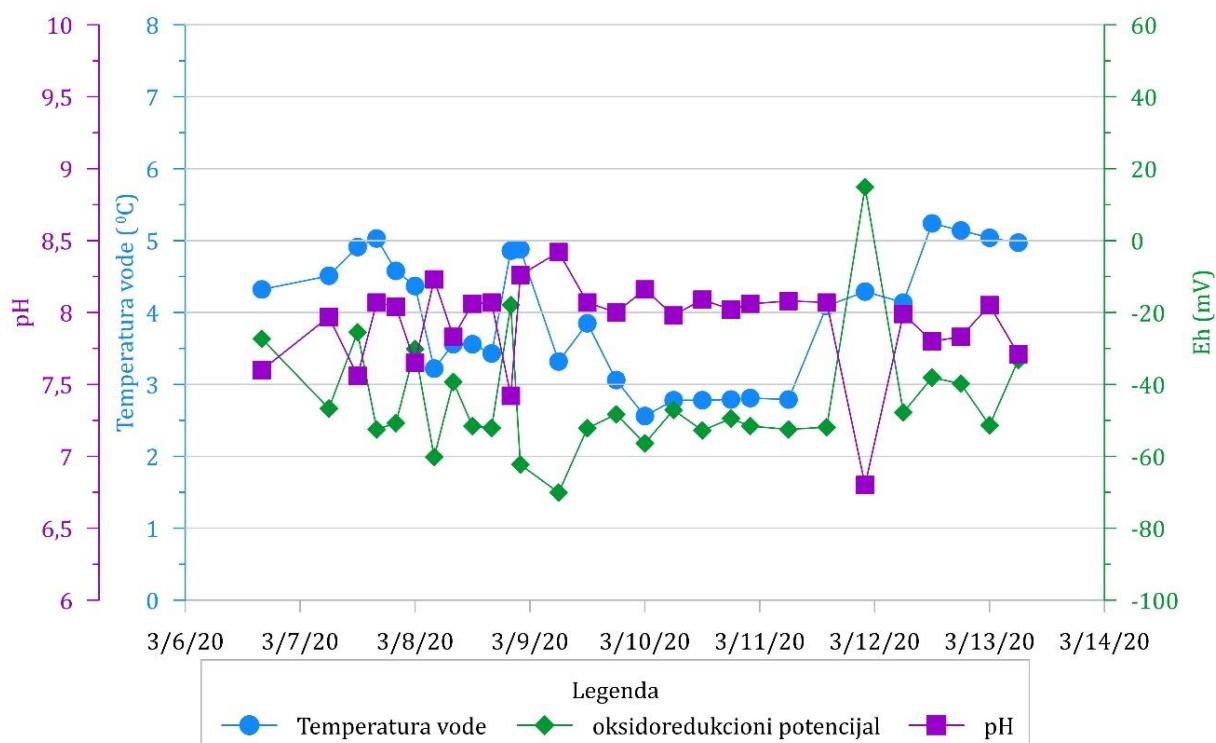
Tokom eksperimenta, osim uzimanja uzoraka za mikrobiološke i hemijske analize, vršeno je i merenje osnovnih fizičko-hemijskih parametara. Merenja su vršena u istim vremenskim intervalima kada je vršeno i uzorkovanje vode (Slika 7.112.).



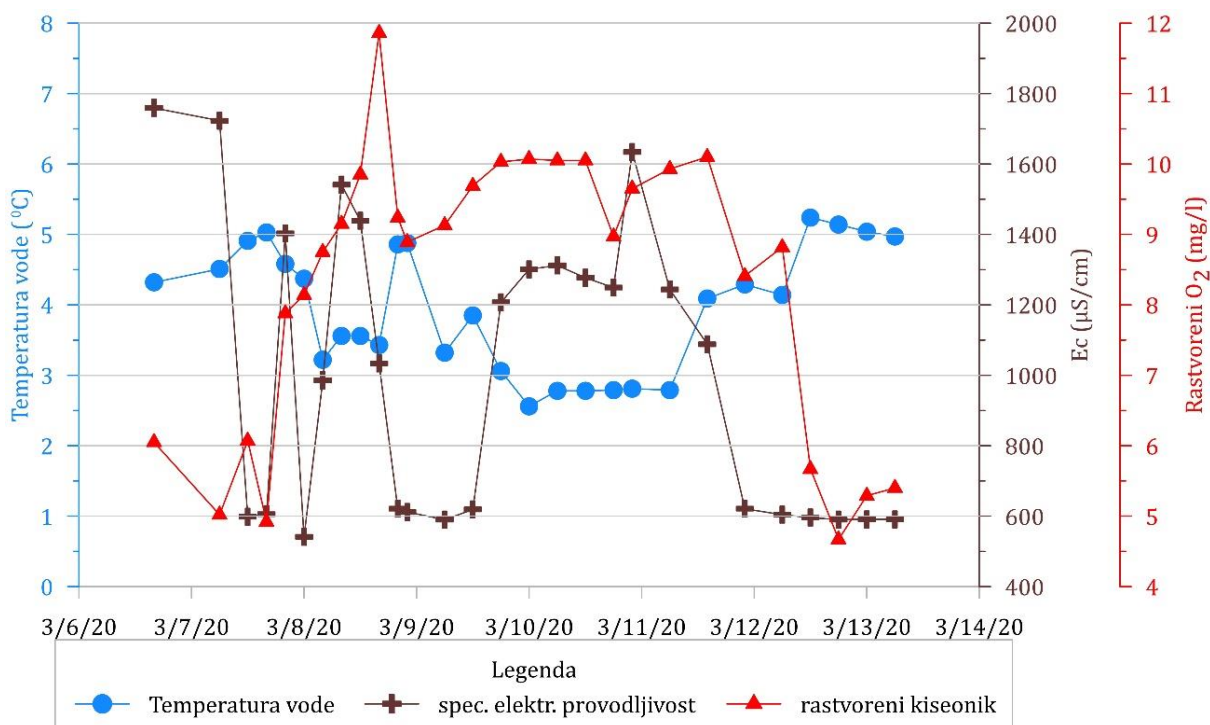
Slika 7.112. Merenje osnovnih fizičko-hemijskih parametara i uzimanje uzoraka, noćni uslovi

Temperatura vode koja je prikupljena u posudama se kretala oko 4°C, maksimalna je bila zabeležena 12.3.2020. godine i iznosila je 5,24°C, dok je najniža temperatura od 2,56°C izmerena 10.3.2020. godine u 0:00h (Slike 7.113. i 7.114.). Vrednost pH je varirala od 6,80 do 8,42, a srednja vrednost je iznosila 7,92. Vrednost oksido-redukcionog potencijala kretala se od -70,1 mV do 14,9 mV, dok je srednja vrednost -44,4 mV. Vrednosti pH i Eh imaju obrnuto proporcionalnu zavisnost (Slika 7.113.), dok u pogledu odnosa sa temperaturom vode pH opada kada temperatura vode beleži porast, a oksido-redukциони potencijal donekle prati kretanje temperature, pa sa porastom temperature raste i oksido-redukциони potencijal.

Rezultati merenja ukazuju na promenljivost veličine specifične električne provodljivosti (E_c) tokom sprovođenja eksperimenta (Slika 7.114.), tako je najniža vrednost bila 541 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a najviša 1759 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dok je srednja vrednost ovog parametra 999 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Na osnovu velikih razlika u izmerenim vrednostima specifične električne provodljivosti pretpostavlja se da procedna voda, odražava promenljivost kvaliteta vode iz epikarsta, jer zavisno od toga kojim od kanala (primarnih ili sekundarnih) je voda dospela do lokacije, zavisi i njena „opterećenost“ mineralnim materijama. Koncentracija kiseonika je imala velike varijacije od 4,67 mg/l do 11,86 mg/l, dok je srednja vrednost iznosila 8,27 mg/l. Ne može se uočiti postojanje odnosa između vrednosti E_c i rastvorenog kiseonika u poređenju sa temperaturom vode.



Slika 7.113. Temperatura vode, pH i Eh izmereni tokom eksperimenta - mart 2020



Slika 7.114. Temperatura vode, specifična električna provodljivost i rastvoreni kiseonik izmereni tokom eksperimenta - mart 2020

Koncentracije potencijalno štetnih materija i bakterija, detektovanih u „nultom“ uzorku kontaminanta (SP K) i njegovih sastavnih delova (SP D) prikazane su u Tabeli 7.17., zajedno sa koncentracijom istih tih parametara u podzemnoj vodi karstnog vrela Bežište.

Tabela 7.17. Koncentracije štetnih materija i bakterija u „nultom“ uzorku SP K, SP D i SP B

oznaka	NH ₃ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	Ukupne koliformne bakterije u 100 ml	Koliformne bakterije fekalnog porekla u 100 ml	Ukupan broj aerobnih bakterija na 37 °C/48h, 1 ml	Streptokoke fekalnog porekla u 100 ml MF	Proteus vrste	Sulfitoredukujuće klostridije u 100 ml	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> u 100 ml
SP K	1,5	<0,005	<0,17	>161	>161	0	nađene su	0	0	0
SP D	1,75	0,036	5	161	161	>300	nađene su	0	15	0
SP B	<0,05	<0,005	0,6	5	0	5	nađene su	0	0	0

Tabela 7.18. Koncentracije štetnih materija (azotna trijada) u uzorcima procedne vode iz pećine Peč

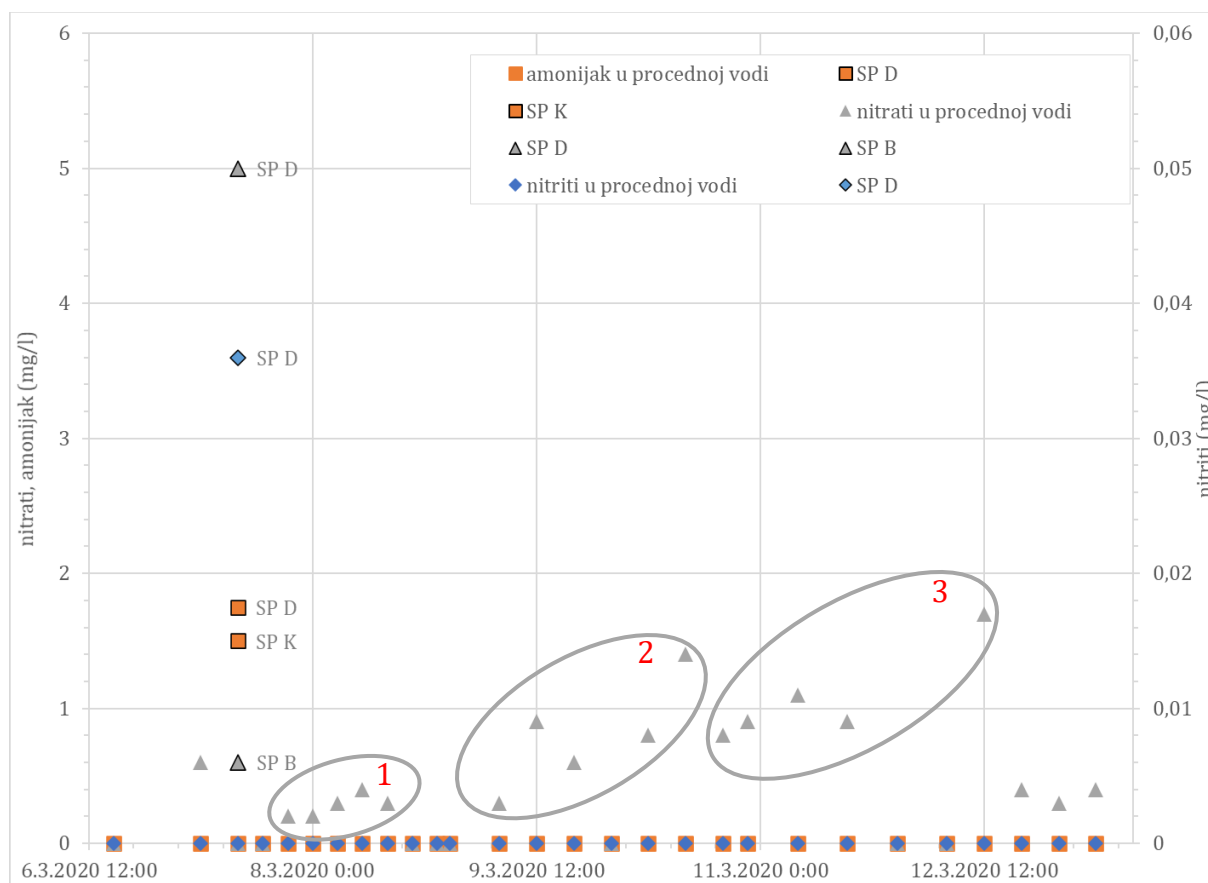
datum i vreme uzorkovanja	oznaka uzorka	NH ₃ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
6.3.2020 16:00	SP1	<0,05	<0,005	<0,17
7.3.2020 6:00	SP21	<0,05	<0,005	0,6
7.3.2020 12:00	SP31	<0,05	<0,005	<0,17
7.3.2020 16:00	SP41	<0,05	<0,005	<0,17
7.3.2020 20:00	SP51	<0,05	<0,005	0,2
8.3.2020 0:00	SP61	<0,05	<0,005	0,2
8.3.2020 4:00	SP71	<0,05	<0,005	0,3
8.3.2020 8:00	SP81	<0,05	<0,005	0,4
8.3.2020 12:00	SP91	<0,05	<0,005	0,3
8.3.2020 16:00	SP101	<0,05	<0,005	<0,17
8.3.2020 20:00	SP111	<0,05	<0,005	<0,17
8.3.2020 22:00	SP121	<0,05	<0,005	<0,17
9.3.2020 6:00	SP131	<0,05	<0,005	0,3
9.3.2020 12:00	SP141	<0,05	<0,005	0,9
9.3.2020 18:00	SP151	<0,05	<0,005	0,6
10.3.2020 0:00	SP161	<0,05	<0,005	<0,17
10.3.2020 6:00	SP171	<0,05	<0,005	0,8
10.3.2020 12:00	SP181	<0,05	<0,005	1,4
10.3.2020 18:00	SP191	<0,05	<0,005	0,8
10.3.2020 22:00	SP201	<0,05	<0,005	0,9
11.3.2020 6:00	SP211	<0,05	<0,005	1,1
11.3.2020 14:00	SP221	<0,05	<0,005	0,9
11.3.2020 22:00	SP231	<0,05	<0,005	<0,17
12.3.2020 6:00	SP241	<0,05	<0,005	<0,17
12.3.2020 12:00	SP251	<0,05	<0,005	1,7
12.3.2020 18:00	SP261	<0,05	<0,005	0,4
13.3.2020 0:00	SP271	<0,05	<0,005	0,3
13.3.2020 6:00	SP281	<0,05	<0,005	0,4

Prisustvo nitrita dokazano je jedino u uzorku podzemne vode iz bunara (SP D) koja je iskorišćena za dodatno ispiranje kontaminanta (Tabela 7.17., Slika 7.115.) u koncentraciji od 0,036 mg/l. Nitriti nisu detektovani ni u jednom od 27 analiziranih uzoraka procedne vode (Tabela 7.18., Slika 7.115.) tj. koncentracija ni jednom nije prevazišla granicu detekcije primenjene metode od 0,005 mg/l. Na osnovu analize svih navedenih podataka zaključujemo da su nitriti iz podzemne vode bunara najverovatnije nitrifikovani (proces oksidacije), prilikom pripreme „lakog“ kontaminanta, pa stoga nisu detektovani u uzorku SP K, dok su i nitriti iz

podzemne vode bunara (SP D) verovatno oksidovani tokom kontakta sa zemljišnim slojem i epikarstom. Samim tim nisu mogli biti detektovani ni u uzorcima procedne vode. Verovatno bi bilo potrebno da eksceno zagađenje koje sadrži nitrite bude mnogo većih razmera ili u većoj koncentraciji da u postojećim hidrogeološkim uslovima dođe do nitritnog zagađenja vode u podzemlju.

Sadržaj amonijaka detektovan je, prema očekivanjima, u uzorcima podzemne vode iz bunara (SP D) u koncentraciji 1,75 mg/l i uzorku koji je uzet iz tečnog dela kontaminanta (SP K) 1,5 mg/l (Tabela 7.17, Slika 7.115.), međutim, u uzorcima procedne vode iz pećine (Tabela 7.18, Slika 7.115.) nije ni jednom pronađen u koncentraciji većoj od 0,05 mg/l (granica detekcije primenjene metode). Nameće se zaključak da je odsustvo amonijaka iz procedne vode, kao i u slučaju nitrita posledica nitrifikacije.

Nitrati nisu detektovani u 9 od 28 uzoraka procedne vode (koncentracija $\text{NO}_3^- < 0,17$ mg/l), u ostalim slučajevima raspon vrednosti je bio od 0,2 do 1,7 mg/l. Koncentracija nitrata se povećavala u procednoj vodi u talasima (Tabela 7.17., Slika 7.115.). Prvi talas (oznaka 1, na slici 7.115.) je pratio poslednje količine otopljenog snega na opitnom poligonu i početak kišne epizode, dok je drugi talas (2 na slici 7.115.) bio posledica intenzivnije kiše koja je zatim prešla u susnežicu, tokom 8. marta. Treći talas (3 na slici 7.115.) je krenuo nakon intenziviranja kišnih (i snežnih) padavina tokom 10. marta, a nakon tog perioda je zabeležena i najviša vrednost od 1,7 mg/l (12. marta u 12h).

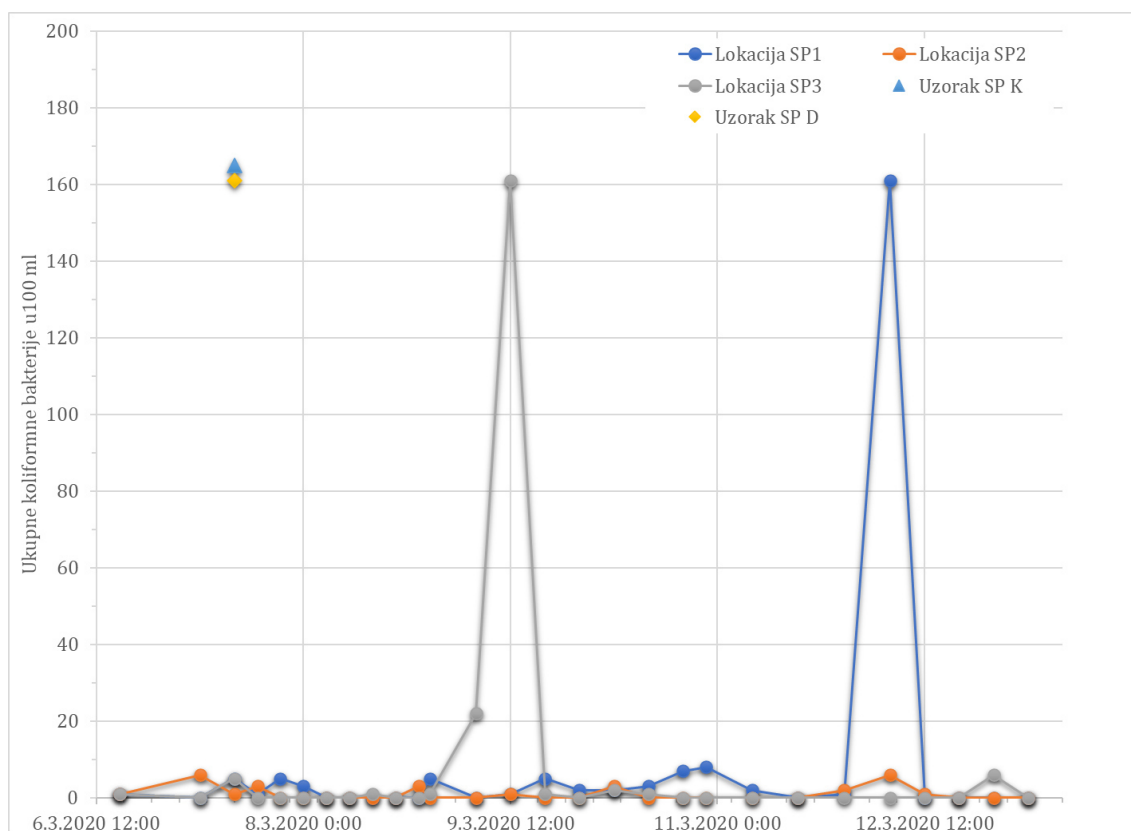


Slika 7.115. Koncentracija azotnih jedinjenja (amonijak, nitriti, nitrati) tokom eksperimenta; SP D – podzemna voda iz bunara, SP K – tečni deo „lakog“ kontaminanta, SP B– vrelo Bežište

Uticaj padavina kroz pojačanu infiltraciju vode i povećanje količine prokapnih voda je uočljiv i u „ponašanju“ posmatranih mikrobioloških parametara.

Ukupne koliformne bakterije, čiji je broj na početku tj. u sastavu kontaminanta i podzemne bunarske vode visok SP K > 161 cfu i SP D = 161 cfu (Slika 7.116.), u najvećem broju uzoraka procedne vode nisu detektovane: na lokaciji SP1 prisutne su u 12 od 28 uzoraka, na lokaciji SP2 i na lokaciji SP3 u 18 od 28 uzoraka. Na lokacijama SP1 i SP3 zabeležen je po jedan uzorak sa visokim brojem koliformnih bakterija od 161 cfu, međutim u potpuno drugačijim vremenskim presecima. Sa druge strane najveći zabeležen broj koliformnih bakterija na lokaciji SP2 je bio 6 cfu.

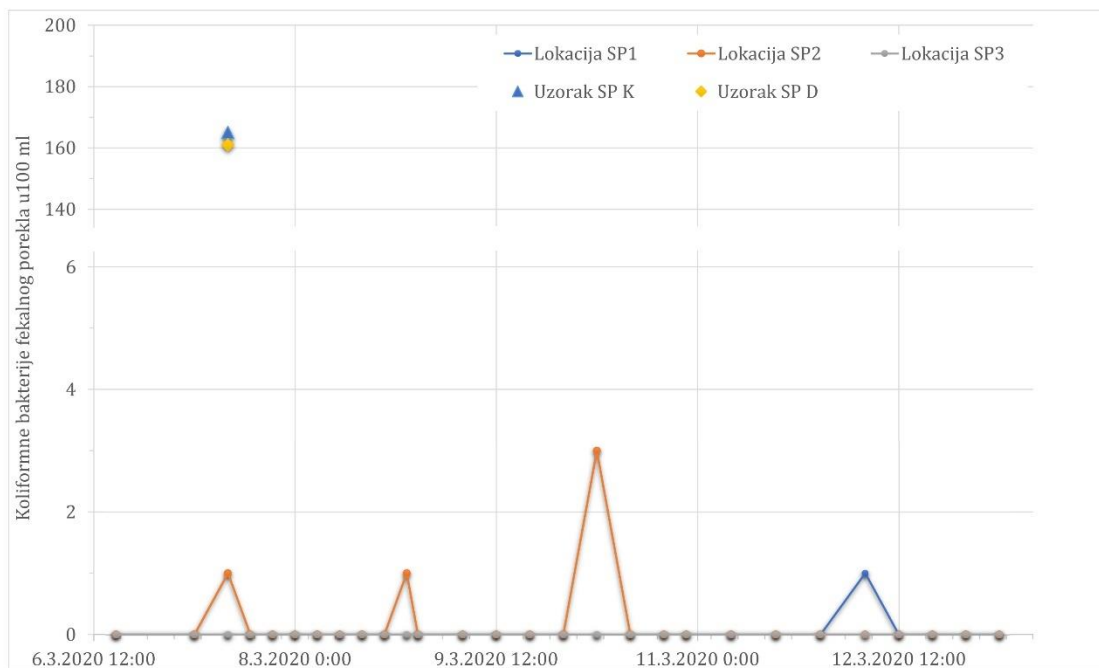
Visok broj koliformnih bakterija na lokaciji SP3 može se objasniti kao posledica infiltracije kišnih padavina, tokom već pomenutog perioda 7-8. mart, a s obzirom da je ta lokacija najbliža LNK, očigledno je da se pojačani hidrostatički pritisak u gornjim slojevima prvo odrazio na kretanje kontaminanta najkraćim kanalima i kavernama. Nakon tog veoma izraženog maksimuma, na lokaciji SP3 detektovane su koliformne bakterije u samo još četiri uzorka u koncentraciji 1 ili 2 cfu (6 cfu pretposlednji uzorak sa te lokacije). Maksimalan broj od 161 cfu je zabeležen i na lokaciji SP1, koja je najdalje od LNK, ali tek nakon dugotrajnih padavina i dodatnog otapanja snežnih padavina u periodu 10-12. mart, kada su skoro svi kanali i kaverne ispunjeni vodom i novo-infiltrirana voda može da izvrši transport kontaminanta i na većim horizontalnim rastojanjima. Najveći broj bakterija zabeležen je 12. marta u 6h. U međuvremenu se na toj lokaciji beleže koncentracije bakterija od 1 do 8, bez neke uočljive pravilnosti u rasporedu pojavljivanja. Međutim, nakon tog „proboja“ od 161 bakterije u 100 ml uzorka, ni u jednom sledećem uzorku do kraja monitoringa nisu detektovane koliformne bakterije. Na lokaciji SP2 je zabeležena pojava koliformnih bakterija nakon pet uzoraka bez prisustva kontaminanta, takođe, u periodu 11/12. mart, nakon intenzivne infiltracije vode.



Slika 7.116. Ukupne koliformne bakterije u 100 ml, SP D – podzemna voda iz bunara, SP K – tečni deo „lakog“ kontaminanta, SP B – vrelo Bežište

Kada su u pitanju koliformne bakterije fekalnog porekla, opet su detektovane visoke koncentracije u uzorcima SP K i SP D (>161 i 161, respektivno). Međutim, ovog puta na lokaciji

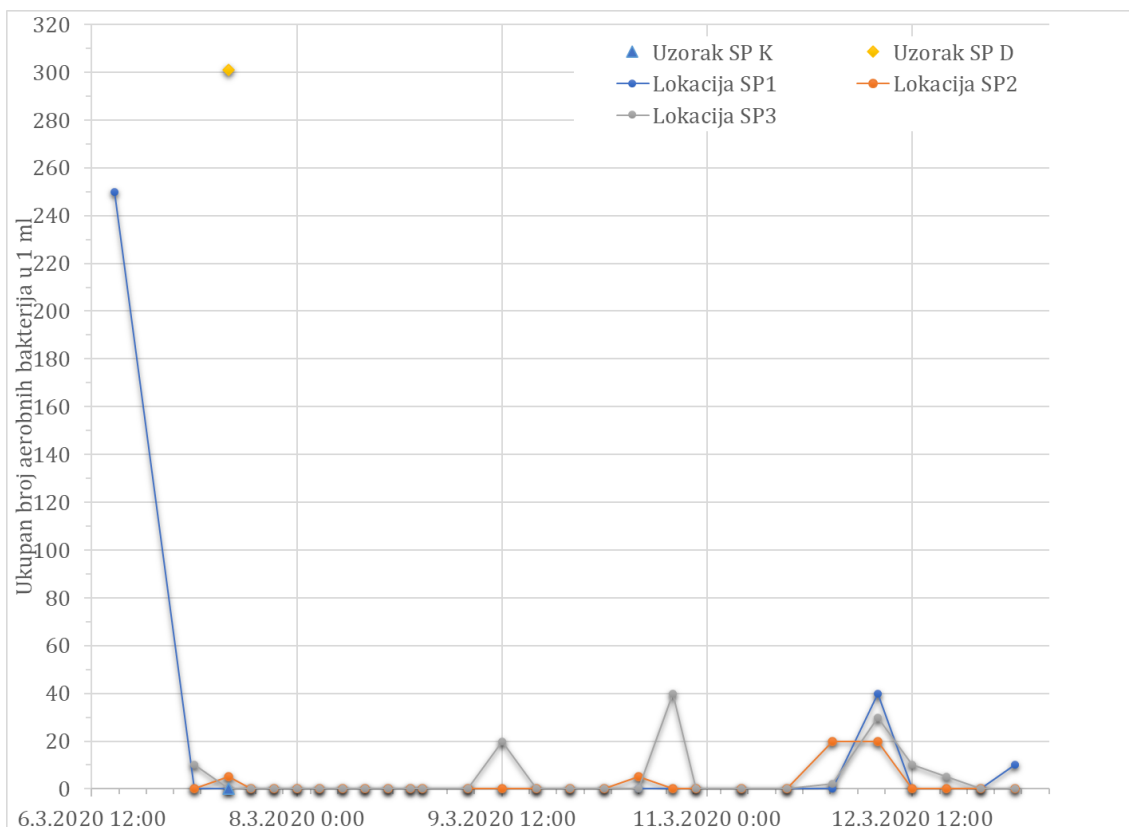
SP3 nije detektovano prisustvo ovog tipa bakterija ni u jednom uzorku (Slika 7.117.), a na lokaciji SP1 samo u jednom uzorku od 12. marta u 6 h, to je isti uzorak u kojem je zabeležen i najveći broj ukupnih koliformnih bakterija, znači tek nakon infiltracije značajnih količina vode. Na lokaciji SP2 je detektovano prisustvo koliformnih bakterija fekalnog porekla u tri uzorka, od čega je jedan uzet pre nalivanja „lakog“ kontaminanta 7. marta u 12 h. Drugi uzorak sa zabeleženim fekalnim koliformnim bakterijama je uzet 8. marta u 20 h (1 cfu), dok je najveći broj bakterija (3 cfu) detektovan u uzorku od 10. marta u 6 h.



Slika 7.117. Koliiformne bakterije fekalnog porekla u 100 ml, SP D – podzemna voda iz bunara, SP K – tečni deo „lakog“ kontaminanta, SP B – vrelo Bežište

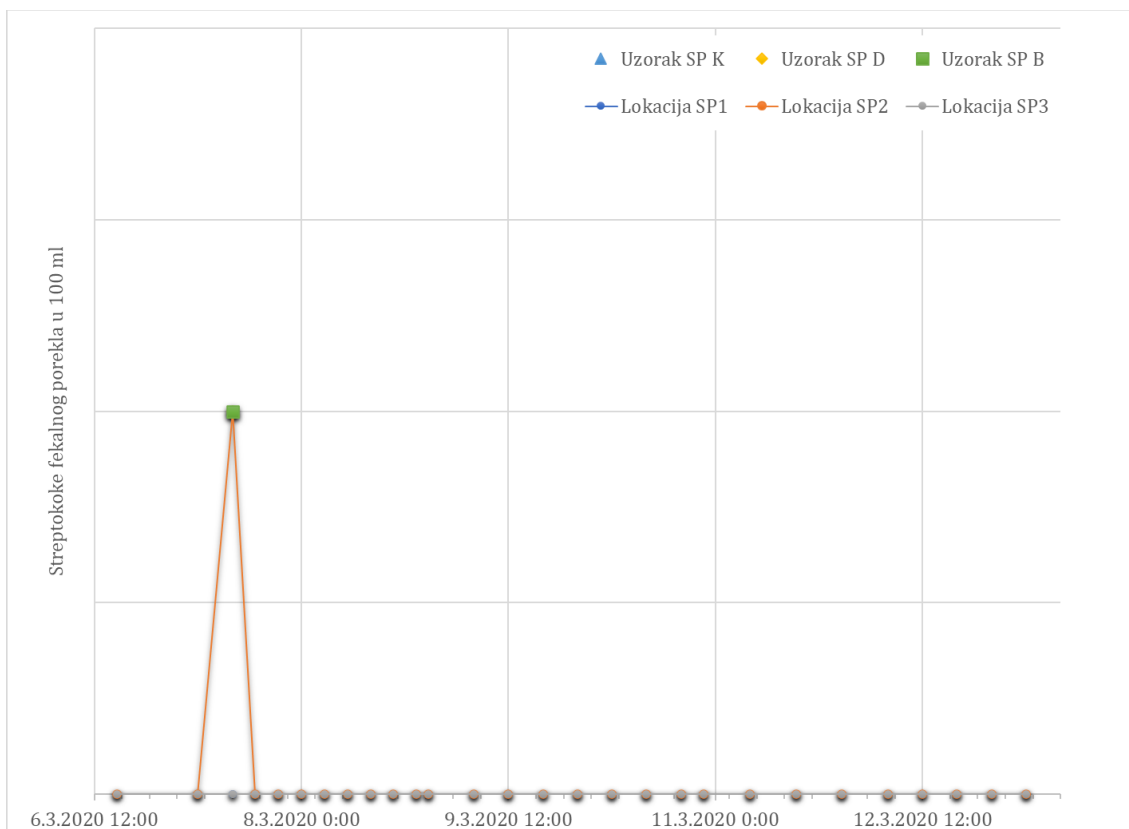
Ukoliko se posmatra ukupan broj aerobnih mezofilnih bakterija u 1 ml uzorka (na 37 °C/48h) može se uočiti (Slika 7.118.) da su prisutne u podzemnoj vodi iz bunara (SP D – 300 cfu), međutim, u rastvoru kontaminanta (uzorak SP K) ih nema. Sa druge strane iako detektovane u uzorcima na sve tri lokacije unutar pećine pre izvršene kontaminacije, nakon nalivanja kontaminanta prvi put se pojavljuju u uzorku sa lokacije SP3 tek 9. marta u 12h (20 cfu). Pojava aerobnih bakterija dogodila se u istom periodu kao i registrovanje koliformnih bakterija, pa je stoga i uzrok pojavljivanja verovatno isti. Nakon tog vremenskog preseka, pojavljuju se 10. marta na lokaciji SP2 (5 cfu), a onda opet na lokaciji SP3 (40 cfu). U periodu 11/12. mart zabeležena je pojava aerobnih bakterija na svim lokacijama u koncentraciji od 2 do 40 cfu, gde je talas pojavljivanja najduže trajao na lokaciji SP3, u četiri uzastopna uzorka.

Aerobne bakterije su bile registrovane u uzorcima i pre nalivanja kontaminanta, stoga se nameće zaključak da predstavljaju deo životne sredine na mikrolokaciji pećine Peč, pa stoga ne može doneti jednoznačan zaključak o tome da li su aerobne mezofilne bakterije poreklom iz kontaminirane infiltrirane vode.



Slika 7.118. Ukupan broj aerobnih bakterija u 1 ml na 37 °C/48h,

SP D – podzemna voda iz bunara, SP K – tečni deo „lakog“ kontaminanta, SP B – vrelo Bežište



Slika 7.119. Streptokoke fekalnog porekla u 100 ml,

SP D – podzemna voda iz bunara, SP K – tečni deo „lakog“ kontaminanta, SP B – vrelo Bežište

Streptokoke fekalnog porekla, iako registrovane u uzorcima SP K i SP D (Slika 7.119.), nisu registrovane unutar pećine tj. nisu zabeležene u uzorcima sa lokacija SP1-SP3. Međutim, treba

istaći da je njihovo prisustvo detektovano u uzorku sa lokacije SP2 koji je uzet 7. marta u 12h, dakle i pre nalivanja kontaminanta.

U uzorku iz bunarske vode SP D detektovane su Sulfitoredujuće klostridije - 15 cfu, međutim ni u jednom uzorku procednih voda nije detektovano prisustvo ovih mikroorganizama. Prisustvo ostalih mikrobioloških parametara (*Proteus* vrste i *Pseudomonas aeruginosa*), koji su praćeni tokom monitoringa u pećini Peč u periodu 7. mart – 13. mart, nije detektovano u uzorcima kontaminanta (SP K i SP D), niti u uzorcima procedne vode.

Rezultati sprovedenih analiza azotne trijade u uzorcima vode koja je iskorišćena kao kontaminant: SP K i SP D, su pokazale neočekivano niske koncentracije azotnih jedinjenja. Međutim, ukoliko se promena vrednosti kontaminanta posmatra kroz promenu koncentracije nitrata dolazi se do zaključka da je koncentracija u procednoj vodi umanjena više od 3 puta u odnosu na koncentraciju u kontaminantu. Početna sumarna koncentracija nitrata iznosila je 5,6 mg/l, dok je izmereni maksimum u procednoj vodi bio 1,7 mg/l. Sa druge strane amonijak i nitriti su u potpunosti „uklonjeni“ iz vode tokom filtracije, pa u procednoj vodi nisu detektovani.

Sadržaj bakterija je bio pogodan za praćenje promene količine zagađujuće supstance, ali su metode analize broja bakterija koje su iskorišćene ipak bile nedovoljno precizne. Metoda koju je laboratorija primenila pri određivanju broja bakterija, tj. metoda određivanja najverovatnijeg broja (engl. *Most Probable Number Techniques - MPN*), nije u potpunosti odgovorila na postavljeni zadatak prebrojavanja kolonija u uzorcima koji su analizirani, naročito pri određivanju viših vrednosti. Naročito je to uočljivo kod definisanja broja ukupnih koliformnih bakterija i koliformnih bakterija fekalnog porekla, gde je maksimalni definisani broj kolonija bio 161, tj. kod definisanja broja aerobnih mezofilnih bakterija gde je taj broj bio 300 cfu (Tabele 7.17. i 7.18.).

U narednim eksperimentima je potrebno preciznije definisati broj bakterija tj. odrediti koliki je zaista broj bakterija, čak i kada je veći od broja koji je definisan Pravilnikom o higijenskoj ispravnosti vode za piće (Sl. list SRJ, 1998, 1999; Sl. glasnik RS, 2019) koji laboratorije koriste prilikom određivanja sadržaja mikroorganizama u vodi otvorenih izvorišta (npr. podzemne vode). Metoda spektrofotometrije (turbidimetrija) se može iskoristiti za brzo definisanje broja bakterija (živih i mrtvih) u uzorku, a onda se primenom MPN metode može tačno definisati broj živih bakterija i izvršiti razvrstavanje prema vrstama i rodovima.

Zaključak koji se nameće nakon sumiranja svih rezultata opita sa kontaminantom je da je prilikom njegove pripreme, u želji da ne bude previše opasan po prirodnu sredinu, ipak napravljen rastvor „laganog“ hemijskog i mikrobiološkog sastava. Međutim, zaključak je i da određena umanjena koncentracije zagađujućih supstanci postoje tokom filtracije podzemne vode kroz epikarst.

7.7.2. Rezultati laboratorijskog eksperimenta

Prikupljeni podaci na terenu, tokom sprovođenja opita trasiranja i eksperimenta sa „lakim“ kontaminantom poslužili su za dizajn i izradu fizičkog modela epikarsta za opite u laboratorijskim uslovima.

Prilikom izrade modela podaci i rezultati terenskih opita su poslužili da se definišu:

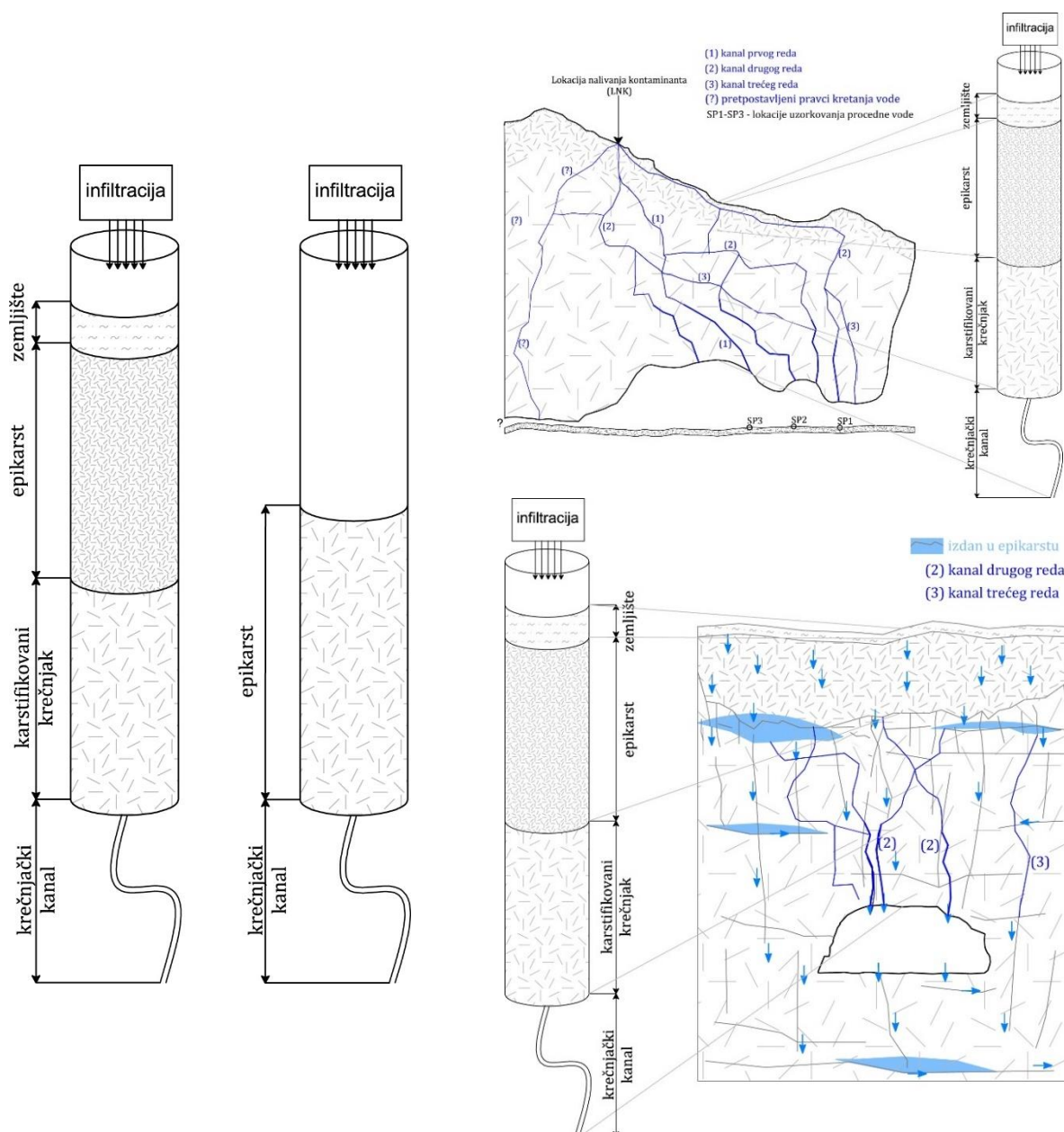
- a) debljina zemljišta, epikarsta i karstifikovanog krečnjaka do pećinske tavanice:
 - Debljina slojeva od tavanice pećine Peč pa do površine terena se kreće od 4 do 12 metara. Slojevi se mogu okarakterisati kao:

- 1) karstifikovani krečnjak debljine od 3 do 9 metara,
 - 2) epikarst debljine od 0,5 do 3 metra, i
 - 3) zemljišta debljine maksimalno 0,3 metra.
- Ukoliko debljine slojeva u odnosu na celokupnu debljinu krovine pećine, izrazimo procentualno, karstifikovani krečnjak zauzima 75-82% od ukupne debljine, epikarst 14-25%, i zemljište do 4%.
 - Za potrebe formiranja modela iskorišćene su srednje vrednosti debljine slojeva: karstifikovani krečnjak – 6 metara, epikarst – 1,8 metara i zemljište – 0,2 metra.
 - Debljine slojeva u modelu su umanjene 2,5 puta, da bi bilo moguće smestiti ih u cevi dužine 2 metra.
- b) površina i zapremina prostora obuhvaćenih eksperimentom:
- površinu i zapreminu prostora koja je obuhvaćena eksperimentom, je bilo teže odrediti. Međutim, merenja koja su obavljena u sklopu geomorfoloških i speleoloških istraživanja su omogućila da se definiše površina glavnog pećinskog kanala koja iznosi 135 m², a ako uzmemo u obzir da se debljina slojeva iznad tavanice kreće od 6-12 metara možemo izračunati zapreminu stenske mase i epikarsta, kroz koju se filtrira voda od momenta infiltracije do momenta pojavljivanja na tavanici pećine.
 - Za proračun zapremine iskorišćena je srednja debljina nadslojeva od 8 metara, stoga je osrednjena zapremina prostora iznad tavanice pećine 1080 m³
- c) brzine kretanja obeleživača – kontaminanta:
- Fiktivna brzina kojom se voda kretala kroz sloj epikarsta i karstifikovanog krečnjaka, na lokaciji pećine Peč, je bila od 0,0041 m/s do 0,006 m/s.
 - Fiktivna brzina kojom se kretala voda, ustanovljena preko koncentracije nitrata, tokom opita na terenu, kretala se od 0,00011 m/s do 0,0003 m/s.
 - Fiktivna brzina kojom je migriralo bakteriološko zagađenje tokom opita na mikrolokaciji pećine Peč je iznosila od 0,00005 m/s do 0,00008 m/s, bila je manja od brzine filtracije vode sa nitratima zbog pojačane adsorpcije bakterija na čestice zemljišta i stena, kao i usled činjenice da su bakterije većih dimenzija od rastvorenih nitrata jona, pa su stoga bile duže zadržane u podzemlju.
- d) koncentracija i količina kontaminanta na ulasku i na izlasku iz sistema:
- Za opit sa kontaminantom upotrebljeno je 10 litara rastvora (oznaka uzorka SP K) i 20 litara podzemne vode iz bunara (oznaka SP D). Takođe, na mestu nalivanja rastvora kontaminanta bilo je dodato i 10 kg čvrstog ostatka stajnjaka koji je iskorišćen za pravljenje rastvora;
 - U rastvoru kontaminanta(SP K) koncentracija amonijaka je bila 1,5 mg/l; podzemna voda bunara (SP D) sadržala je koncentraciju amonijaka od 1,75 mg/l, nitrita od 0,036 mg/l, nitrata od 5 mg/l;
 - U rastvoru kontaminanta(SP K) broj koliformnih bakterija u 100 ml uzorka je bio >161, broj koliformnih bakterija fekalnog porekla u 100 ml uzorka je bio >161, a utvrđeno je i prisustvo streptokoka fekalnog porekla;
 - U podzemnoj vodi bunara (SP D) broj koliformnih bakterija u 100 ml uzorka je bio 161, broj koliformnih bakterija fekalnog porekla u 100 ml uzorka je bio 161, a utvrđeno je i prisustvo streptokoka fekalnog porekla, ukupan broj aerobnih mezofilnih bakterija u 1 ml je bio preko 300;
- e) količina vode koja se proceđuju kroz osmatranu zapreminu stenske mase i epikarsta: kroz koju se filtrira voda od momenta infiltracije do momenta pojavljivanja na tavanici pećine u funkciji vremena razlikovala se tokom sprovedenih opita:
- Sumarna količina vode koja se proceđivala na početku opita trasiranja iznosila je oko 25 l/h, dok je na kraju opita iznosila oko 6 l/h.

- Sumarna količina vode koja se proceđivala na početku opita sa kontaminantom iznosila je $\Sigma Q=15-20$ l/h, u maksimumu je sumarna količina vode bila $\Sigma Q=35-40$ l/h, dok je srednja vrednost bila 25-30 l/s.

Kreirana su 2 fizička modela epikarsta (Slika 7.120.):

- 1) CEV 1 predstavlja slučaj kada iznad karstifikovane stenske mase postoji sloj epikarsta i zemljište;
- 2) CEV 2 predstavlja slučaj kada iznad karstifikovanih stena postoji samo sloj epikarsta.



Slika 7.120. Skica laboratorijskog fizičkog modela izrađenog prema pećini Peč

Upotrebene su dve transparentne cevi $\varnothing 200/194$ mm, od klirita (pleksiglasa), dužine 2 metra. Na hermetički zatvorenom dnu su ugrađena metalna tuš creva dužine 1,5 metar, sa slavinom za ispuštanje vode iz sistema i uzimanje uzoraka. Iznad cevi (zona prihranjivanja) postavljeni su sudovi poznate zapremine, preko kojih se vršilo „prihranjivanje“ sistema vodom.

CEV 1 predstavlja primer kada postoji karstifikovani krečnjak, preko kojeg leži sloj epikarsta sa slojem zemljišta na površini:

- karstni kanal i karstifikovani krečnjak dužine 2,4 metra su predstavljeni metalnim tuš crevom sa slavinom dužine 1,5 metara i komadima krečnjačke stene unutar cevi, ukupne debljine 0,9 m,
- epikarst je predstavljen uz pomoć komada krečnjaka i krupnozrnog-srednjezrnog zemljišnog materijala (u kojem preovladava crvenica) ukupne debljine 0,9 m,
- na vrhu modela je zemljišni sloj, debljine 0,15 m.

CEV 2 predstavlja slučaj epikarsta i karstifikovanog krečnjaka bez prisutnog zemljišta na površini:

- karstni kanal i karstifikovani krečnjak su simulirani metalnim tuš crevom sa slavinom dužine 1,5 metara i komadima krečnjačke stene unutar cevi.

Nakon pripreme cevi i stenskog i zemljišnog materijala, koji je donet sa lokacije pećine Peč, otpočelo se sa punjenjem obe cevi sa vrha prema navedenom redosledu (Slike 7.121-123.).



Slika 7.121. Priprema cevi za formiranje modela epikarsta



Slika 7.122. Pripremljeni materijal za kreiranje modela epikarsta: komadi krečnjaka i zemljišta (crvenica i glinovito zemljište), destilovana voda



Slika 7.123. Punjenje cevi sa pripremljenim materijalom

Nakon ubacivanja materijala (stena i zemljišta) u CEV 1 je prvo uvedeno 15 litara destilovane vode da bi se izvršilo zasićenje tla i uspostavila filtracija kroz model ispuštanjem vode na slavini (Slika 7.124.), a nakon toga je uvedena i kišnica (prikupljena na terenu), dakle voda takođe veoma male mineralizacije, u količini od 5 litara, koja je bila potrebna da nadomesti vodu koja je iscurela iz CEVI 1 tokom podešavanja kapanja vode na slavini i uspostavljanja filtracije. U

modelu epikarsta u CEVI 1 je postignuta poroznost od 23%. U CEV 2 je uvedeno 18 litara kišnice, stoga se može reći da je poroznost sloja epikarsta u ovom modelu izuzetno visoka 60%.



Slika 7.124. Pripremljene cevi i početak filtracije destilovane vode kroz CEV 1

U instaliranim modelima epikarsta je uz pomoć slavina postignuto da intenzitet proceđivanja kroz epikarst i karstni kanal bude 0,0006 l/s.

Nakon 150 minuta praćenja i provere intenziteta proceđivanja vode koja se već nalazila u CEVI 2 (kišnica), u model je preko „tuš“ rešetke uvedena voda sa karstnog vrela Bežište. Cilj je bio da se kreiraju prirodni uslovi koji vladaju u epikarstnoj izdani i da se provere uslovi disperzije, dva rastvora različitih odlika, koji postoje unutar fizičkog modela.

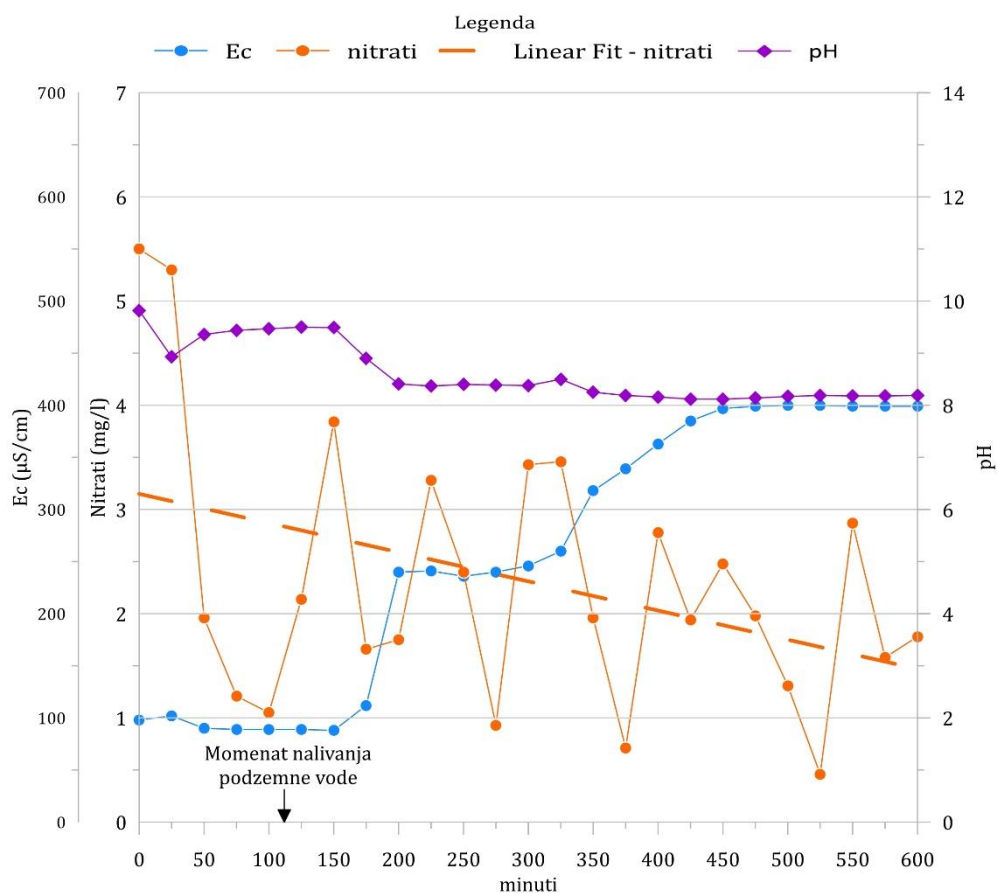
Specifična električna provodljivost (E_c) kišnice koja je uvedena u CEV 2 je praćena tokom uspostavljanja proceđivanja vode kroz sistem u količini od 0,0006 l/s. Vrednosti E_c su bile od 98 do 101 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nakon što je iz sistema isteklo 6 litara vode, uvedena je voda iz karstnog vrela Bežište u istoj količini. Specifična električna provodljivost (E_c) vode iz karstnog vrela je bila 538-542 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nastavljeno je praćenje promene E_c (Slika 7.125.) na svakih litar istekle vode tokom filtracije vode (u proseku na 25 minuta), dok je na svakih 6 litara istekle vode iz modela, naliveno preko tuš rešetke 6 litara vode iz karstnog vrela. Ustanovljeno je da je postignut ekvilibrijum vrednosti specifične električne provodljivosti (Slika 7.126.), nakon 450 minuta, a ravnotežna vrednost od 399-400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se nije menjala nakon postignutog ujednačavanja narednih sat vremena. Provera vrednosti specifične električne provodljivosti je vršena i narednih 12 h, povremenim ispuštanjem vode koja je dovoljna za merenje specifične električne provodljivosti iz CEVI 2, a vrednost je i dalje bila 399-400 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Osim specifične električne provodljivosti, tokom opita, merena je i koncentracija nitrata (Slika 7.126.) terenskim fotometrom. Koncentracija nitrata u kišnici, koja je bila uvedena u CEV 2 na početku ovog prvog opita, iznosila je 5,5 mg/l, dok je u podzemnoj vodi bila 2,1 mg/l, poslednja izmerena koncentracija u procednoj vodi, 480 minuta nakon uvođenja podzemne vode u model je bila 1,73 mg/l. Na dijagramu promena parametara koji su praćeni (Slika 7.126.) uočava se kako specifična električna provodljivost u „epikarstnoj izdani“ postepeno raste i dostiže

ekvilibrijum, dok je koncentracija nitrata imala trend opadanja (*Linear nitrati*, na slici 7.126.), u talasima. Ove promene koncentracije nitrata nastaju usled činjenice da je nitratni jon slab anjonski ligand, konstantno se adsorbuje na čestice zemljišta, a zatim se desorbuje pri nailasku podzemne vode iz vrela Bežište u kojoj je koncentracija nitrata bila niža (Filipović & Lipanović, 1995; Brown et al, 2018).



Slika 7.125. Merenja specifične električne provodljivosti i koncentracije nitrata tokom opita



Slika 7.126. Dijagram promene specifične električne otpornosti, koncentracije nitrata i pH, tokom „mešanja“ podzemne vode i kišnice u CEVI 2

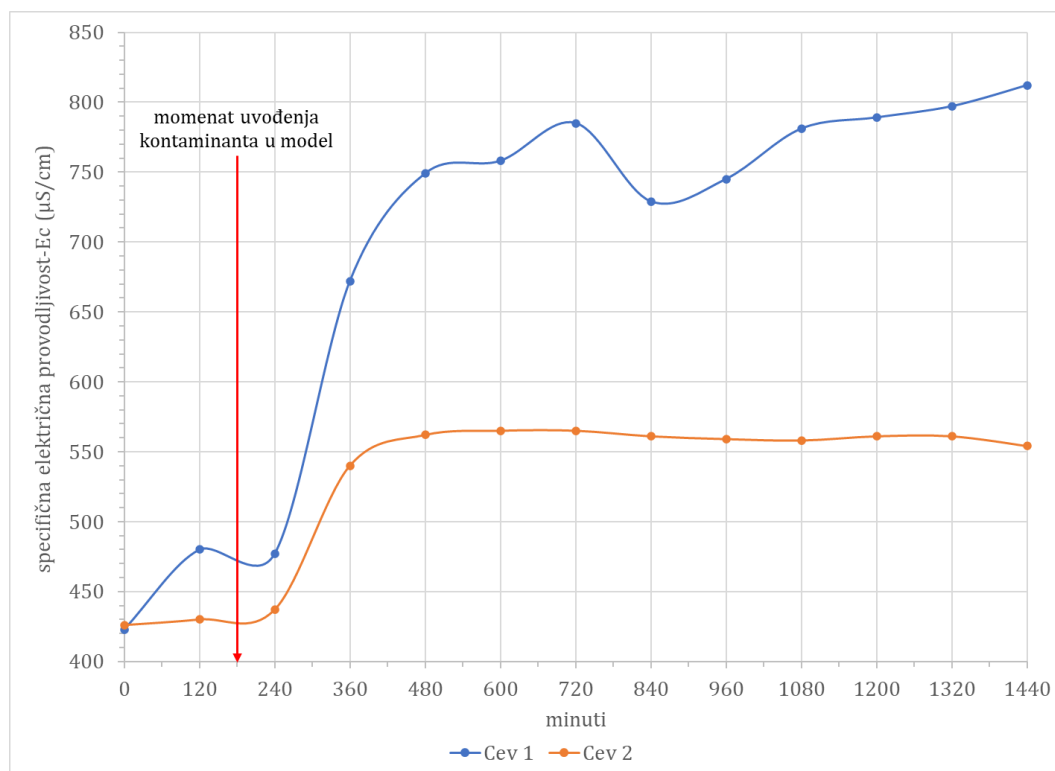
Rezultati ovog dela eksperimenta pokazuju da se proces mešanja dva rastvora odigrava brzo i da se uspostavljena ravnoteža u pogledu vrednosti specifične električne provodljivosti ne menja, dok se ne promene uslovi tj. ne uvede novi rastvor u sredinu.

Da bi se u modelima 1 i 2 stvorili uslovi slični onima tokom terenskog opita sa kontaminantom, modeli epikarsta su ostavljeni u vodom zasićenom stanju. CEV 1 je bila ispunjena destilovanom

vodom u koju je tokom vremena dodata kišnica, a u CEVI 2 je sada bio rastvor podzemne vode iz prethodnog opita, nastao mešanjem kišnice i podzemne vode karstnog vrela Bežište. Uz pomoć slavina je postignuto da intenzitet proceđivanja kroz sistem sada bude 0,0003 l/s, kao prilikom testa u pećini.

Kontaminant je, u vidu rastvora veštačkog azotnog đubriva, uveden u model epikarsta preko „tuš“ rešetke. Tokom trećeg sata, nakon što je izvršeno uspostavljanje uslova proceđivanja vode sličnim onim u prirodi, izvršeno je nalivanje 1,5 litara rastvora kontaminanta u svaku od cevi, koje je trajalo 30 minuta.

Koncentracija nitrata u kontaminantu je bila 1160 mg/l, a specifična električna provodljivost 3070 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nakon toga je merenje specifične električne provodljivosti u proceđenoj vodi i uzorkovanje za određivanje koncentracije nitrata, obavljano na svaka dva sata, sve dok se modeli (epikarstna izdan) nisu u potpunosti ispraznili. Na dijagramu promene vrednosti specifične električne provodljivosti (Slika 7.127.) vidi se da su sistemi drugačije reagovali na unos visoko „mineralizovanog“ kontaminanta. U obe cevi je vrednost specifične električne provodljivosti već u prvom narednom uzorku (1 čas posle nalivanja rastvora kontaminanta) bila uvećana.



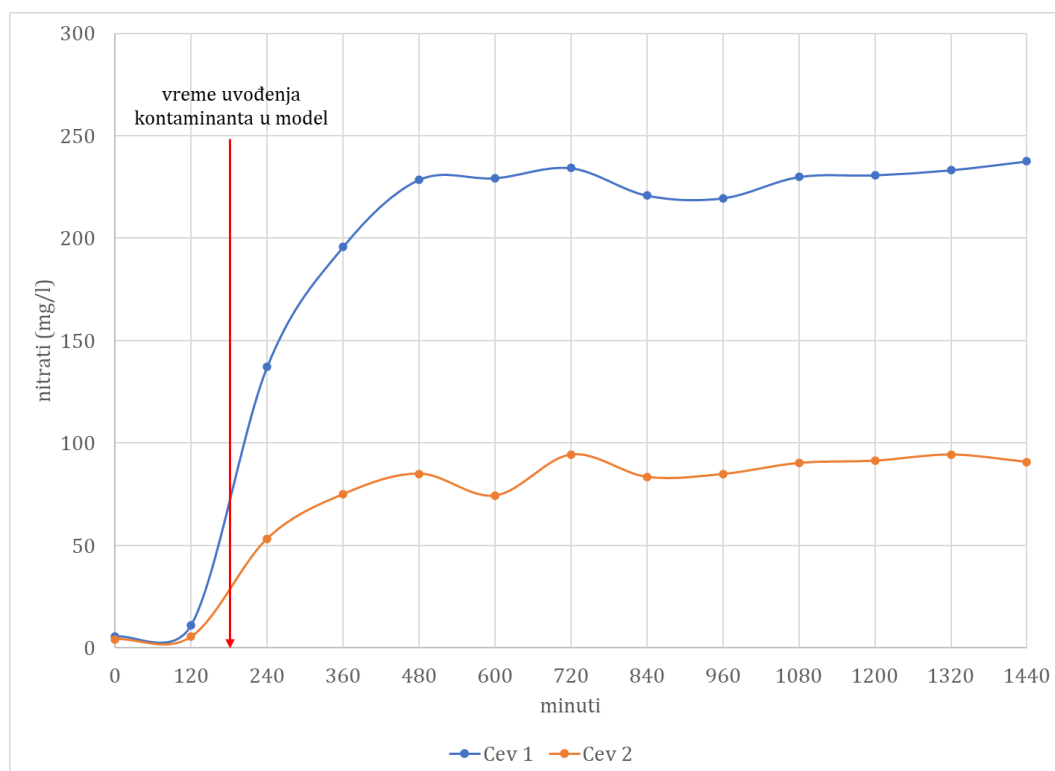
Slika 7.127. Dijagram promene Ec tokom opita sa kontaminantom u laboratorijskom modelu epikarsta

Početna vrednost specifične električne provodljivosti u CEVI 1 bila je 423 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a u CEVI 2 vrednost bila je 426 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Pre unosa kontaminanta, u CEVI 1 primećen je porast specifične električne provodljivosti (porast je u iznosu od 10%), koji se može pripisati ispiranju i rastvaranju mineralne materije iz zemljišta kojeg ima u ovom modelu. Nakon uvođenja kontaminanta dolazi do značajnog povećanja provodljivosti koja je registrovana u uzorku koji je uzet 180 minuta nakon nalivanja kontaminanta. U CEVI 1 je vrednost povećana za oko 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a u CEVI 2 za oko 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Razlika u povećanju specifične električne provodljivosti u cevima 1 i 2 je nastala pre svega zbog manje količine „podzemne vode“ koja se pre uvođenja kontaminanta nalazila u CEVI 1. Količina

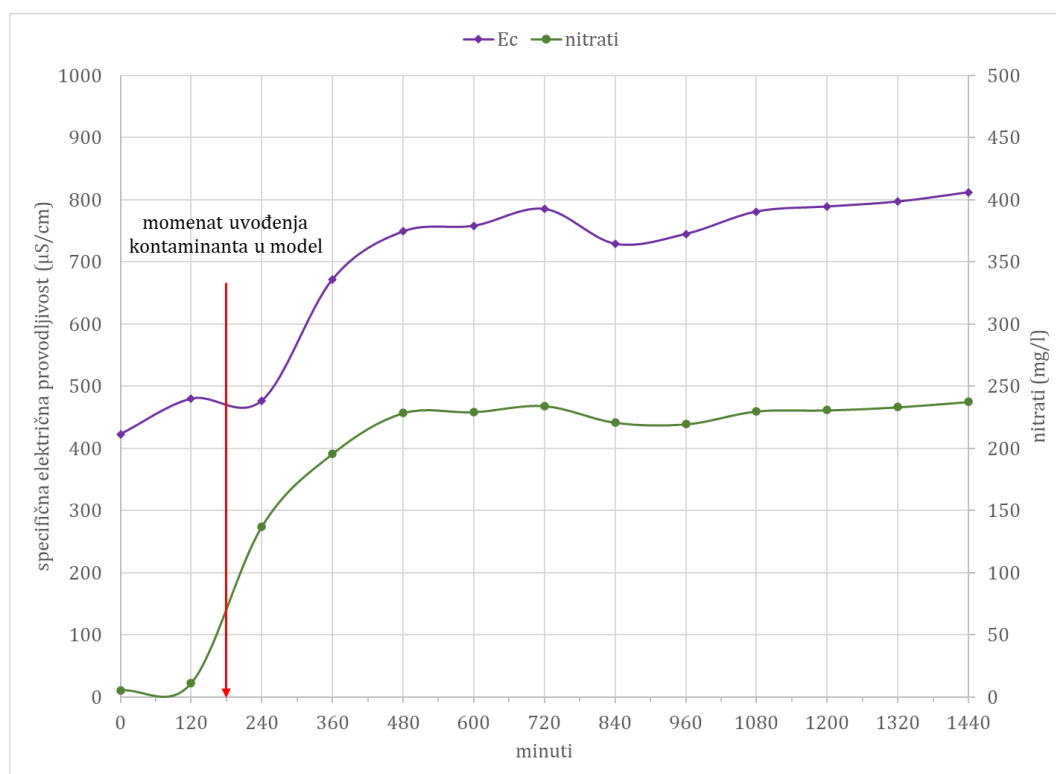
vode koja može da izvrši razblaženje kontaminanta je manja 33%, usled manje aktivne poroznosti u modelu, tako da je nastanak nove disperzije sporiji, i većina kontaminanta izlazi iz modela. Kao što je uočeno prilikom prethodnog opita mešanja kišnice i podzemne vode, mešanje dva rastvora je brz proces i ravnoteža se brzo uspostavlja. Nova dostignuta ravnotežna vrednost E_c u CEVI 1 je oko $790 \mu\text{S}/\text{cm}$, dok je ta vrednost u CEVI 2 oko 40% manja - $560 \mu\text{S}/\text{cm}$. Vrednosti specifične električne provodljivosti u dve cevi se u proseku razlikuju za 30%.

U pogledu koncentracije nitrata, koja je u kontaminantu visoka ($1160 \text{ mg}/\text{l}$), i u CEVI 1 i u CEVI 2 se primećuje značajan porast koncentracija (Slika 7.128.), nakon nalivanja kontaminanta. Koncentracija nitrata u CEVI 1 je viša 2,5 puta, od one u CEVI 2. Razlog ovakvoj razlici u koncentraciji nitrata u CEVI 1 i u CEVI 2, je isti kao i u slučaju promene specifične električne provodljivosti. U CEVI 1 je prisutna 33% manja količina vode u „epikarstnoj izdani“, pa je na raspolaganju za smanjenje koncentracije kontaminanta mnogo manje „čiste“ vode.



Slika 7.128. Dijagram promene koncentracije nitrata tokom opita sa kontaminantom u laboratorijskom modelu epikarsta

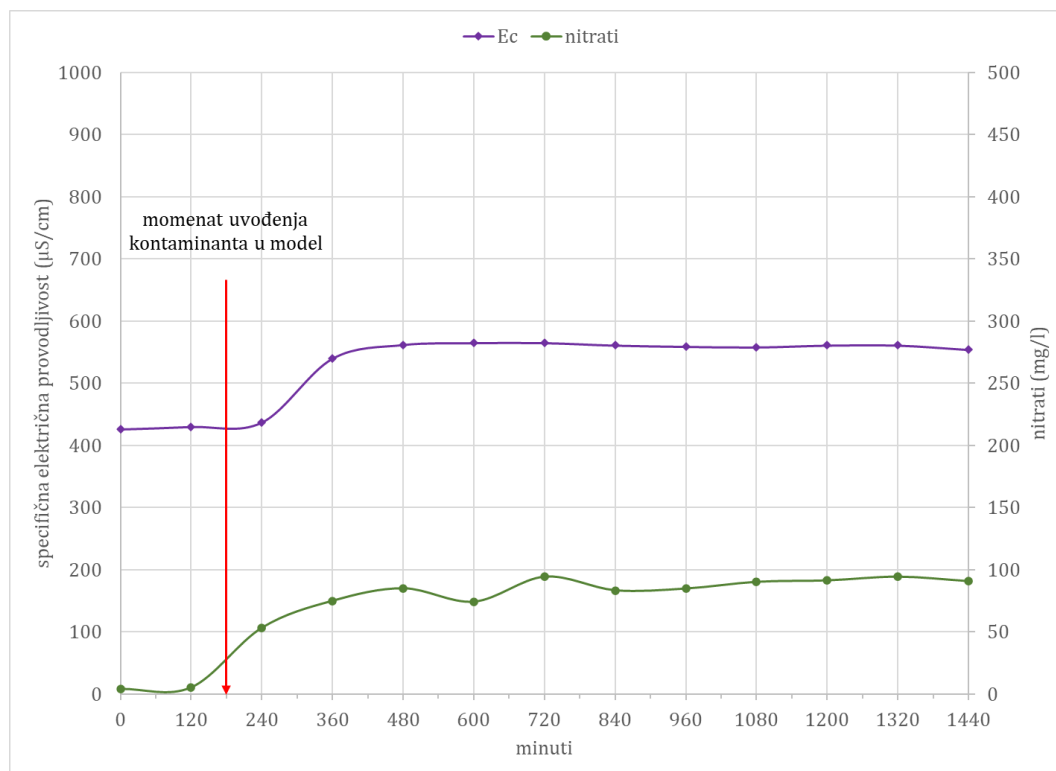
Prvi maksimum koncentracije nitrata u CEVI 1 od $234,3 \text{ mg}/\text{l}$ je dostignut 5 sati nakon nalivanja kontaminanta. Nakon toga koncentracija nitrata je imala male promene, uz blagi porast da bi uzorak uzet 21 sat nakon momenta nalivanja kontaminanta imao najviši sadržaj nitrata od $237,6 \text{ mg}/\text{l}$. Koncentracija nitrata u CEVI 1 ima sličan trend kao vrednosti specifične električne provodljivosti (Slika 7.129.). Teoretski koncentracija nitrata u modelu, u kojem se vrši mešanje kontaminanta i „čiste“ vode je postignuta (Filipović & Lipanović, 1995; Brown et al, 2018), dok mala odstupanja u iznosu od $30\text{-}40 \text{ mg}/\text{l}$ potiču od prisutne adsorpcije nitrata na krečnjačke stene ali i od mobilisanju nitrata, koji su konstituenti zemljišta iskorišćenog pri kreiranju fizičkog modela epikarsta u CEVI 1.



Slika 7.129. Dijagram promene specifične električne otpornosti i koncentracije nitrata, tokom opita sa kontaminantom u CEVI 1

Prvi pik koncentracije nitrata od 85 mg/l u CEVI 2 se dostiže 5 sati nakon uvođenja kontaminanta u model epikarst, a zatim dolazi do blagog opadanja koncentracije, a onda je zabeležen maksimum od 94,3 mg/l. Nakon toga se beleže niže vrednosti koncentracije nitrata, a trend opadanja je sličan trendu opadanja vrednosti specifične električne provodljivosti (Slika 7.130.). Teoretski koncentracija nitrata u CEVI 2, je trebala da bude viša za oko 30% (Filipović & Lipanović, 1995; Brown et al, 2018), a razlika koja postoji se može objasniti adsorpcijom/desorpcijom nitrata na krečnjačke stene.

Rezultati eksperimenta pokazuju da je moguće simulirati proceđivanje vode kroz epikarst, u uslovima sličnim prirodnim uslovima, koji postoje na lokaciji pećine Peč. Postignuta je vrednost filtracije procedne vode kroz CEV 1 i CEV 2 od 0,0003 l/s, slično proceđivanju vode prilikom eksperimenta u pećini. Postignuto je umanjeње koncentracije kontaminanta (nitratni jon), kao što je i u prirodnim uslovima koncentracija nitrata smanjena (tri puta), jedino je u modelu postignuto smanjenje koncentracije od skoro 5 puta u CEVI 1, a preko 12 puta je smanjena koncentracija u CEVI 2. Ukoliko se promena kvaliteta procedne vode u CEVI 1 i CEVI 2 posmatra kroz promenu specifične električne provodljivosti onda je opet postignuto umanjeње „mineralizacije“ koju je imao kontaminant. U CEVI 1 je specifična električna provodljivost kontaminirane vode nakon filtracije kroz model epikarsta smanjena skoro 4 puta, a u CEVI 2 je vrednost Ec smanjena 5,5 puta.



Slika 7.130. Dijagram promene specifične električne otpornosti i koncentracije nitrata, tokom opita sa kontaminantom u CEVI 2

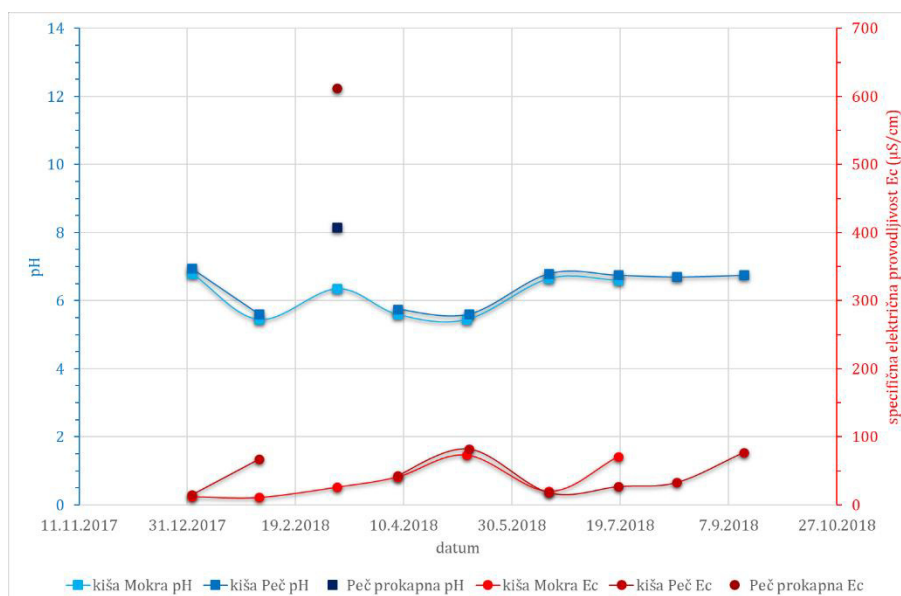
Laboratorijski eksperiment u dizajniranom modelu epikarsta je obezbedio početne parametre za rad sa hemijskim kontaminantima. Promene u koncentraciji nitrata koje su uočene u obe cevi, je potrebno proveriti u narednim opitima, uz upotrebu različitih koncentracija kontaminanta, ali i korišćenjem kontaminanta koji su različitog porekla: stajsko đubrivo ili druga vrsta veštačkog đubriva od one koja je upotrebljena ovom prilikom. Potrebno je sprovesti eksperimente u fizičkom modelu epikarsta i sa drugim tipovima kontaminanta (osim veštačkih đubriva), uz obaveznu proveru funkcionisanja modela u slučaju mikrobiološkog zagađenja.

8. Analiza i interpretacija rezultata

8.1. Procesi i reakcije koje se odvijaju u sistemu voda-zemljište-stena u nadizdanskoj zoni karstne izdani

Procesi i reakcije koje se odvijaju u sistemu voda-zemljište-stena u nadizdanskoj zoni karstne izdani se mogu opisati kroz analizu kvaliteta vode koja u ovim procesima učestvuje i čije prisustvo omogućava da se određene hemijske i biohemijske reakcije odigraju u podzemlju. Voda u sistem dospeva iz spoljašnosti u vidu padavina ili u vidu površinske vode, što je u slučaju Suve planine jako retko.

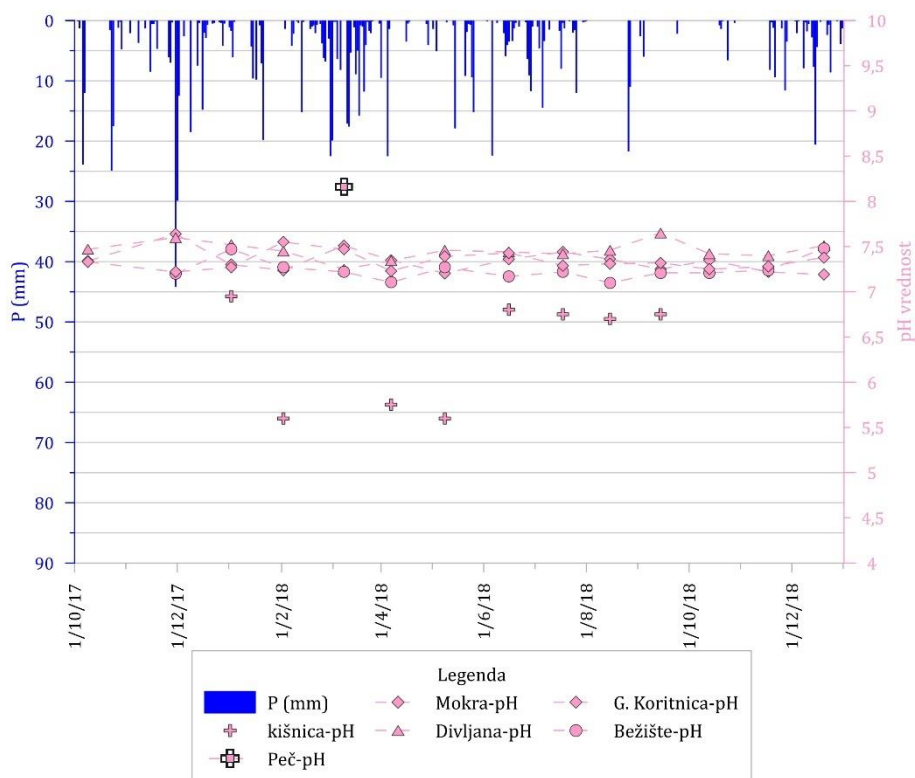
Fizičko-hemijski parametri kišnice, koja je bila prikupljena na lokacijama vrelo Mokra i pećina Peč, na istočnim padinama Suve planine, su bili definisani u slučaju kada je bilo dovoljno vode za vršenje merenja ili hemijske analize. Merenja su pokazala da je prosek pH vrednosti 6,2 za obe lokacije, međutim, malo niže vrednosti pH kišnice su bile beležene na lokaciji vrela Mokra (Slika 8.1. i 8.2.). Izmerene su i jako niske vrednosti specifične električne provodljivosti od 11-73 $\mu\text{S}/\text{cm}$ u kišnici sakupljanoj na lokaciji Mokra, a na lokaciji pećine Peč, te su vrednosti bile od 15 do 82 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Slika 8.3.).



Slika 8.1. Vrednosti pH i specifične električne provodljivosti u kišnici i prokapnoj vodi pećine Peč

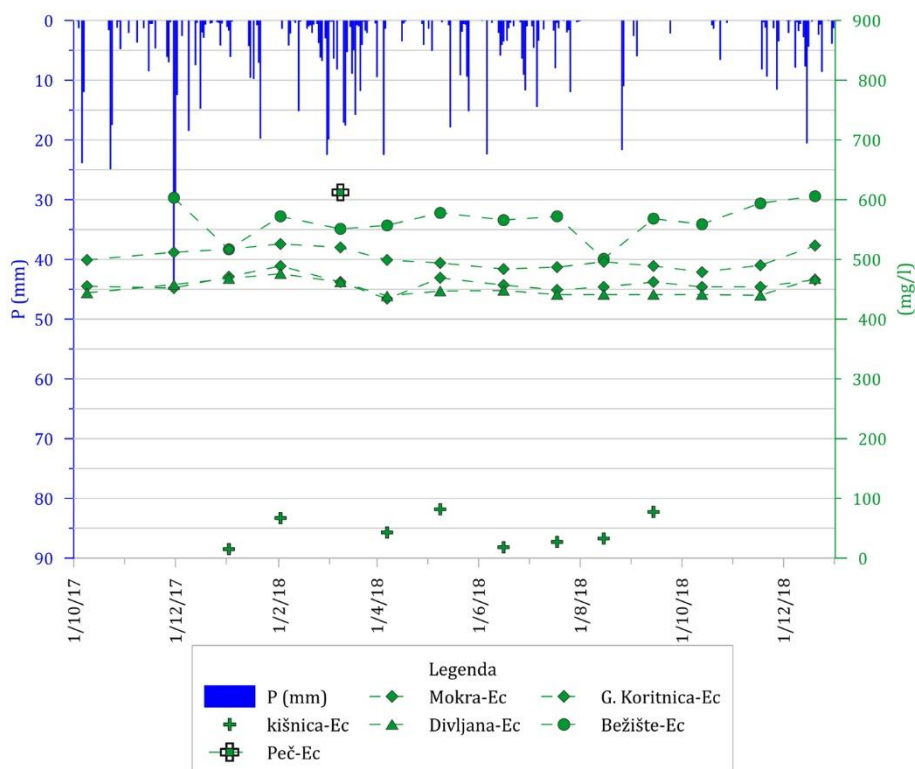
Iste ove vrednosti koje su izmerene u prokapnoj vodi pećine Peč (Slika 8.1.-8.5.) pokazale su da postoje značajne promene u kvalitetu vode koja se filtrirala kroz zemljište, epikarst i karstifikovani krečnjak u povlati pećinske tavanice, u odnosu na kvalitet kišnice. U uzorku procedne vode koji je uzet unutar pećine, sa lokacije koja je kasnije u eksperimentima poslužila za uzorkovanje vode (lokacija C tokom opita trasiranja tj. SP1 tokom opita sa kontaminantom), 10.3.2018. godine izmerena je pH vrednost 8,16 (Slika 8.1. i 8.2.).

U slučaju stena koje su sačinjene od karbonata, u kojem dominira kalcit, pH kišnice će se odmah nakon infiltracije sa početnih vrednosti 5-6 u kontaktu sa krečnjačkim stenama povećati na 8-10 (Sparks, 1995). Kasniji procesi koji se odvijaju u izdani: retardacija, izmena jona, adsorpcija/desorpcija, apsorpcija i difuzija, koji se odvijaju između rastvora nove vode (infiltrirane kišnice) i podzemne vode koja se već nalazi u izdani i krečnjačkim stena, će dovesti do ujednačavanja vrednosti pH.



Slika 8.2. Vrednosti pH u kišnici, prokapnoj vodi i podzemnoj vodi karstnih vrela

Vrednost specifične električne provodljivosti (Ec) u procednoj vodi je bila $612 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Slika 8.1. i 8.3.), pa vrednosti izmerenih parametara pH i Ec ukazuju na brzu promenu kvaliteta infiltrirane vode u odnosu na srednje vrednosti istih parametara koje su izmerene u kišnici. Kao što je navedeno u poglavlju 7.7.1., vrednosti koje su merene u procednoj vodi pećine tokom opita trasiranja (februar 2019. godine) i *in situ* eksperimenta sa kontaminantom (mart 2020. godine), su konstantno mnogo više od vrednosti izmerenih u kišnici: specifična električna provodljivost od 204 do $513 \mu\text{S}/\text{cm}$ i pH od $7,42$ do $8,42$.



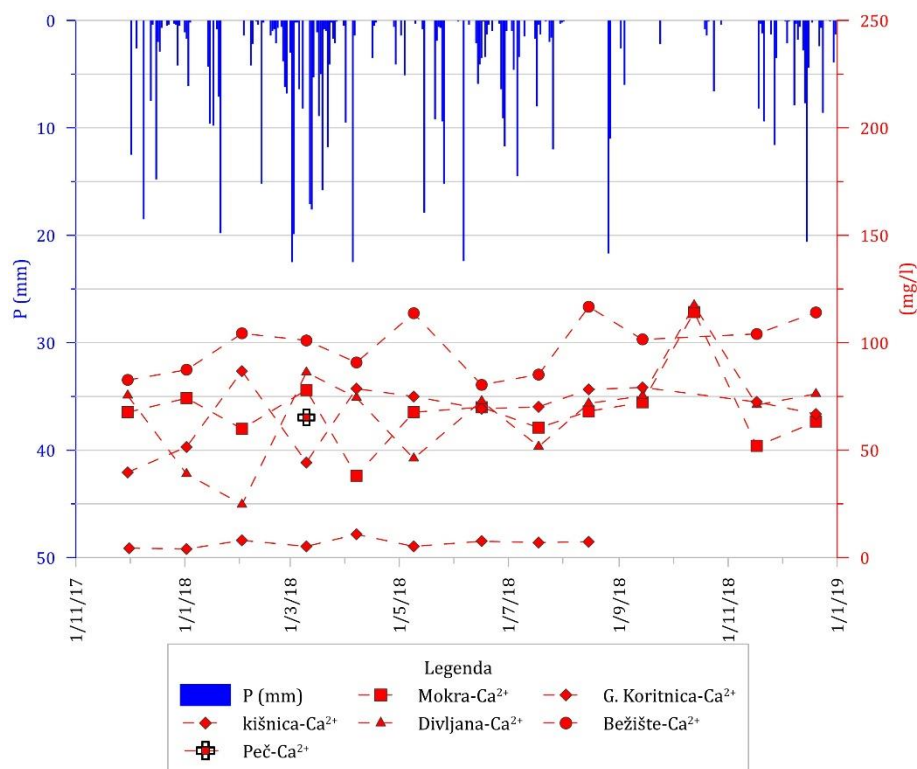
Slika 8.3. Vrednosti Ec u kišnici, prokapnoj vodi i podzemnoj vodi karstnih vrela

Vrednosti pH u podzemnoj vodi sa vrela Mokra $pH_{\min}=7,19$, vrela Divljana $pH_{\min}=7,25$, vrela Gornja Koritnica $pH_{\min}=7,22$ i vrela Bežište $pH_{\min}=7,10$ više su od vrednosti pH u kišnici, a niže u odnosu na vrednosti u procednoj vodi (Slika 8.2.). Viša vrednost specifične električne provodljivosti $Ec_{sr}=565 \mu S/cm$ zabeležena je na vrelu Bežište u odnosu na vrela Mokra $Ec_{sr}=459 \mu S/cm$, Divljana $Ec_{sr}=451 \mu S/cm$ i Gornja Koritnica $Ec_{sr}=501 \mu S/cm$, ali su sve navedene vrednosti niže od onih koje su zabeležene u prokapnoj vodi pećine Peč (Slika 8.3.).

Vrednosti pH i specifične električne provodljivosti izmerene u procednoj vodi, upoređene sa vrednostima u kišnici ili sa podzemnom vodom, u stvari pokazuju da je voda prošla kroz sloj koji ju je obogatio mineralnim materijama, a koji nije u potpunosti diktiran sadržajem kalcijuma, magnezijuma i bikarbonata. Vrednosti Ec u ovoj vodi su za 32% više od iste vrednosti u podzemnoj vodi karstnih vrela Mokra i Divljana, za oko 15% su više nego u podzemnoj vodi karstnih vrela Gornja Koritnica i Bežište, a u odnosu na vrednosti iz kišnice više su čak 13 puta, tako da se može zaključiti da se u epikarstu odvija intenzivno bogaćenje vode mineralnim materijama. Kišnica koja se infiltrira i prihranjuje karstnu izdan je samo malo izmenjenog sastava od lokacije Mokra do lokacije pećine Peč, što ukazuje da prokapna voda u pećini Peč ima takav sastav usled prolaska kroz epikarst i jako tanak sloj karstifikovanog krečnjaka (< 9 metara). Vrednosti tri količinski najzastupljenija jona (Ca^{2+} , Mg^{2+} i HCO_3^-) u procednoj i podzemnoj vodi na karstnim vrelima (Mokra, Divljana, Bežište i Gornja Koritnica) ne razlikuju se mnogo (Slike 8.4.-8.6.), pa se na osnovu ovoga može zaključiti da je u procednoj vodi sadržaj drugih elemenata veći od sadržaja istih tih elemenata u podzemnoj vodi koja se drenira na vrelima u podnožju istočnih padina Suve planine.

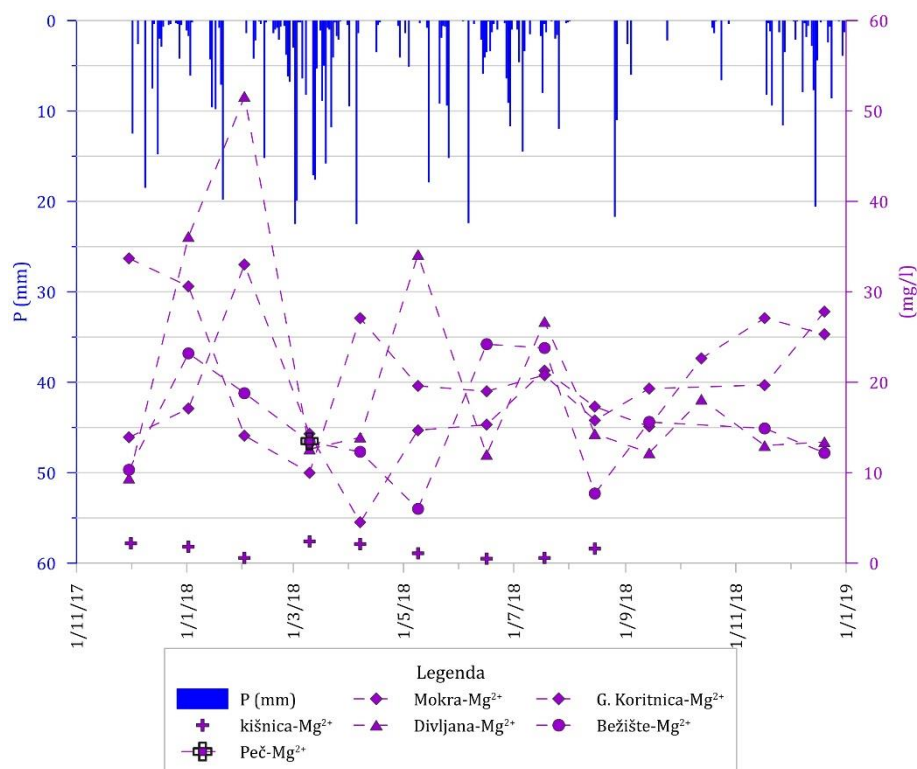
Rezultati istraživanja su potvrdili niske vrednosti koncentracije kalcijuma $[Ca^{2+}]_{\max}= 10,8 \text{ mg/l}$ u kišnici sa lokacije pećine (Slika 8.4.) i magnezijuma $[Mg^{2+}]_{\max}= 2,7 \text{ mg/l}$ u kišnici sa lokacije Mokra (Slika 8.5.), kao i bikarbonata $[HCO_3^-]_{\max}= 2,7 \text{ mg/l}$, takođe, na lokaciji Mokra (Slika 8.6.). Koncentracije gvožđa $[Fe_{\text{total}}]$ u kišnici su se kretala od 0,09-0,24 mg/l, dok su koncentracije sulfata (SO_4^{2-}) bile niže od 5 mg/l, što je granica detekcije uređaja koji je upotrebljen za analize.

Koncentracije kalcijuma i magnezijuma u procednoj vodi uvećane su, 6 odnosno 5 puta respektivno (Slike 8.4. i 8.5.), dok je koncentracija bikarbonata uvećana i do 12 puta u odnosu na srednje koncentracije istih jona, koje su detektovane u kišnici (Slika 8.6.). Koncentracije gvožđa (0,23 mg/l) i sulfata (<5 mg/l), koje su detektovane u uzorku procedne vode, ne pokazuju veća odstupanja od vrednosti koje su zabeležene u podzemnoj vodi sa karstnih vrela. Uvećanje koje je zabeleženo kod vrednosti specifične električne provodljivosti u prokapnoj vodi, ne potiče samo od uvećanja tri osnovna jona, već najverovatnije potiče i od drugih elemenata i mikroelemenata koji ulaze u sastav procedne vode.

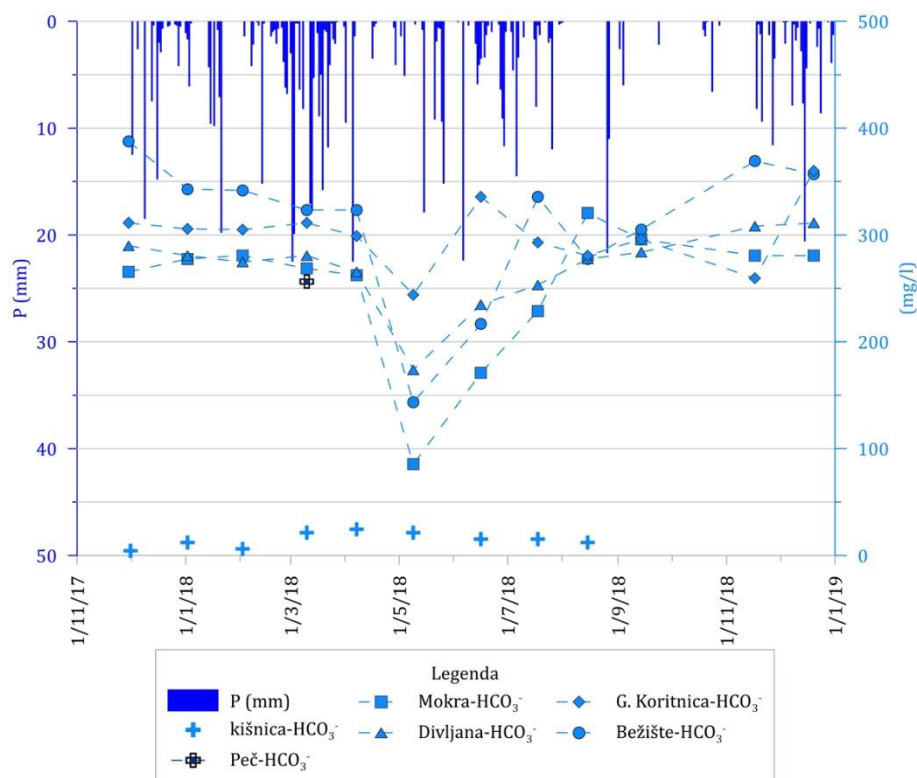


Slika 8.4. Koncentracije kalcijuma u kišnici, prokapnoj vodi i podzemnoj vodi karstnih vrela

Ukoliko se u razmatranje povećane mineralizacije (specifične električne provodljivosti) procedne vode uključe rezultati dobijeni geohemijskom karakterizacijom zemljišta, pre svega vrednosti izmerene u uzorcima SPT1 i SPT2 (lokacija pećine Peč), zapaža se da mineralni sastav zemljišta igra važnu ulogu. Koncentracije aluminijuma u uzorcima SPT1 i SPT2 iznosile su 60,1 mg/g i 32,6 mg/g, dok su koncentracije silicijuma u uzorcima SPT1 i SPT2 bile izuzetno povišene i iznosile su 127,7 mg/g i 115,9 mg/g. U uzorcima SPT1 i SPT2 utvrđene su i značajne koncentracije gvožđa (42,6 mg/g i 21,2 mg/g), kalijuma (10,6 mg/g i 10,1 mg/g) i natrijuma (2,1 mg/g i 2,1 mg/g), a koncentracije kalcijuma (16,3 mg/g i 149 mg/g) i magnezijuma (6,2 mg/g i 9,1 mg/g) su bile očekivano povišene. Suma koncentracija mikroelemenata u uzorcima SPT1 (1,4 mg/g) i SPT2 (1,9 mg/g) iako neznatna, takođe učestvuje u formiranju mineralnog sastava procedne vode. Koncentracije elemenata su uglavnom neznatno niže u uzorku zemljišta SPT2 iz unutrašnjosti pećine, osim kada su u pitanju kalcijum i magnezijum, što ukazuje na visok stepen rastvorljivosti karbonatnih stena koje se nalaze u povlati pećine, kao i na nestabilnu ravnotežu koja postoji u vodi obogaćenoj kalcijumom, magnezijumom i bikarbonatima. Prilikom kapanja vode sa tavanice pećine dolazi do promene ravnoteže u kapi vode pri udaru o tlo, pa se iz rastvora izdvajaju kalcijum i magnezijum karbonat, što je argumentovano i najvećim sadržajem karbonatne komponente u uzorku SPT2 (80,4%). Međutim, usled visokog sadržaja drugih komponenti koje su analizirane u zemljištu može se zaključiti da je procedna voda obogaćena tim elementima i da usled toga ima povišenu specifičnu električnu provodljivost.



Slika 8.5. Koncentracije magnezijuma u kišnici, prokapnoj vodi i podzemnoj vodi karstnih vrela



Slika 8.6. Koncentracije bikarbonata u kišnici, prokapnoj vodi i podzemnoj vodi karstnih vrela

Prosečna vrednost pH u podzemnoj vodi vrela Bežište u poređenju sa osmatranim vrelima Mokra, Divljana i Gornja Koritnica je najniža i ukazuje na boravak podzemne vode u izdani koja nije u potpunosti izgrađena od krečnjaka. Voda u vidu kišnice, prilikom infiltriranja u podzemlje ima niske vrednosti pH (pH=5,45-6,95), i tokom filtracije kroz stene se menja i počinje da odražava sastav sredine kroz koju se kreće, pa je tako pH vrednost u prokapnoj vodi od 7,42 do 8,42. Proces izjednačavanja, u vrelima sa dubljim zaleganjem kanala (Mokra i Divljana) duž

kojih se podzemna voda duže kreće, je intenzivniji i konstantan. Na vrelu Bežište nije bilo dovoljno vremena za alkalizaciju infiltrirane kišnice, što pokazuje da postoji i uticaj epikarsta, koji je detektovan na površini koja predstavlja oblast prihranjivanja vrela Bežište. Sastavom epikarsta dominira krečnjak, međutim, sekundarni sastojci utiču na smanjenje pH vrednosti vode, a usled povišenog sadržaja ugljen-dioksida, kao i usled postojanja organske materije u okviru epikarsta.

Povećana vrednost specifične električne provodljivosti u podzemnoj vodi sa vrela Bežište, u odnosu na vodu sa druga tri vrela (Mokra, Divljana i Gornja Koritnica), kao i najveća promenljivost ovog parametra u podzemnoj vodi tokom 2018. godine ukazuju da je ovo vrelo izloženo prilivu voda iz dela izdani koja nije u potpunosti krečnjačkog sastava, kao što se može videti i iz vrednosti pH.

Ukoliko uzmemo u obzir i sastav zemljišta (uzorci SPT3-SPT5), opet možemo uočiti povišene sadržaje nekih elemenata, koji mogu uticati na povećanje specifične električne provodljivosti u podzemnoj vodi vrela Bežište. Koncentracija gvožđa u uzorcima zemljišta dostiže 54 mg/g, koncentracija kalijuma skoro 20 mg/g, a natrijuma 4 mg/g.

Rezultati hemijskih analiza pokazuju da su u vodi karstnog vrela Bežište koncentracije kalcijuma u proseku za 10-15% više od onih koje su zabeležene u podzemnoj vodi sa vrela Mokra i Divljana (Slika 8.4). Razlika u koncentraciji je posledica pojačanog rastvaranja kalcita iz krečnjaka u otvorenoj epikarstnoj izdani, kojom se delimično prihranjuje izdan koja se drenira na vrelu u Bežištu. Pojačano rastvaranje dešava se usled većih koncentracija ugljen-dioksida koji potiče iz zemljišta, koje predstavlja sastavni deo epikarsta, kao i usled potpune otvorenosti zone prihranjivanja ovog vrela.

Koncentracije magnezijuma na vrelu Bežište su u proseku niže od onih na vrelima Mokra, Divljana i Gornja Koritnica (Slika 8.5.), a niže vrednosti koncentracija Mg^{2+} se mogu objasniti dužinom boravka vode u podzemlju, pošto je za bogaćenje podzemne vode jonima magnezijuma potrebno malo više vremena usled manje rastvorljivosti magnezijum karbonata.

Koncentracije bikarbonata u podzemnoj vodi vrela Bežište su uglavnom više, a pokazuju i najveću vrednost standardne devijacije indikujući da je mešanje podzemne vode iz epikarstne i karstne izdani intenzivnije (Slika 8.6.).

Analize stabilnih izotopa u uzorcima podzemne vode iz karstne izdani su pokazale da su podzemne vode na istočnim padinama Suve planine relativno mlade, da kontakt podzemne vode i krečnjaka kroz koji se voda filtrira nije dug. Vrednosti stabilnih izotopa kiseonika i deuterijuma, koje su dobijene analizom uzoraka iz podzemne vode sa vrela Mokra u proseku su najlakši, dok su najteži zabeleženi na vrelu Bežište. Na osnovu ovoga se može zaključiti da su vode sa vrela Bežište provele najkraći period vremena u podzemlju i da je ovo vrelo zaista pod direktnim uticajem padavina, nezavisno od toga da li su u pitanju padavine u vidu kiše ili snega.

Veličina „rezervoara“ koji se prazni na Bežištu i Gornjoj Koritnici je manja, pa je uticaj padavina i epikarsta na kvalitet podzemne vode veći, ali je znatno izraženiji uticaj epikarsta na podzemnu vodu vrela Bežište. Vrednosti pH i specifične električne provodljivosti merene na vrelu Bežište se razlikuju od vrednosti na drugim vrelima. Prosečno najniža vrednost pH je bila izmerena u vodi sa vrela Bežište, dok je beležena najviša vrednost E_c , a koncentracija magnezijuma je u proseku najniža na ovom vrelu. Sa druge strane ustanovljen je najteži izotopski sastav na ovom vrelu. U proseku 3,5‰ veće vrednosti δD i 0,5‰ više vrednosti $\delta^{18}O$ u odnosu na vrednosti sa

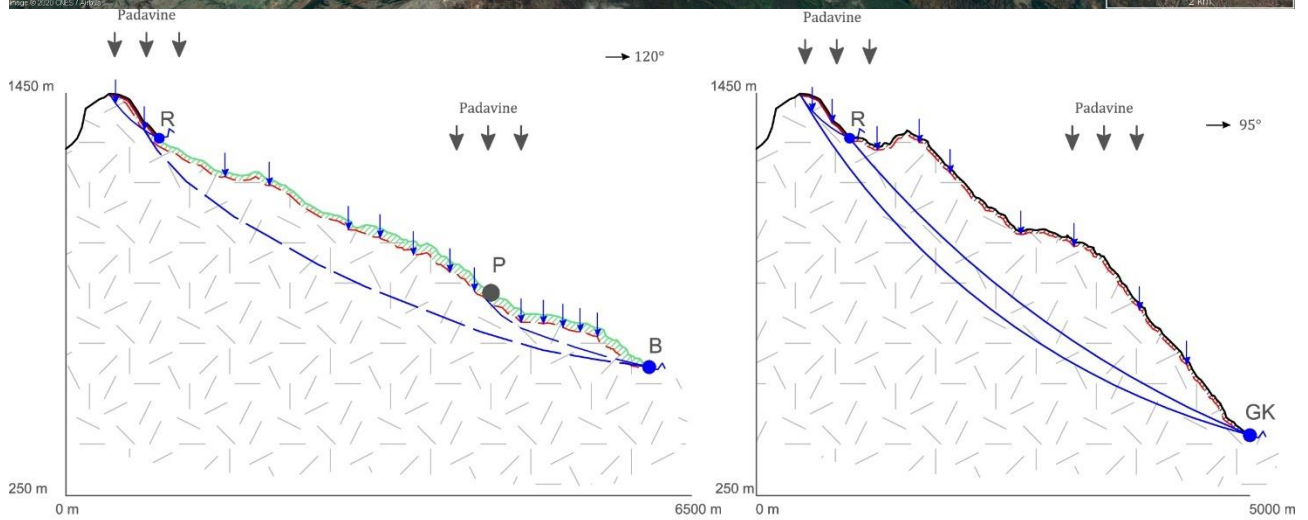
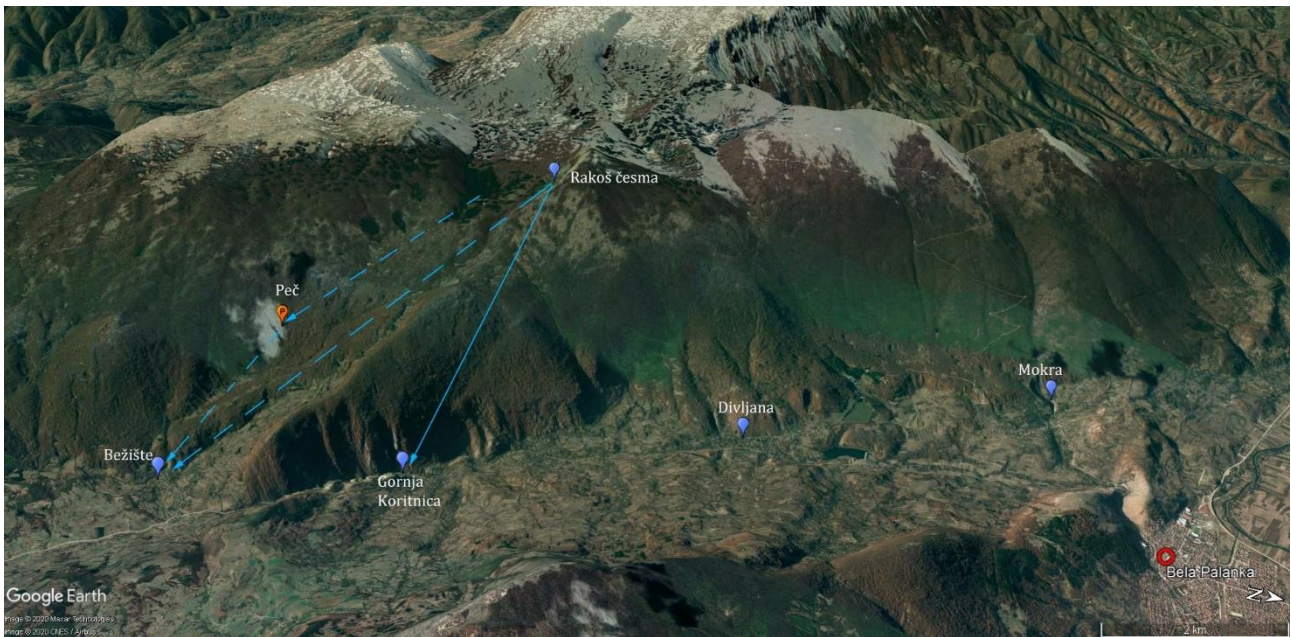
ostala tri vrela. Navedene činjenice pokazuju da podzemna voda koja ističe na ovom vrelu najkraće boravi u podzemlju.

Rezultati izotopskih analiza korespondiraju sa rezultatima fizičko-hemijskih merenja i analiza. Kvalitet voda sa vrela Bežište i Gornja Koritnica je promenljiviji tokom godine, jer su vode „mlađe“ od onih koje se dreniraju na vrelima Mokra i Divljana. Promene kvaliteta se javljaju usled kraćeg boravka vode u podzemlju, usled čega ne može da dođe do ujednačavanja hemijskog sastava podzemne vode, kao što je to slučaj sa podzemnom vodom iz karstnog izdanskog sistema koji se drenira na vrelima Mokra i Divljana. Takođe, na vrelu Bežište se najbolje može videti uticaj epikarsta koji je razvijen u zoni prihranjivanja ovog vrela, jer iako su vrednosti izotopa kiseonika i deuterijuma visoke, ne može se zaključiti da voda koja se pojavljuje na vrelu potiču direktno od profiltrirane kišnice, već da uticaj na sastav podzemne vode ima i epikarstna izdan, na šta ukazuju podaci o izmerenim fizičko-hemijskim parametrima i rezultati hemijskih analiza podzemne vode iz ovog vrela. Vrednosti izotopa iz podzemne vode vrela Bežište pokazuju da je voda koja završi na ovom vrelu infiltrirana na većim nadmorskim visinama i da je relativno brzo stigla do mesta isticanja.

8.2. Izmena sastava podzemnih voda od ulaza do izlaza iz sistema karstne izdani „Bežište-Gornja Koritnica-Divljana-Mokra“

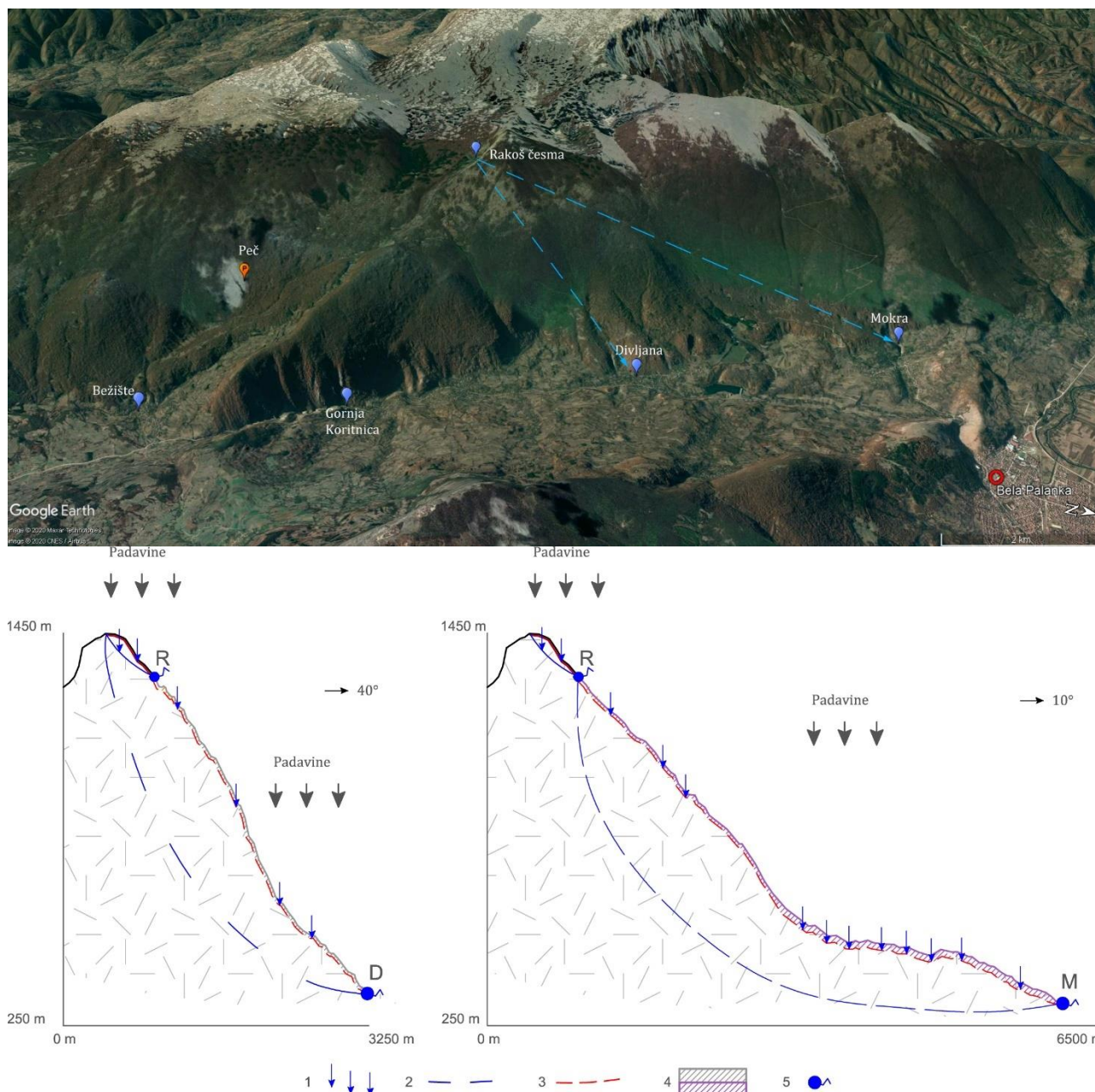
Podzemne vode na istočnim padinama Suve planine, u okviru uže zone istraživanja nakon infiltriranja kreću se kroz karstifikovane karbonatne stene, ka lokalnom erozionom bazu (izvorima): Rakoš česma (R), veći broj povremenih epikarstnih izvora poput PK Proseka i ka regionalnom erozionom bazu (vrelima u podnožju): Bežište (B), Gornja Koritnica (GK), Divljana (D) i Mokra (M) (Slike 8.7. i 8.8.). Na ovom putu voda se nakon prvobitne infiltracije atmosferskih padavina nekoliko puta pojavljuje na površini i ponovo ponire ili se vraća u atmosferu putem procesa evaporacije ili evapotranspiracije.

Cirkulacija podzemne vode se odvija i od mesta poniranja kratkog površinskog toka koji nastaje od Rakoš česme ka podnožju Suve planine. Opiotom trasiranja (Petrović J, 1958), dokazana je povezanost ponirućeg toka Rakoša i vrela u Gornjoj Koritnici (Slika 8.7.). S obzirom na činjenicu da je najveći broj ruptura na istočnim padinama Suve planine pravca pružanja JZ – SI i ZJZ – ISI, može se zaključiti da je kretanje podzemnih voda akumuliranih u karstnoj izdani usmereno od ose antiklinale ka istoku i severoistoku. Dva najjača i najstabilnija vrela Mokra i Divljana su upravo locirana na mestu susreta regionalnog koritničkog raseda, longitudinalnog pravca pružanja, i lokalnih transverzalnih raseda. Isticanje podzemne vode na vrelima Gornje Koritnice i Bežište je kontrolisano rupturama lokalnog karaktera, koje su pravca pružanja 60° do 90°. Celokupni karstni sistem istočnih padina Suve planine ima blagi nagib ka jugoistoku, jer i osa antiklinale tone u tom smeru.



- 1 ↓ ↓ ↓ ↓
- 2 ————
- 3 ————
- 4 - - - -
- 5
- 6 ● ^
- 7 ●

Slika 8.7. Pravci filtracije podzemne vode na istočnim padinama Suve planine, 1 – infiltracija vode u epikarst, 2 – utvrđen pravac, 3 – pretpostavljeni pravac, 4 – voda u epikarstu, 5 – epikarst, 6 – karstno vrelo, 7 – pećina, B – Bežište, GK – Gornja Koritnica, R – Rakoš, P – Peč



Slika 8.8. Pravci filtracije podzemne vode na istočnim padinama Suve planine, 1 – infiltracija vode u epikarst, 2 – pretpostavljeni pravac, 3 – voda u epikarstu, 4 – epikarst, 5 – karstno vrelo, B - Bežište, GK - Gornja Koritnica, R - Rakoš, P - Peč

Kroz zemljište migriraju i cirkulišu različite supstance u obliku pravih i koloidnih rastvora, a u njemu se odvija i mnoštvo hemijskih reakcija. Kao rezultat kretanja supstanci i biološke aktivnosti organizama u zemljištu se formiraju slojevi određenih fizičko-hemijskih i bioloških osobina. Na taj način u zemljištu se odvija prvi korak u promeni sastava infiltrirane površinske vode i njen postepen prelaz u podzemnu vodu.

Brzina filtracija podzemne vode kroz epikarstnu izdan, proračunata na osnovu opita trasiranja i tokom opita sa kontaminantom, manja je od brzine cirkulacije kroz karstnu izdan. Fiktivna brzina kretanja vode kroz sloj epikarsta je bila u opsegu od 0,0041 m/s do 0,006 m/s, a virtuelna brzina kretanja podzemne vode kroz karstnu izdan koja se drenira na Gornjoj Koritnici je bila 0,048 m/s. Međutim, vrednosti filtracije vode i kroz epikarstnu izdan i kroz karstnu izdan su u skladu sa vrednostima koje su dobijene za karstnu izdan na prostoru karstnih terena istočne Srbije (Stevanović, 1991).

Količina vode koja se filtrirala kroz epikarst je tokom sprovođenja terenskih eksperimenata bila značajna s obzirom na zimske uslove koji su vladali na terenu. Naročito se količina prokapne vode menjala tokom opita sa kontaminantom (početak marta 2020. godine), kada su bile registrovane obilne padavine u vidu kiše i susnežice tokom samo 24 h. Količina vode koja se filtrirala kroz epikarst bila je značajna u periodu nakon zasićenja epikarstne izdani kišnicom. Usled brzog otapanja snežnog pokrivača je došlo do potiskivanja vode akumulirane u epikarstnoj izdani naniže, što je još jednom povećalo količinu procedne vode, ovog puta do maksimalne izmerene vrednosti. Ponašanje epikarstne izdani u smislu pojačanog dreniranja akumulirane vode direktna je posledica efekta „klipa“.

Kišnica se u atmosferi obogaćuje neorganskim i organskim materijama pre svega rastvaranjem gasova (NO_x , CO_2 , SO_x ...) i rastvaranjem materijala koji se nalazi u česticama prašine i čađi. Kišnica uglavnom ima niže vrednosti pH i kao što je navedeno kišnica koja se izlučuje na teritoriji Suve planine ima pH vrednost od 5,4 do 6,9. Srednji sadržaj rastvorenih mineralnih materija, izveden iz merenja specifične električne provodljivosti (US EPA, 1992), je nizak i iznosi od 7 do 53 mg/l, a niže vrednosti su povezane sa periodima izlučivanja većih količina padavina (prolećni i letnji pljuskovi).

Prokapna voda je značajno izmenjenog sastava u odnosu na sastav kišnice, što se ogleda u uvećanim vrednostima pH, specifične električne provodljivosti, koncentracije kalcijuma, magnezijuma i bikarbonata. Promene su najvećim delom nastale tokom filtracije vode kroz zemljišni sloj, kao i kroz epikarst u čijem sastavu su sadržane određene količine zemljišnog materijala. Sposobnost zemljišta za razmenjivu adsorpciju jona se povećava sa povećanjem pH rastvora sa kojim se zemljište nalazi u ravnoteži. Tako se pri povećanju pH sredine od 6-11 kapacitet razmene jona može povećati 2-3 puta (Jakovljević et al, 2000), pa je navedeno povećanje izmerenih parametara sastava prokapne vode očekivano. Osim procesa rastvaranja mineralne materije iz zemljišta i razmene jona, u zemljištu se dešavaju i određeni biohemijski procesi usled delovanja živog sveta i produkata njihovog metabolizma (bogaćenje rastvora ugljen-dioksidom, azotnim jedinjenjima, huminskim kiselinama i sl.), tako da je proces izmene kvaliteta infiltrirane vode intenzivan na jako malom rastojanju.

Rezultati opita u laboratorijskim uslovima, u fizičkom modelu epikarsta, dodatno argumentuju tvrdnju da se vrednosti pH i specifične električne provodljivosti brzo menjaju prilikom mešanja kišnice i podzemne vode (Slika 7.127.).

Mikroelementi su zabeleženi u izuzetno niskim koncentracijama u podzemnoj vodi karstnih vrela ili nisu uopšte detektovani. Hemijske analize u uzorcima podzemne vode karstnih vrela Divljana, Gornja Koritnica i Bežište su pokazale da koncentracija gvožđa ne prelazi 21 $\mu\text{g/l}$, dok u vrelu Mokra nije ni detektovano. Mangan je detektovan samo u vodi iz vrela Mokra (0,003 $\mu\text{g/l}$) i Gornja Koritnica (2 $\mu\text{g/l}$). Arsen je detektovan u svim uzorcima podzemne vode iz karstnih vrela u koncentracijama od 0,058 do 0,204 $\mu\text{g/l}$. Bakar je zabeležen u jednoj seriji uzoraka u koncentraciji od 0,045 do 0,426 $\mu\text{g/l}$. Barijum se u podzemnoj vodi kretao u koncentraciji od 0,024 do 0,410 $\mu\text{g/l}$, mada nije detektovan u uzorku iz vrela Divljana. Cink je detektovan u koncentracijama od 1,27 do 28,2 $\mu\text{g/l}$ (u vodi sva 4 vrela), a olovo u koncentraciji 0,039 do 0,548 $\mu\text{g/l}$ (Divljana, Gornja Koritnica i Bežište). Nikl je zabeležen u rasponu od 0,032 do 0,083 $\mu\text{g/l}$, ali ne i u uzorku iz vrela Divljana. Živa i kobalt nisu detektovani ni u jednom uzorku podzemne vode. U uzorku procedne vode koji je analiziran na sadržaj mikroelemenata utvrđene su sledeće koncentracije: As = 0,202 $\mu\text{g/l}$; Ba = 0,410 $\mu\text{g/l}$, Cd = 0,001 $\mu\text{g/l}$, Cr = 0,070 $\mu\text{g/l}$, Cu = 0,054 $\mu\text{g/l}$ i Ni = 0,083 $\mu\text{g/l}$.

Ukoliko koncentracije mikroelemenata u procednoj vodi i podzemnoj vodi uporedimo sa osrednjenim koncentracijama mikroelemenata koje su detektovane u uzorcima zemljišta (SPT1-SPT8) vidi se da su koncentracije određenih elemenata značajno opale, ali i da je došlo do povećanja koncentracija određenih mikroelemenata. Kobalt uopšte nije detektovan u uzorcima procedne i podzemne vode. Koncentracija gvožđa u vodi je u odnosu na koncentraciju u zemljištu umanjena više od 95 puta a mangana više od 300 puta. Takođe, veliko je umanjeње koncentracije hroma u podzemnoj vodi od 3 do 17 puta, dok je u procednoj vodi u odnosu na koncentraciju u zemljištu primećeno povećanje od oko 25%. Koncentracija arsena je u uzorku procedne vode i u uzorcima podzemne vode povećana do 5 puta. Kadmijum je u podzemnoj vodi iz vrela Mokra povećan skoro 3 puta, a u procednoj vodi za oko 60%. Koncentracija bakra je u vodi uvećana 1,5 do 14 puta. Koncentracija nikla je u procednoj vodi povećana za oko 85 %, a u podzemnoj vodi umanjena u odnosu na koncentraciju u zemljištu 9% do 40%. Olovo nije detektovano u procednoj vodi niti podzemnoj vodi iz vrela Bežište, a koncentracija je u podzemnoj vodi iz vrela G. Koritnica smanjena 60%, ali je uvećana u podzemnoj vodi vrela Mokra (8%) i Divljana (više od 8 puta). Na kraju cink je detektovan jedino u podzemnoj vodi iz vrela Divljana, a koncentracija je u odnosu na vrednost u zemljištu uvećana 8,5 puta. Međutim, sve ove promene koncentracija mikroelemenata u podzemnoj i u procednoj vodi su, ukoliko se posmatra kroz apsolutne veličine, jako male i iznose od 0,001 µg/l do 43 µg/l, i ne utiču uopšte na kvalitet podzemne vode.

Najkarakterističnija reakcija obrazovanja hemijskog sastava podzemnih voda u okviru krečnjačkih terena jeste ugljenokiselinsko raspadanje (opisano u poglavlju 4.1.) i njegov glavni agens – ugljena kiselina. Intenzitet raspadanja (korozije) zavisi od koncentracije CO₂ u vodi. Međutim, sva ugljena kiselina nije u stanju da reaguje sa stenom, već samo jedan njen deo, koji se naziva “agresivnom ugljenom kiselinom”. Rastvorljivost CaCO₃ u normalnim uslovima je svega 13 mg/l, dok rastvorljivost karbonata zemnoalkalnih metala jako raste u prisustvu ugljene kiseline (Jakovljević et al, 2000; Bonacci, 1987). Sa povećanjem pH stepen disocijacije slabe ugljene kiseline raste.

Intenzivno rastvaranje krečnjaka se dešava već u epikarstu, što podaci prikupljeni sa lokacije pećine Peč potvrđuju. Porast pH i specifične električne provodljivosti, zajedno sa pratećim povećanjem sadržaja osnovnog jonskog sastava i mikroelemenata (koji su poreklom pre svega iz zemljišta), ukazuje na značajne izmene sastava infiltrirane vode na samom ulasku u karstni izdanski sistem. Nakon nastavka filtracije vode kroz karstnu izdan, procesi rastvaranja krečnjaka i obogaćivanja sastava podzemne vode kalcijumom i magnezijumom sa jedne, a bikarbonatima sa druge strane, preuzimaju primat nad ostalim procesima, koji se i dalje odvijaju ali u znatno manjoj meri. Na taj način podzemna voda, koja ističe na karstnim vrelima u podnožju istočnih padina Suve planine, ima katjonski sastav u kojem potpuno dominira kalcijum (>85%ekv), magnezijum(~12%ekv), a u anjonskom bikarbonati (>95%), dok su kalijum+natrijum, sulfati i hloridi prisutni u koncentracijama koje ne prelaze 3%ekv.

8.3. Uloga i funkcija epikarsta u delu karstnog sistema Suve planine

Tokom obavljanja opita trasiranja inertnim obeleživačem, koji je sproveden tokom zime 2019. godine (u periodu 16.2.2019-23.2.2019. godine), temperature vazduha bile su u blagom porastu i počelo je otapanje snežnog pokrivača, koji je bio prisutan na istražnom području. Stoga je količina vode koja se filtrirala kroz tavanicu pećine bila veća na početku testa nego u danima tokom trajanja monitoringa. Usledilo je opadanje temperature vazduha, ali se otapanje snega nastavilo, do momenta kada je snežni pokrivač nestao (Slika 8.9.). To je uslovalo i opadanje količine procedne vode na većini lokacija unutar pećine gde je prikupljanja. Količina

vode koje je kapala, opala je tokom poslednja 24h opita, za 75% u odnosu na količinu prokapne vode na početku opita. Stoga je na većini lokacija kapanje vode prestalo, a na kraju je došlo i do zamrzavanja vode, usled naglog pada temperature u periodu 22/23.2.2019. godine.



Slika 8.9. Snežni pokrivač na početku (18.2.2019. godine) i kraju opita trasiranja (21.2.2019. godine)



Slika 8.10. Poljana, lokacija Bukovica, sa snežnim pokrivačem i bez njega u razmaku od 56 sati, tokom testa obavljenog u martu 2020. godine

Slični zaključci o količini prokapne vode, se mogu doneti i na osnovu drugog eksperimenta koji je sproveden u sličnim zimskim uslovima. Eksperiment sa kontaminantom je sproveden u periodu 6.3.2020-13.3.2020. godine. Temperature vazduha su bile znatno više nego tokom testa trasiranja iz 2019. godine, kao i količine izlučenih padavina, palo je 35-40 mm kiše u roku od 24h (drugog dana testa), a onda su usledile i snežne padavine tokom trećeg dana (Slika 8.10.), koje su se brzo otopile, a infiltrirana voda je konstantno pristizala u epikarstnu izdan.

Usled tih okolnosti epikarst je bio u stanju konstantnog hidrauličkog vertikalnog pritiska što je izazvalo konstantno filtriranje vode u donje delove epikarsta. Kapanje vode sa tavanice pećine je bilo konstantno, iako sa varijacijama u količini. Količina vode koja se procedivala je određena nakon nekoliko uzastopnih merenja količina vode, na određenim lokacijama. Došlo se do zaključka da je u maksimumu količina procedene vode koja se mogla „videti“ bila od 23,5-33,25 l/h tj. 0,0065-0,0092 l/s. Količine vode koje su se procedivale su varirale od lokacije do lokacije, ali postojala je promena količine vode i tokom odvijanja opita, a sumarne količine vode koje su prolazile kroz pećinski kanal, na svom putu ka karstnoj izdani iznosile su:

- 6-7. mart: $Q=15-20$ l/h,
- 7-8. mart: $Q=25-30$ l/h,
- 8-9. mart: $Q=28-32$ l/h,

- 10. mart: Q=30-34 l/h,
- 11-12. mart: Q=35-40 l/h, i
- 13. mart: Q=15-20 l/h.

Rezultati opita trasiranja pomoću Na-fluoresceina, ali i eksperimenta sa nalivanjem kontaminanta na sloj tla iznad pećine Peč, pokazali su da se epikarst ponaša kao polupropusna membrana, koja deo vode i supstance zadržava u sebi, ali je onda u sledećem „trenutku“ ispušta u sredinu (Slika 8.11.). „Trenutak“ otpuštanja vode/supstance se može desiti neposredno nakon nailaska prvog talasa infiltrirane vode ili nakon nekoliko sati/dana.

U slučaju opita trasiranja zadržavanje i otpuštanje vode sa Na-fluoresceinom evidentirano je na lokacijama I, L i D, koje su, kasnijom analizom uvrštene u lokacije na kojima se pojavljuje voda koja se kreće kroz sekundarnu mrežu kaverni i drenova. Traser se na lokaciji I pojavio u tri talasa, dok u jednom periodu nije ni isticao na toj lokaciji (tokom 13 sati 19.2.2019. godine), pri čemu je koncentracija trasera u svakom sledećem talasu dostizala veću vrednost ($0,08 \mu\text{g/l} < 0,09 \mu\text{g/l} < 0,14 \mu\text{g/l}$ – Slike 7.92. i 7.93.). Na toj lokaciji je traser, takođe, poslednji put detektovan, 53 sata nakon nalivanja rastvora vode i trasera, dok su na svim drugim lokacijama poslednji uzorci sa obeleživačem detektovani 21 sat nakon nalivanja trasera. U slučaju lokacije L, zadržavanje se ogleda u dostizanju pika koncentracije trasera od $0,12 \mu\text{g/l}$ nakon samo 5 sati od nalivanja, pa postepenim spuštanjem i održavanjem koncentracije na $0,09 \mu\text{g/l}$. Novi pik od $0,10 \mu\text{g/l}$ je zabeležen u uzorku od 19.2.2019. godine u 9h, nakon čega se traser više nije pojavljivao. Na lokaciji D traser je dostigao pik 18.2.2019. godine u 18h, a posle toga koncentracija opada na $0,04 \mu\text{g/l}$ i ne menja se, dok ne prestane isticanje vode sa traserom 19.2.2019. godine u 9h, pa je ovde slučaj usporenog kretanja vode kroz kaverne manjeg promera od onih kojima je voda dospela do ostalih lokacija u pećini uz delimično zadržavanje trasera.



Slika 8.11. Filtracija vode kroz epikarst na lokaciji pećine Peč: a) kanal na kraju pećine; b) lokacije I i L; c) lokacije C, D i F; d) ispred ulaza u pećinu

Zadržavanje i ispuštanje vode iz epikarsta, objašnjeno u poglavlju 4.3.1., praktično znači da sa opadanjem količine vode u poroznom/kavernoznom sistemu, opada i vertikalni pritisak koji ta voda vrši na donje slojeve, pa opada i količina i intenzitet isticanja vode (količina prokapne vode u pećini Peč opada).

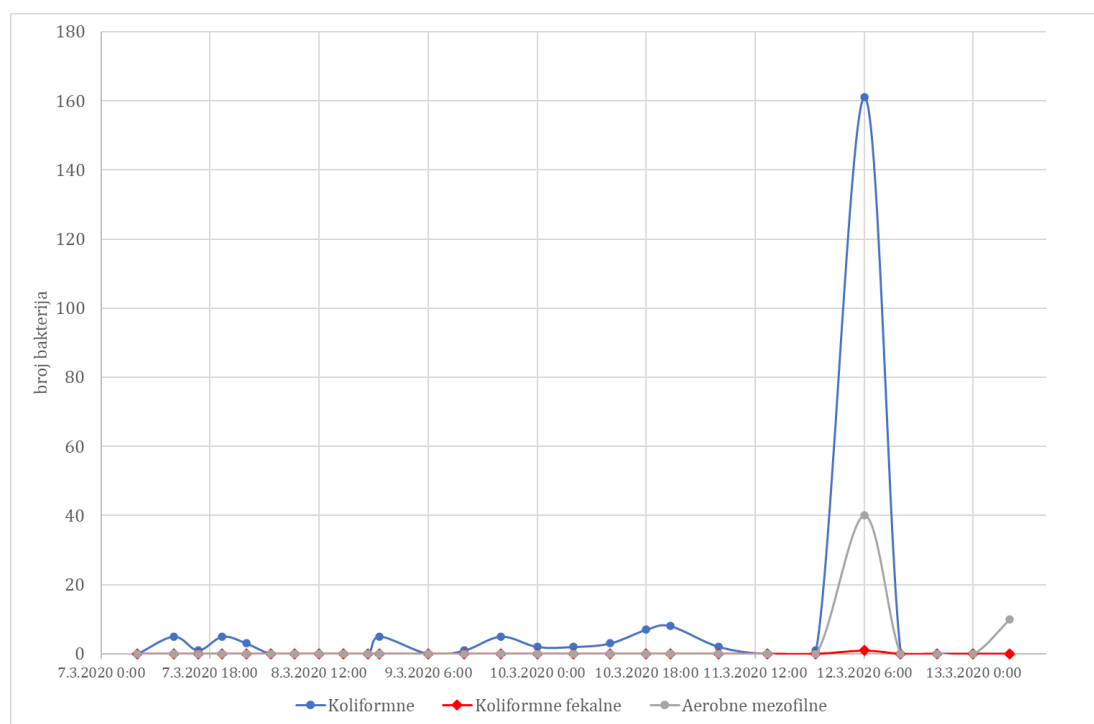
Do zadržavanja i naknadnog pojavljivanja trasera tokom opita moglo je doći iz dva razloga:

- 1) razgranatost mreže kanala, koji su verovatno sifonskog karaktera u određenim delovima, pa kada voda sa traserom dospe u sifon ne može da nastavi filtraciju dok je ne potisne nova voda;
- 2) delimična adsorpcija trasera na čestice zemljišta (*terra rosa* ili minerale glina) koje se nalaze u epikarstu i suspendovane u vodi (Milanović P, 1981), a zatim i desorpcije trasera kada naiđe voda u kojoj je koncentracija trasera manja ili trasera nema.

Tokom opita sa kontaminantom zadržavanje i otpuštanje se moglo delimično uočiti u koncentraciji nitrata i promeni broja detektovanih bakterija u uzorcima prikupljene vode.

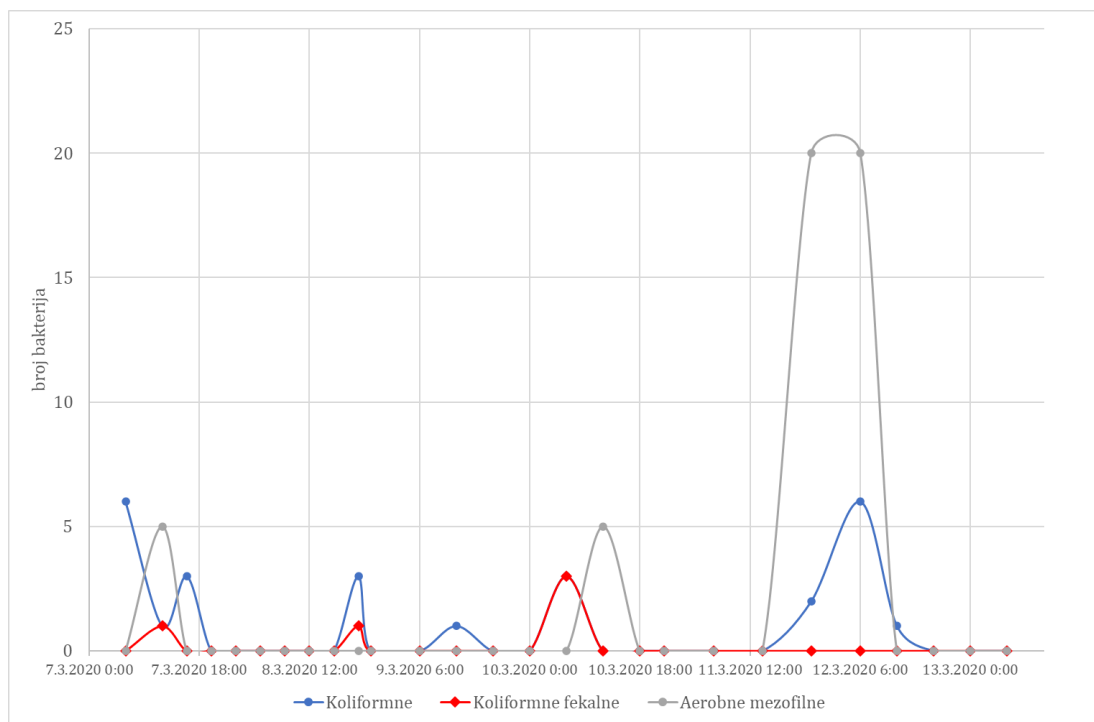
Koncentracija nitrata se tokom opita sa kontaminantom povećavala u procednoj vodi u talasima, koji su bili diktirani povećavanjem količine vode u epikarstnoj izdani. Prvi pik je bio posledica otapanja snega na opitnom poligonu i početak prve kišne epizode, dok je drugi bio posledica intenziviranja kiše, a treći pik (1,7 mg/l), koji je bio najviši je bio posledica prethodno izlučenih padavina, ali i otapanja snega koji je pao nakon obilne kiše.

Maksimalan broj koliformnih bakterija (161 cfu) zabeležen je na lokacijama SP1 i SP3, ali u različitim vremenskim presecima. Na lokaciji SP1, koja je najdalje od LNK, bakterije su detektovane tek nakon dugotrajnih padavina i dodatnog otapanja snežnih padavina (Slika 8.12.). Skoro sve šupljine su bile ispunjene vodom, pa je došlo do potiskivanja zadržanih bakterija i njihovog transporta ka daljim lokacijama u pećini.



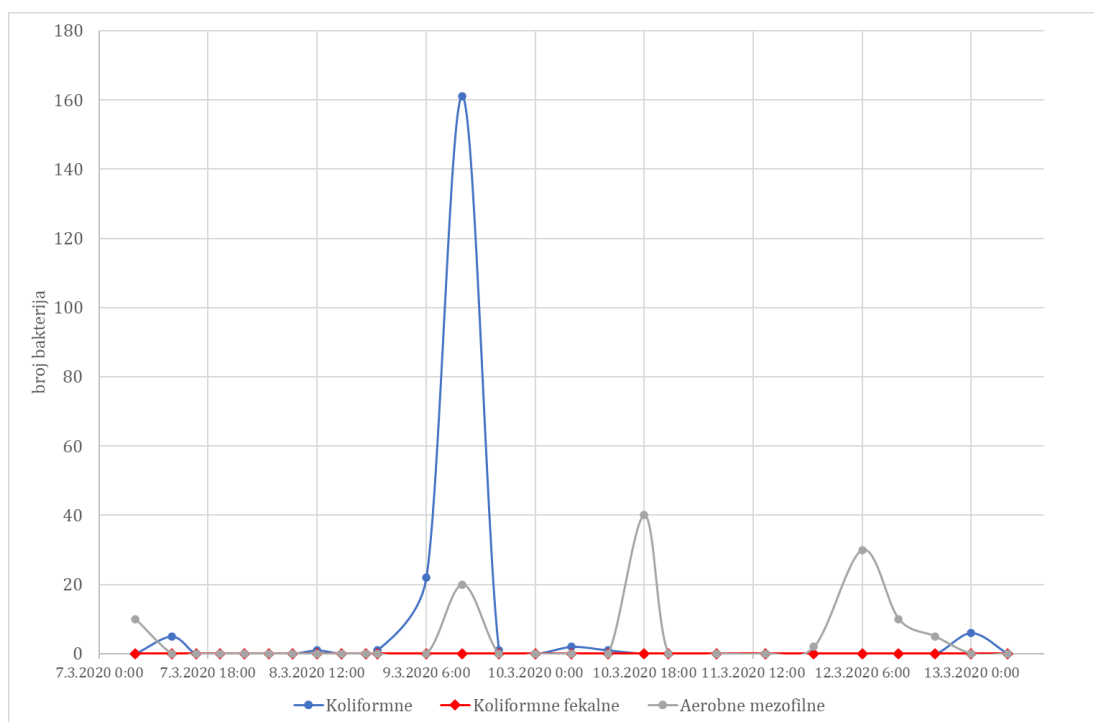
Slika 8.12. Pojavljivanje bakterija na lokaciji SP1, tokom opita sa kontaminantom

Na lokaciji SP2, koliformne bakterije nisu detektovane u tako velikom broju (max = 6 cfu), međutim, zabeleženo je pojavljivanje koliformnih bakterija i koliformnih bakterija fekalnog porekla u tri talasa, koji takođe, korespondiraju sa već opisanim promenama količina infiltriranih voda (Slika 8.13.). A slično postepenom povećanju koncentracije nitrata i ovde se broj koliformnih bakterija, koji se probio do tavanice pećine, povećavao iz talasa u talas: 1 < 3 < 4 cfu.



Slika 8.13. Pojavljivanje bakterija na lokaciji SP2, tokom opita sa kontaminantom

Veliki broj koliformnih bakterija koji je detektovan na lokaciji SP3, takođe, je posledica infiltracije kišnih padavina. S obzirom da je ova lokacija najbliža LNK, prvo povećanje hidrostatičkog pritiska u gornjim slojevima, usled priliva infiltrirane kišnice, se odmah odrazilo na kretanje kontaminanta najkraćim i najširim kanalima i kavernama (Slika 8.14.). Nakon tog maksimuma, na lokaciji SP3 detektovane su koliformne bakterije u manjem broju, međutim ima ih i u pretposlednjem uzorku procedne vode.



Slika 8.14. Pojavljivanje bakterija na lokaciji SP3, tokom opita sa kontaminantom

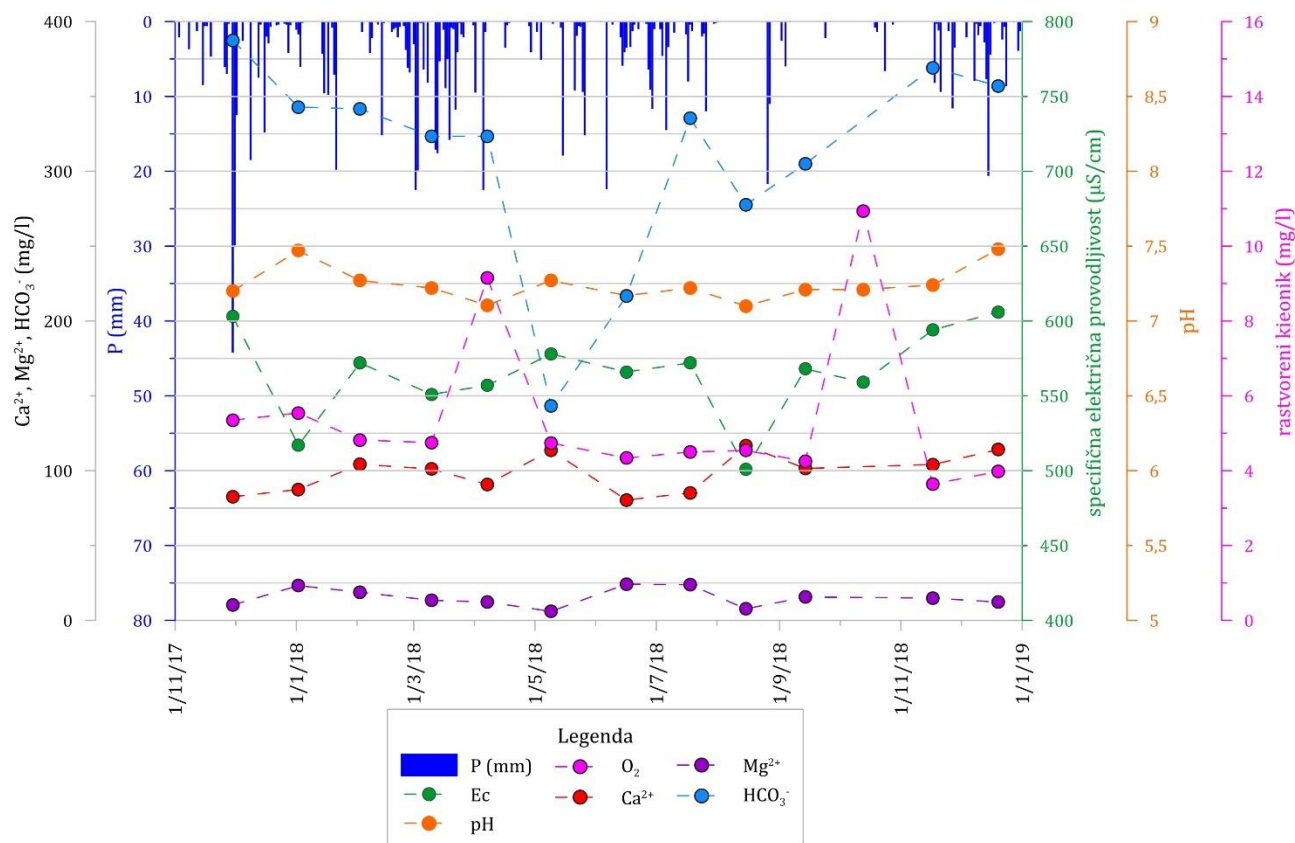
Ukoliko se kao indikator kretanja vode kroz epikarstnu izdan posmatraju aerobne mezofilne bakterije, zapaža se da ukupan broj detektovanih bakterija na sve tri lokacije raste tokom vremena, odnosno mogu se uočiti tri talasa (Slike 8.12.-8.14). Pojavljivanje aerobnih mezofilnih

bakterija najbrojnije je na lokaciji SP3 u drugom talasu, a na lokacijama SP1 i SP2 tokom trećeg talasa.

Migracija bakteriološkog zagađenja kroz epikarst, koja je zabeležena u talasima tokom opita sa kontaminantom, kao i u slučaju migracije hemijskog dela kontaminanta, je najverovatnije posledica sifonskog oblika kaverni i adsorpcije/desorpcije bakterija na čestice zemljišta u epikarstu.

Ukoliko se funkcionisanje epikarsta u smislu zadržavanja i ispuštanja akumulirane vode prenesemo na širu oblast, istočnih padina Sive planine, može se uočiti da postoji uticaj ovog efekta na isticanja karstnih vrela Bežište i Mokra, dok je kod vrela Divljana i Gornja Koritnica manje uočljiv.

Uticaj epikarsta na isticanje vrela Bežište se može videti kroz sezonske promene kvaliteta podzemne vode (Slika 8.15.), koje se na ovom vrelu drenira, kao i u razlici određenih fizičko-hemijskih parametara zabeleženih na ovom vrelu u odnosu na vrela Mokra, Divljana i Gornja Koritnica (Poglavlje 7.5.4.). U vodi ovog vrela su zabeležene najviše koncentracije kalcijuma i bikarbonata. Količina rastvorenog kiseonika je u proseku najviša u vodi ovog vrela, međutim, i najveće varijacije ovog parametra su zabeležene na vrelu Bežište, dok je pH vrednost u proseku najniža. Srednja vrednost specifične električne provodljivosti je najviša u podzemnoj vodi sa vrela Bežište, u odnosu na vrednost u podzemnoj vodi sa druga tri osmatrana vrela.



Slika 8.15. Sezonske promene parametara podzemne vode karstnog vrela Bežište

Niska prosečna vrednost pH ukazuje na boravak podzemne vode u izdani koja nije u potpunosti izgrađena od krečnjaka. Između ostalog nije bilo dovoljno vremena za alkalizaciju infiltrirane kišnice u karstnoj izdani, jer postoji povremeni priliv vode iz epikarsta, koji je detektovan na površini koja predstavlja oblast prihranjivanja vrela Bežište. U podzemnoj vodi ovog vrela je zabeležena i najveća promenljivost specifične električne provodljivosti. Na dijagramu se može

uočiti i promenljivost koncentracije kiseonika, koja nije uvek prouzrokovana novim padavinama, nego se verovatno odnosi na priliv voda iz epikarstne izdani, koja je otvorena ka atmosferi (Slika 8.15.). Viša prosečna koncentracija kalcijuma izmerena na vrelu Bežište verovatno je usled pojačanog rastvaranja kalcita iz krečnjaka u otvorenoj epikarstnoj izdani iz koje voda prihranjuje karstnu izdan koja se drenira na vrelu u Bežištu. Povećanje koncentracije kalcijuma uz istovremeno smanjenje koncentracije magnezijuma i bikarbonata u uzorku podzemne vode od 9.5.2018. godine nastupilo je najverovatnije usled doticaja vode iz epikarsta, jer u periodu posle martovskih intenzivnih kiša nije bilo značajnih padavina. Povećanje vrednosti specifične električne provodljivosti i vrednosti pH potvrđuje ovu pretpostavku. Sa druge strane u uzorku iz avgusta, promene parametra su takve da ukazuju na isticanje vode koja potiče iz karstne izdani i da je epikarstni deo izdani u tom periodu u potpunosti ispražnjen, pa stoga nema uticaja na kvalitet vode na karstnom vrelu Bežište. Sadržaj stabilnih izotopa u podzemnoj vodi koja ističe na vrelu Bežište indikuje da podzemna voda provede u podzemlju najkraći period u odnosu na podzemnu vodu sa ostala tri vrela. Ukoliko uzmemo u obzir i sastav zemljišta iz uzoraka SPT3-SPT5 koji su prikupljeni u oblasti prihranjivanja vrela Bežište, možemo uočiti da su koncentracije određenih elemenata i mikroelemenata povišene. Koncentracija gvožđa u uzorcima zemljišta dostiže 54 mg/g, koncentracija kalijuma skoro 20 mg/g, a natrijuma 4 mg/g. Ove činjenice potvrđuju pretpostavku da povećanje specifične električne provodljivosti u podzemnoj vodi vrela Bežište potiče delom iz vode koja je boravila u epikarstu gde se obogatila mikroelementima.

Navedene promene parametara kod vrela Gornja Koritnica ne možemo da uočimo u tom intenzitetu. Promene u koncentraciji kalcijuma, magnezijuma i bikarbonata postoje, ali su manjeg obima, što se naročito ogleda u promeni koncentracije bikarbonata. Podzemna voda na ovom vrelu, većim delom potiče od infiltracije padavina na oblasti koja je izgrađena od titonskih krečnjaka, za koje je potvrđen visok sadržaj kalcita. Podzemne vode vrela Gornja Koritnica, prema rezultatima analize stabilnih izotopa, provode duži period u podzemlju od vode koja se drenira na vrelu Bežište, pa više vremena ostaje da se obavi izmena kvaliteta podzemne vode u skladu sa krečnjačkim stenama kroz koje se voda filtrira.

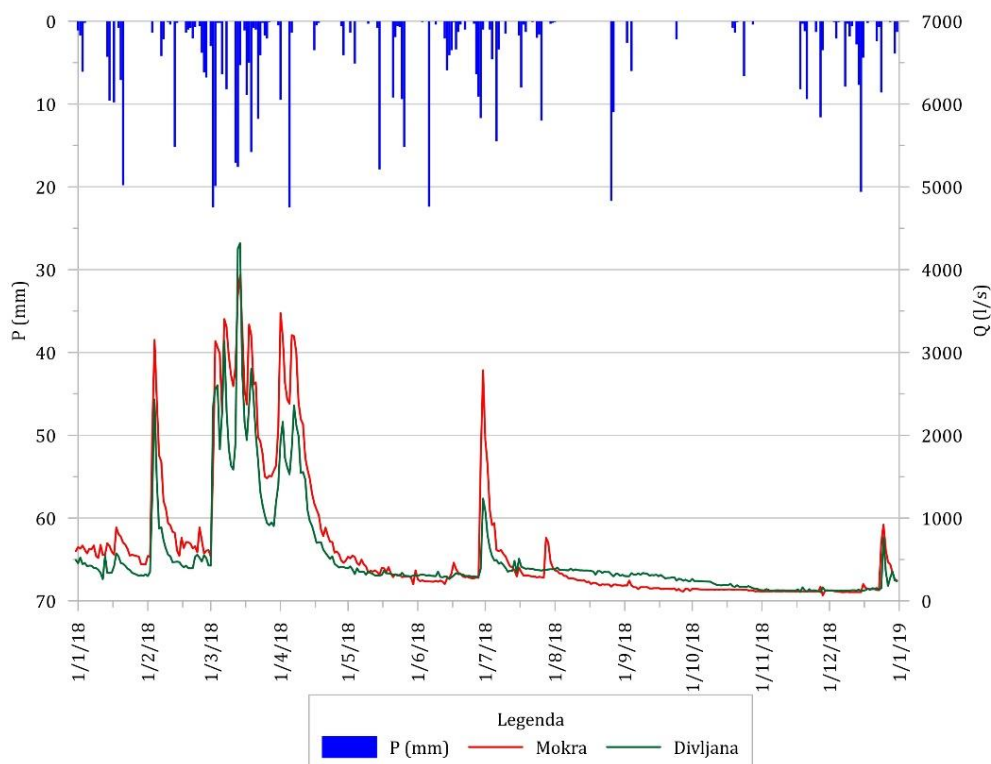
Funkcionisanje epikarsta u smislu zadržavanja i postepenog ispuštanja dela vode akumulirane u epikarstnoj izdani, može se uočiti kod karstnog vrela Mokra, dok je uticaj na izdašnost vrela Divljana manji. U pogledu uticaja epikarsta na izmene kvaliteta podzemne vode, s obzirom na veću površinu oblasti prihranjivanja ova dva vrela u odnosu na vrelu Bežište i Gornja Koritnica, i značajno veće količine vode koje na vrelima ističu, ne mogu se izvući pouzdane relacije.

Autokorelaciona analiza je pokazala da vrelu Mokra ima neznatno dužu „memoriju sistema“ u pogledu izdašnosti od vrela Divljana, što potvrđuje premisu o dužem zadržavanju podzemne vode u okviru dela izdani koji se drenira na vrelu Mokra (Slika 8.8.). Osim verovatno bolje povezanosti karstnih kanala i zaleganja kaverni i kanala na malo većim dubinama, može se reći da postoji i manji uticaj epikarsta. Kroskorelacioni dijagrami padavina i izdašnosti ova dva vrela, osim što ukazuju na postojanje malih razlika u količinama vode koje se javljaju na vrelima nakon obilnih kiša, takođe, pokazuju da postoji određena zadržka u isticanju podzemnih voda na vrelu Mokra. Utvrđena razlika od 5 dana, može se pripisati dubljim zaleganjem karstnih kanala i dužom mrežom kanala koja snabdeva vrelu Mokra podzemnom vodom i pretpostavkom da ova dva vrela dreniraju jednu zajedničku izdan, pa imaju i zajednički bilans podzemnih voda. Ali ukoliko uzmemo u razmatranje da su ukupne količine podzemne vode koje se pojavljuju na vrelu Mokra veće, iako je ekstremna maksimalna izdašnost zabeležena na vrelu Divljana, možemo pretpostaviti da je površina zone prihranjivanja vrela Mokra malo veća. Stoga je i površina terena na kojoj je prisutan epikarst veća (Slika 7.37.), pa je i njegov uticaj na režim karstne izdani koja se drenira na ovom vrelu veći.

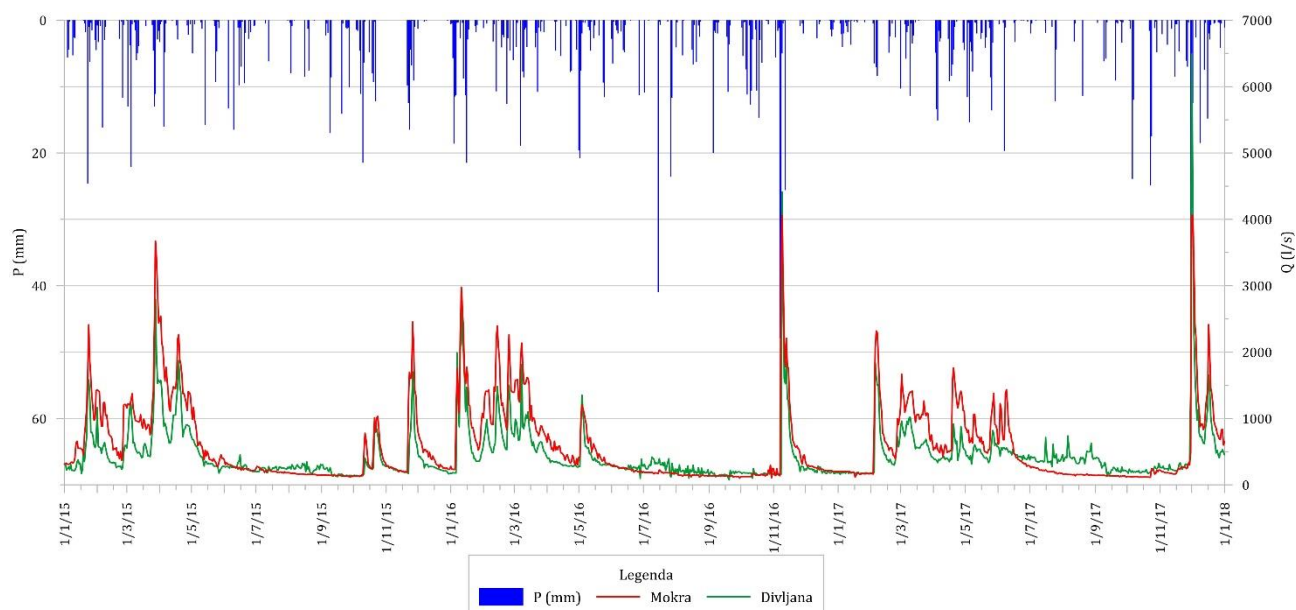
Uticao epikarsta je manji u periodu proleća, kada se na zonu prihranjivanja izlučuju velike količine padavina i kada se otapa sneg. Argumente za ovu tvrdnju možemo naći u merenjima količina prokapskih voda, koje je obavljeno tokom obavljanja terenskih opita u pećini Peč. Tokom opita sa kontaminantom je infiltriranje kišnice (i otopljenog snega) bilo značajno, pa je količina vode koja se filtrirala kroz epikarst bila velika. Zabeleženo je povećanje količine prokapske vode za oko 60% u roku od 2 dana intenzivnih padavina (sa 20 na 32 l/h), nakon završetka otapanja snega, a povećavanje količina se nastavilo jer su bile izlučene nove količine padavina. Uočeno je da postoji zadržavanje dela infiltrirane vode, jer povećanje količine prokapske vode nije bilo momentalno. Svako povećanje količine vode koja se filtrirala kroz epikarst i završavala u unutrašnjosti pećine je usledilo oko 18 sati nakon izlučivanja padavina, dok je u odnosu na otapanje snega kašnjenje bilo do 36 sati. Međutim, nakon prestanka padavina, količine prokapske vode nisu naglo opale, već se videlo postepeno smanjenje koje je trajalo tokom dva dana. Na kraju je ukupna količina prokapske vode (15-30 l/h), bila malo veća nego na početku opita. Sa druge strane tokom opita sa fluorescentnim traserom, nije bilo padavina u vidu kiše, a otapanje tanjeg snežnog pokrivača je bilo manjeg intenziteta, samim tim su i količine vode koja se filtrirale bile manje. U maksimumu je kroz pećinu prolazilo 25 l/h. Međutim, tokom opita trasiranja količina vode nije opala naglo nego je opadanje bilo postepeno, pa se nameće zaključak da voda koja se filtrirala kroz povlatu i kapala sa tavanice pećine nije poticala samo od otapanja snega, već i iz dodatnih rezervi. Zaključak koji se nameće je da epikarst ima veći uticaj na filtraciju vode prilikom priliva manjih količina infiltrirane vode nego prilikom većeg priliva sa površine, jer usled malog kapaciteta izdani koja se formira u ovom sloju može doći do zadržavanja te manje količine vode i kasnijeg otpuštanja. Dok u slučaju nailaska velike količine infiltrirane kišnice epikarst zadrži manji deo vode, a ostatak biva sproveden do saturisanog dela karstne izdani.

U skladu sa time vidimo da se skoro istovremeno nakon izlučivanja dugotrajnih i obilnijih padavina, na vrelima Mokra i Divljana javlja povećanje izdašnosti, a da su povećanja istovremena (Slika 8.16.). Međutim, zabeleženo je kašnjenje povećanja izdašnosti u odnosu na padavinsku epizodu do 24h. Ukupne količine vode koje ističu na vrelu Mokra su veće, usled veće oblasti prihranjivanja. Sredinom jula količine padavina opadnu, pa se menja odnos između izdašnosti vrela Mokra i Divljana. Tada su na vrelu Divljana uglavnom veće količine vode, i svaka naredna kišna epizoda se odmah odražava na izdašnost vrela, što kada je u pitanju izdašnost vrela Mokra nije slučaj. Možemo da vidimo da je na vrelu Mokra u suštini nastupio period recesije, koji traje dosta dugo (28.7. – 26.11.2018. godine), i da za to vreme kišne epizode ne izazivaju povećanje izdašnosti, kao kod vrela Divljana, već popunjavaju ispražnjeni „rezervoar“ karstne izdani. Možemo da pretpostavimo da većina kišnice vrši popunjavanje ispražnjenih rezervi, ali onda bi se isti slučaj desio i na vrelu Divljana. Međutim, na vrelu Divljana vidimo promene u izdašnosti koje se dešavaju nakon svake kiše tokom jula i avgusta 2018. godine, jer je veličina izdani (rezervoara) koja se na vrelu Divljana drenira manja, pa se padavine odmah reflektuju na izdašnost. Ukoliko u analizu uključimo i podatke iz prethodnih godina (2015-2017. godina), još je приметnija pojava da izdašnost vrela Divljana direktno zavisi od količine padavina na slivu u toku letnjih meseci (Slika 8.17.).

Povećanja izdašnosti vrela Mokra su „prigušena“, ne samo usled toga što kanali i kaverne verovatno dublje zaležu i što su možda većih dimenzija, pa je potrebno više vode dok se izdan popuni infiltriranim vodom, već deo vode bude zadržan u okviru epikarsta, a zatim se postepeno i polako otpušta iz epikarstne izdani. U suštini ne postoji naknadni pik izdašnosti vrela Mokra i Divljana koji je izazvan drenažom vode iz epikarsta nakon obilnije padavinske epizode, već se dešava lagano otpuštanje vode iz epikarsta koje se ne može jasno uočiti na hidrogramu ovih vrela.



Slika 8.16. Uporedni dijagram dnevnih vrednosti izdašnosti karstnih vrela Mokra i Divljana sa histogramom padavina, 2018. godina (JKP „Naissus“ i www.meteomanz.com)

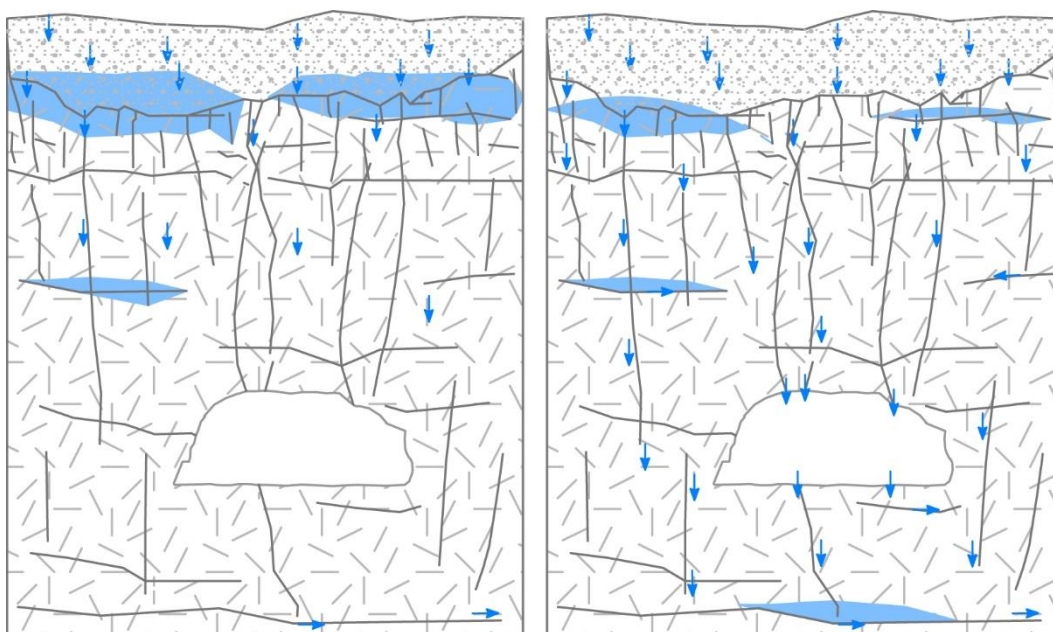


Slika 8.17. Uporedni dijagram dnevnih vrednosti izdašnosti karstnih vrela Mokra i Divljana sa histogramom padavina, 2015-2017. godina (JKP „Naissus“ i www.meteomanz.com)

Bilans podzemnih voda karstne izdani koja se drenira na vrelima Mokra, Divljana, Gornja Koritnica i Bežište je pod delimičnim pozitivnim uticajem epikarsta, jer uticaj koji se odražava na režim karstne izdani, takođe, ima efekta i na bilans podzemnih voda. Epikarst zadržavanjem određenih količina vode izravnava protok infiltrirane vode i donekle ujednačava izdašnost vrela, međutim, u slučajevima velikih priliva dolazi do brzog zasićenja ove izdani, koja je malog kapaciteta, pa voda nastavlja filtraciju ka karstnoj izdani bez zadržavanja. Kada količina infiltrirane vode sa površine, u vidu otopljenog snega ili kišnice, opadne dolazi do povećanja uticaja koji epikarstna izdan ima na količinu podzemne vode u karstnoj izdani. Tada epikarst vrši prihranjivanje karstne izdani postepeno otpuštajući zadržanu vodu i time utiče na

povećanje izdašnosti. Da bi uticaj epikarsta na bilans i režim bio značajniji potrebno je i da stepen razvića epikarsta (debljina sloja) i njegova prostorna zastupljenost bude veća, tako da je veći uticaj koji epikarst ima na izdašnost vrela Bežište i Mokra jer je na površinama koje predstavljaju zonu prihranjivanja ova dva vrela prisutniji i razvijeniji, nego u okviru zone prihranjivanja vrela Divljana i Gornja Koritnica (Slika 7.37).

Uloga i funkcija epikarsta u ovom delu karstnog sistema Suve planine je dvostruka. Prvenstveno učestvuje u filtriranju i akumuliranju infiltriranih padavina u zapreminski malim epikarstnim izdanima (Slika 8.18.), a zatim ispuštanju akumulirane vode kada se postigne zasićenje svih pora i kanala u okviru epikarsta. Akumulacija vode u epikarstu može opstati duži vremenski period, uz postepeno dreniranje u donje slojeve, pore, kaverne i kanale. Na taj način se vrši sekundarno prihranjivanje karstne izdani vodom koja je poreklom iz iste kišne epizode, a koja je kroz karstni izdanski sistem prošla i nekoliko dana pre nego voda koja je akumulirana u epikarstu.

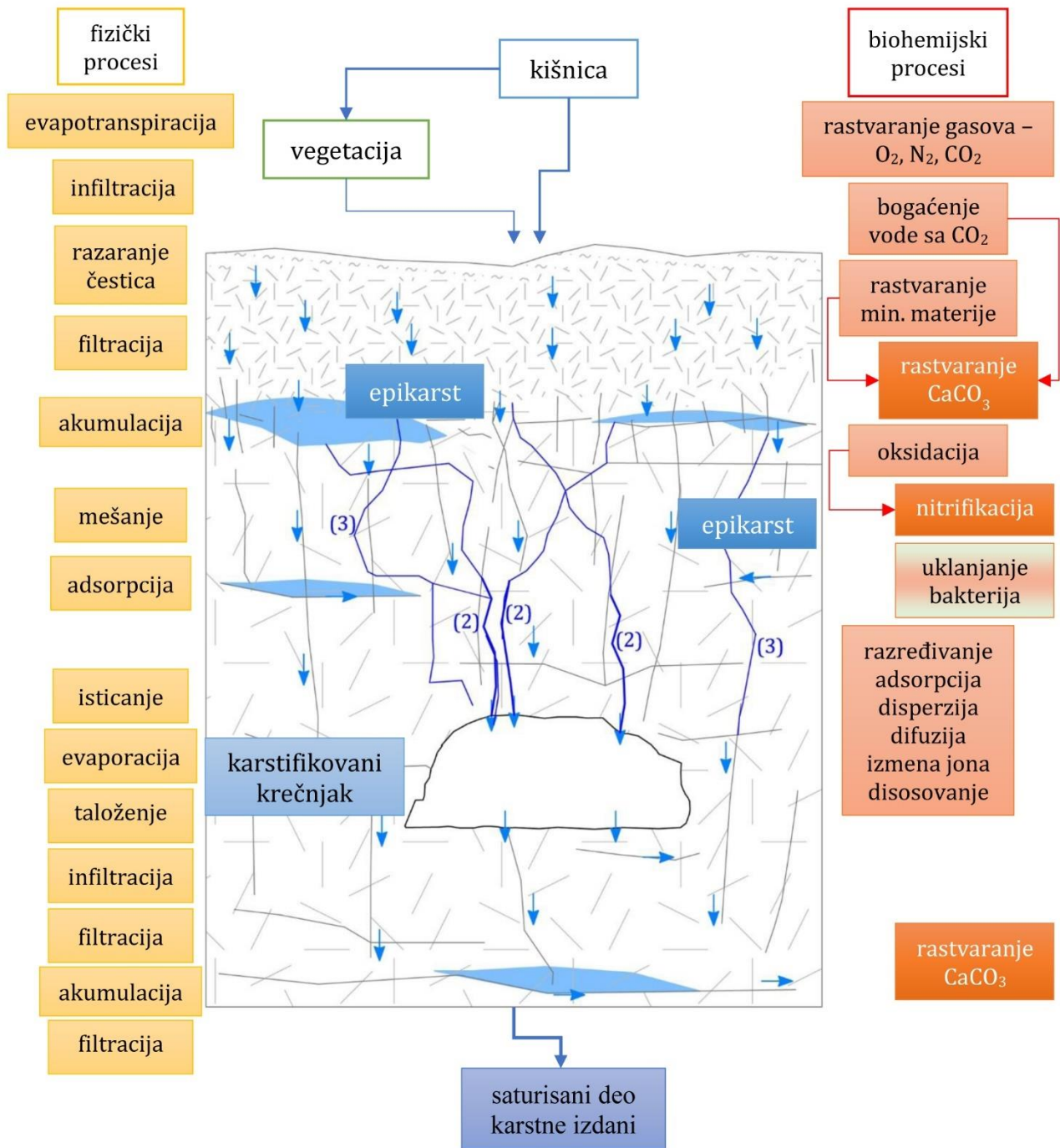


Slika 8.18. Zadržavanje padavina u epikarstnoj izdani (levo) i kasnije ispuštanje (desno), lokacija Peč

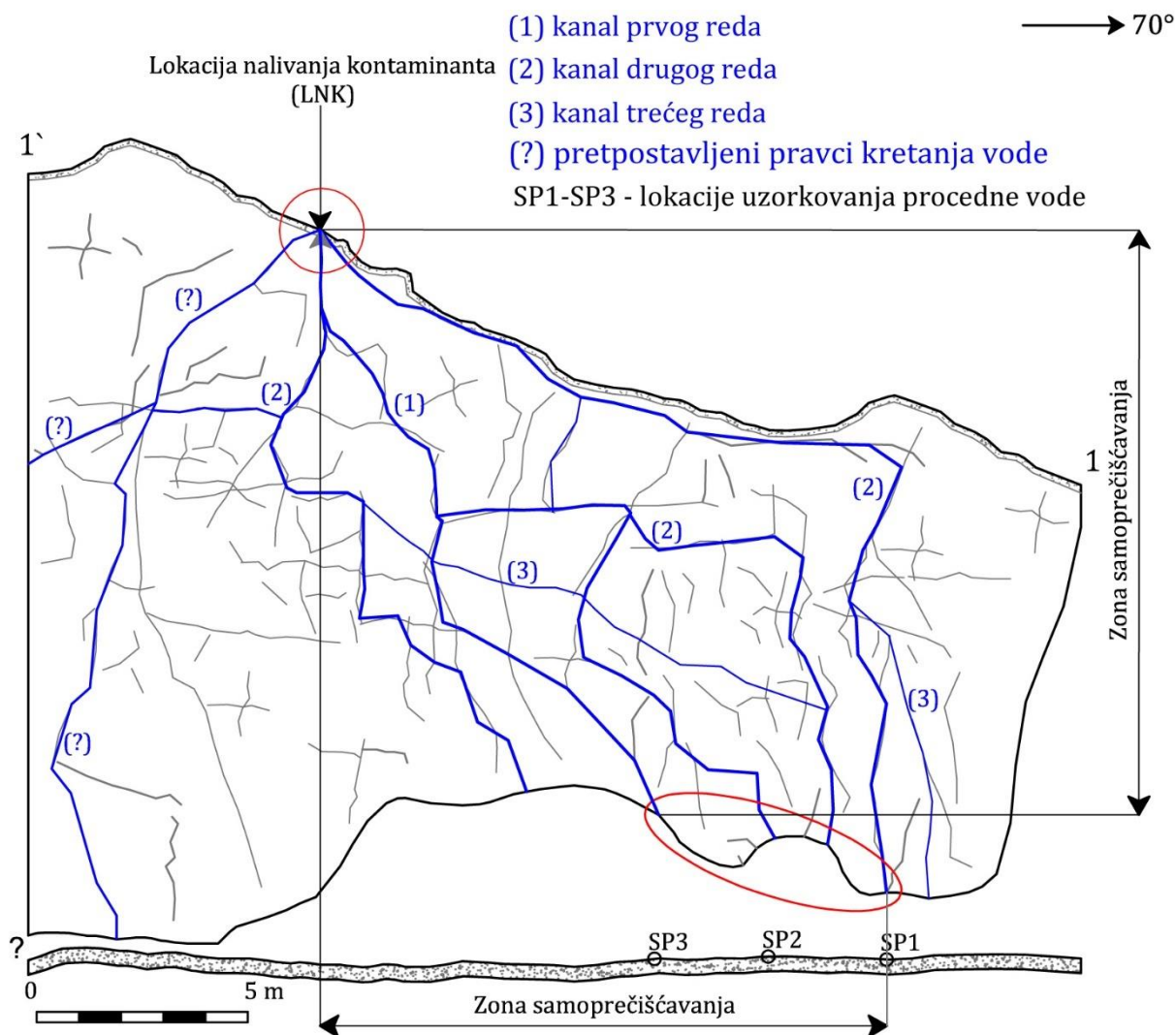
8.4. Samoprečišćavajući potencijal dela karstnog sistema Suve planine

Rezultati koji su prikupljeni tokom opita sa kontaminantom na lokaciji pećine Peč, pokazuju da epikarst ima ulogu i funkciju u (samo)prečišćavanju podzemne vode (Slika 8.19.). Proces prečišćavanja infiltrirane vode direktno zavise od debljine sloja epikarsta, ali i vegetacije prisutne na površini terena, kao i od živog sveta u ovom potpovršinskom sloju.

Proces prečišćavanja vode se odigrava u oblasti koja se prostire između mesta infiltracije padavina (površinske vode) do mesta isticanja – u ovom slučaju do mesta kapanja vode sa tavanice pećine, kao što to pokazuju rezultati eksperimenta sa kontaminantom (Slika 8.20.).



Slika 8.19. Model procesa samoprečišćavanja podzemne vode u epikarstu, lokacija pećina Peč; (2) sekundarna mreža kanala, (3) tercijarna mreža kanala



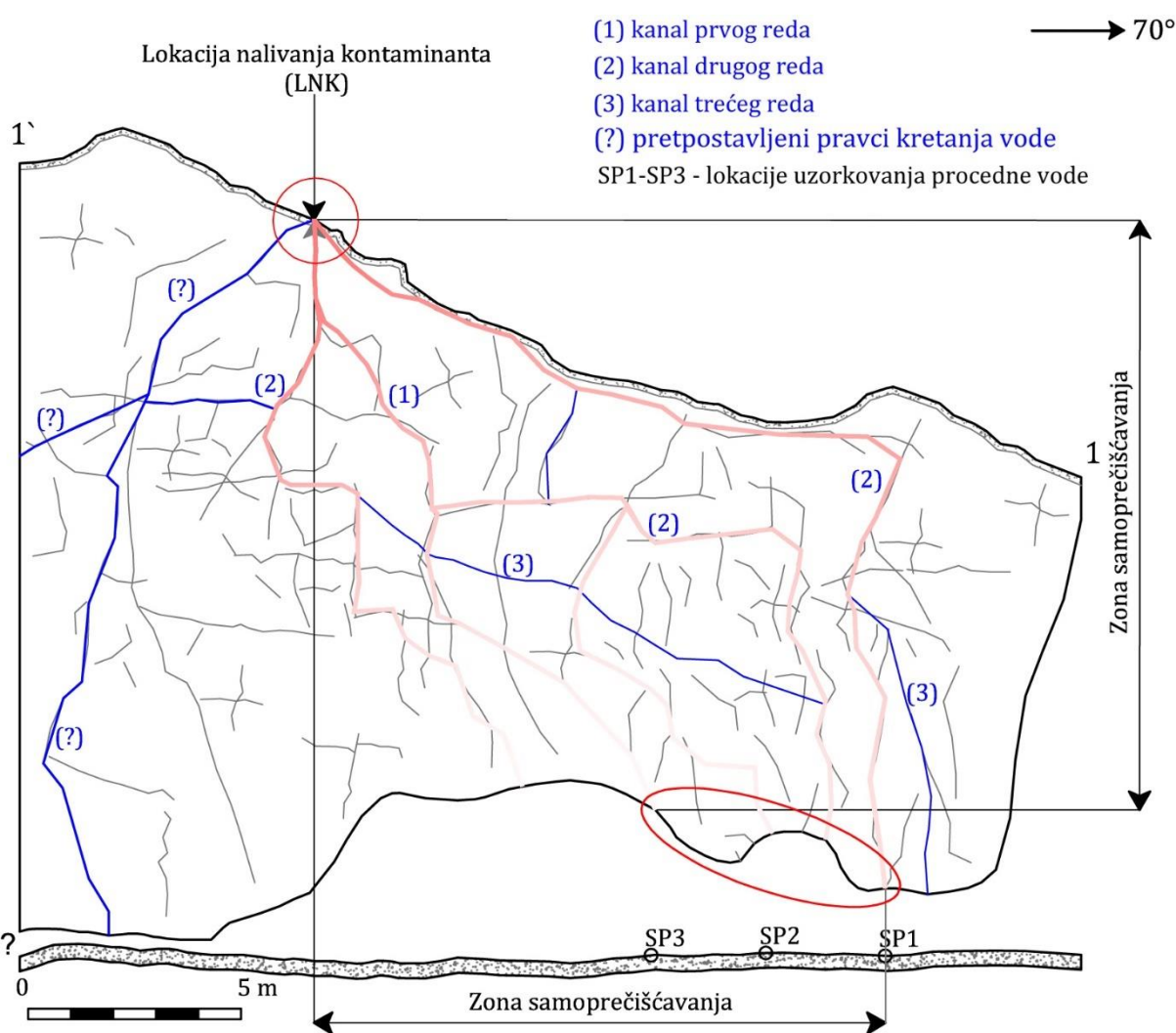
Slika 8.20. Zona samoprečišćavanja u okviru epikarsta, lokacija pećina Peč; crveni krug: infiltracija kontaminanta, crvena elipsa: zona isticanja prokapsne vode

Sprovedeni eksperiment na lokaciji pećine Peč (Poglavlje 7.7.1.2.) potvrdio je da fizičko-hemijski procesi koji se odvijaju u sloju zemljišta i epikarsta uz pridruženo delovanje prisutnih mikroorganizama mogu da određene supstance organskog porekla razgrade, da ih prevedu u hemijska jedinjenja koja nisu štetna po čoveka ili da koncentracije kontaminanta svedu na dozvoljenu meru (npr. MDK vode za piće).

Samoprečišćavajuće osobine epikarsta u odnosu na azotna jedinjenja i anjone: NH_3 , NO_2^- i NO_3^- su značajne. Amonijak koji je bio prisutan u kontaminantu, u uzorcima SPK = 1,5 mg/l i SP D = 1,75 mg/l, u uzorcima procedne vode iz pećine nije ni jednom pronađen u koncentraciji većoj od 0,05 mg/l (granica detekcije primenjene metode). Najverovatnije je amonijak već pri nalivanju na površinu terena (zemljište) usled izlaganja dejstvu kiseonika brzo oksidirao i prošao kroz proces nitrifikacije (smanjenje intenziteta crvene boje duž kanala na Slici 8.21.). Nitriti koji su dokazani u podzemnoj vodi iz bunara upotrebljenoj kao deo kontaminanta, nisu detektovani ni u rastvoru stajskog đubriva (uzorak SP K), niti u bilo kojem od 27 analiziranih uzoraka procedne vode (koncentracija ni jednom nije prevazišla granicu detekcije primenjene metode od 0,005 mg/l). Nameće se sličan zaključak o odsustvu nitrita iz procedne vode, kao što je to slučaj sa amonijakom. Prilikom pripreme kontaminanta usled mešanja podzemne vode iz bunara i stajskog đubriva, došlo je do izlaganja nitrita vazduhu nitriti su oksidirali i prešli u nitrate, pa stoga nisu detektovani u uzorku SP K. Međutim, iako su nitriti detektovani u uzorku podzemne vode (SP D), koja je iskorišćena za ispiranje čvrstog dela kontaminanta nisu

detektovani u uzorcima procedne vode. Nitriti su najverovatnije oksidirali u porama zemljišta i epikarsta u kojem je ostalo vazduha (kiseonika). Verovatno bi bilo potrebno da ekscesno zagađenje kontaminantom, koji sadrži amonijak i/ili nitrite, bude mnogo većih razmera u postojećim hidrogeološkim uslovima da dođe do amonijačnog i nitritnog zagađenja podzemnih voda.

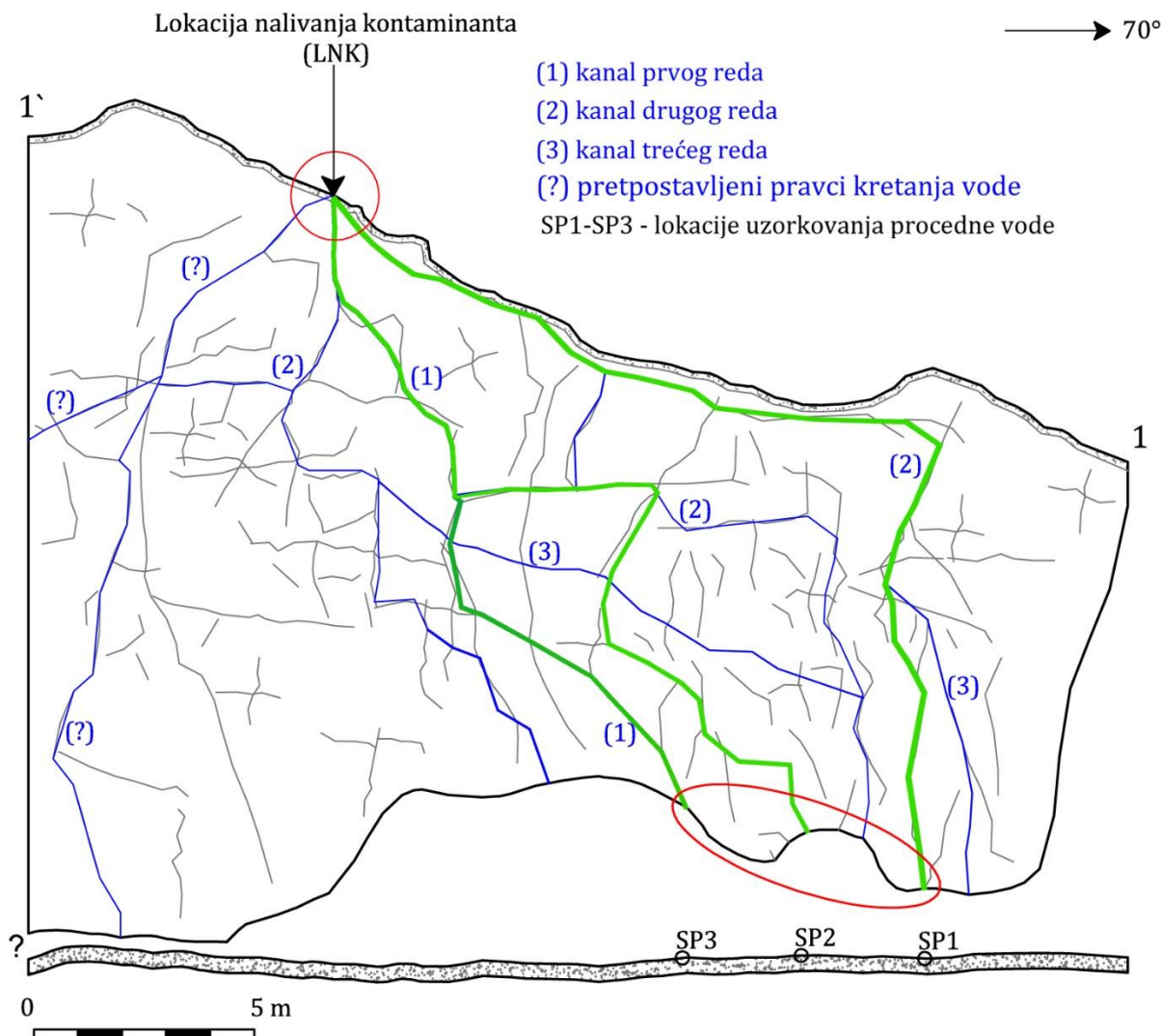
Nitrati su u kontaminantu detektovani, u koncentraciji od 5 mg/l (SP D), ali nisu detektovani u 9 od 28 uzoraka procedne vode (osetljivost metode je 0,17 mg/l), u ostalim uzorcima vrednost koncentracije nitrata je bila od 0,2 do 1,7 mg/l. Koncentracija nitrata se povećavala u procednoj vodi u talasima (Poglavlje 7.7.1.2.). Ovakve promene sadržaja supstance u uzorcima i „pulsno“ pojavljivanje povećanih koncentracija nitrata se prvo desilo usled ubrzanog otapanja snega na opitnom poligonu, a zatim zbog početka intenzivne kišne epizode, tako da je najviša vrednost od 1,7 mg/l dostignuta pred sam kraj monitoringa. Nesumnjivo je da je mala količina nitrata nastavila filtraciju zajedno sa podzemnom vodom ka dubljim delovima karstne izdani.



Slika 8.21. Samoprečišćavanje u okviru epikarsta, migracija azotnih jedinjenja (koncentracija opada); crveni krug: infiltracija kontaminanta, crvena elipsa: isticanje prokapne vode

Ukupne koliformne bakterije, čiji je broj na početku, tj. u sastavu kontaminanta i podzemne vode, koja je korišćena prilikom pripreme kontaminanta, izuzetno visok: SP K > 161 cfu i SP D = 161 cfu, u najvećem broju uzoraka procedne vode nisu detektovane: na lokaciji SP1 u 12 od 28 uzoraka, na lokaciji SP2 i na lokaciji SP3 u 18 od 28 uzoraka. Na lokacijama SP1 i SP3 zabeležen je po jedan uzorak sa veoma visokim brojem koliformnih bakterija od 161 cfu,

međutim, u potpuno drugačijim vremenskim presecima (Slika 8.22. i 8.23.). Najveći zabeležen broj koliformnih bakterija na lokaciji SP2 je bio samo 6 cfu. Visok broj koliformnih bakterija na lokaciji SP3 može se objasniti kao posledica pojačane infiltracije vode nakon intenzivnih kišnih padavina. Nakon tog veoma izraženog maksimuma (Slika 8.22.), na lokaciji SP3 detektovane su koliformne bakterije u samo još 4 uzorka.



Slika 8.22. Samoprečišćavanje u okviru epikarsta; zelene linije: migracija mikrobiološkog dela kontaminanta (koliformne bakterije, fekalne bakterije i aerobne mezofilne bakterije)

Maksimalan broj od 161 cfu je zabeležen i na lokaciji SP1, koja je najdalje od LNK, ali tek nakon dugotrajnih padavina i dodatnog otapanja snežnih padavina (Slika 8.22.). U tom trenutku su skoro sve pukotine i kaverne ispunjene vodom i infiltrirana kišnica može da izvrši pritisak na akumuliranu vodu u epikarstnoj izdani i da potisne kontaminant. Najveći broj bakterija zabeležen je 12. marta (pretposlednji dan monitoringa). U međuvremenu se na toj lokaciji beleže koncentracije bakterija od 1 do 8 cfu, bez neke uočljive pravilnosti pojavljivanja. Međutim, nakon tog „proboja“ od 161 cfu, ni u jednom sledećem uzorku do kraja monitoringa koliformne bakterije nisu detektovane.

Kada su u pitanju koliformne bakterije fekalnog porekla, takođe su detektovane visoke koncentracije u uzorcima kontaminanta: SP K>161 cfu i SP D=161 cfu. Međutim, ovog puta na lokaciji SP3 nije detektovano prisustvo ovog tipa bakterija ni u jednom uzorku, a na lokaciji SP1 samo u uzorku u kojem je zabeležen i najveći broj ukupnih koliformnih bakterija, znači tek nakon infiltracije značajnih količina vode sa površine. Sa druge strane, na lokaciji SP2 je

detektovano prisustvo koliformnih bakterija fekalnog porekla u 2 uzorka. Najveći broj koliformnih bakterija fekalnog porekla (3 cfu) detektovan je u uzorku od 10. marta u 6 h. Može se izvesti zaključak da je prečišćavanje ove vrste bakterija jako uspešno, s obzirom na smanjenje broja bakterija sa preko 161 cfu, na samo 3 cfu, i detektovanje na samo jednoj lokaciji.

Streptokoke fekalnog porekla, iako registrovane u uzorcima SP K i SP D (ima ih i u uzorku iz vrela Bežište), nisu registrovane u prokapnoj vodi nakon nalivanja kontaminanta.

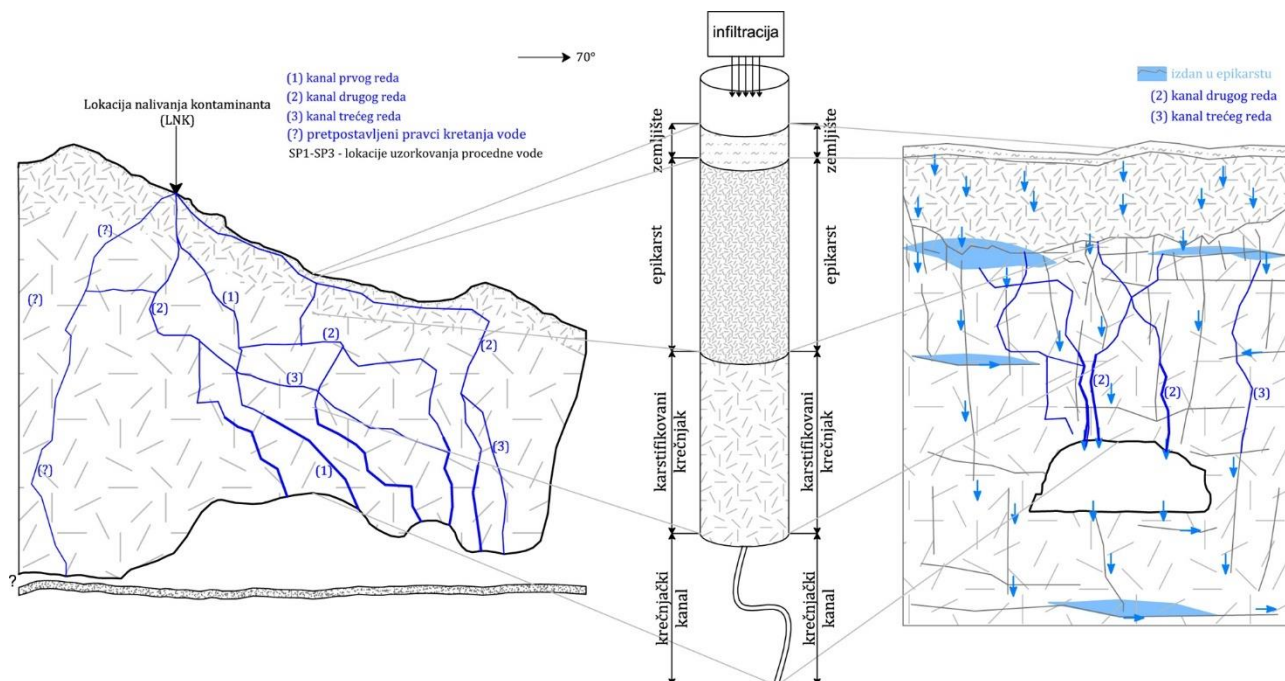
Aerobne bakterije su prisutne u podzemnoj vodi iz bunara (SP D – 300 cfu), a detektovane su u velikom broju u uzorku sa lokacije SP1 pre nalivanja. Međutim, nakon nalivanja kontaminanta prvi put se pojavljuju u uzorku sa lokacije SP3 u istom uzorku kada su registrovane koliformne bakterije (Slika 8.22.). Nakon tog vremenskog preseka, pojavljuju se 10. marta na lokaciji SP2 (5 cfu), a onda opet na lokaciji SP3 (40 cfu). U periodu nakon kiša najvećeg intenziteta i otapanja snega (11/12. mart), zabeležena je pojava aerobnih bakterija na svim lokacijama u koncentraciji od 2 do 40 cfu, a talas pojavljivanja najduže je trajao na lokaciji SP3, gde su detektovane u četiri uzastopna uzorka. Aerobne bakterije su u odnosu na broj u kontaminantu, u uzorcima procedne vode umanjene više od 75%.

U uzorcima procedne vode nisu pronađene sulfitoredukujuće klostridije iako su u uzorku SP D detektovane = 15 cfu. Možemo reći da je uklanjanje ove vrste bakterija iz vode bilo potpuno.

Stajsko đubrivo je odabrano kao kontaminant koji je svakako prisutan na padinama Suve planine, usled toga što se lokalno stanovništvo aktivno bavi stočarstvom. Iako je poslednjih godina broj grla stoke koja se napasa na livadama i pašnjacima Suve planine dosta opao, i dalje je brojka od skoro 1000 grla krupne stoke (krave i konji) i nekoliko stotina grla sitne stoke (uglavnom ovce) značajna. Potencijalno hemijsko zagađenje azotnim jedinjenjima organskog porekla (amonijak i nitriti) nije registrovano u uzorcima vode tokom monitoringa, što ukazuje na odvijanje procesa nitrifikacije (u obe faze), a sa druge strane ni krajnji proizvod procesa nitrifikacije – nitrati nisu registrovani u koncentracijama koje se mogu smatrati značajnim. Što se tiče mikrobiološkog zagađenja koje može da potekne iz ove vrste kontaminanta, prisutno je, ali u jako malim koncentracijama. Videli smo da je broj ukupnih koliformnih bakterija i nakon prolaska vode kroz epikarst bio visok u uzorcima prokapne vode, dok je broj ostalih bakterija čiji je broj praćen opao. Koliformne bakterije fekalnog porekla su smanjene sa više od 161 cfu na maksimalno 3 cfu, koliko ih je detektovano na lokaciji SP2. U odnosu na broj u kontaminantu koliformne bakterije nisu pretrpele velike promene, jer je u uzorcima i sa lokacije SP1 i SP3 detektovano 161 cfu, ali ako uzmemo u obzir da ih je u uzorku SP K bilo više od tog broja, možemo reći da je došlo do smanjenja broja. Kao što je već rečeno broj aerobnih mezofilnih bakterija je opao 7,5 puta, iako su detektovane na svakoj od lokacija.

Uspešnost samoprečišćavajućih procesa koji se odvijaju u epikarstu i karstnoj izdani na istočnim padinama Suve planine je po svemu na visokom nivou, Rezultati eksperimenta sa kontaminantom pružaju dovoljno argumenata za ovu tvrdnju. Broj određenih bakterija je višestruko smanjen, neke od njih su u potpunosti nestale, dok određeni rodovi bakterija već postoje u epikarstu, kao i u zemljištu sa kojim je epikarst u neposrednoj vezi. Razlog postojanju bakterija fekalnog porekla u slojevima zemljišta i/ili epikarsta i pre nalivanja kontaminanta mogu biti produkti metabolizma životinja, zatim produkti raspadanja organske materije i na kraju antropogeni uticaj. Sa druge strane aerobne mezofilne bakterije predstavljaju deo živog sveta koji nastanjuje zemljište, tako da njihovo pojavljivanje u vodi nije neočekivano.

Prilikom eksperimenta u modelu epikarsta u laboratorijskim uslovima (Slika 8.23.) iskorišćen je kontaminant hemijskog porekla, veštačko azotno đubrivo „AN“. Koncentracija nitrata u kontaminantu je bila 1160 mg/l, a specifična električna provodljivost je bila 3070 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Tokom opita su praćene koncentracija nitrata i vrednosti specifične električne provodljivosti, na svaka dva sata, dok se model epikarsta nije u potpunosti ispraznio.



Slika 8.23. Model epikarsta i prirodni uslovi na lokaciji pećine Peč

Dijagram promene vrednosti specifične električne provodljivosti (Slika 7.127.) je pokazao da sistemi (CEV 1 i CEV 2) različitog sastava različito reaguju na unos visoko „mineralizovanog“ kontaminanta. Međutim, u obe cevi je specifična provodljivost već u prvom uzorku koji je uzet nakon nalivanja kontaminanta imala uvećanu vrednost. Početna vrednost specifične električne provodljivosti u CEVI 1 je bila 423 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a u CEVI 2 $E_c=426 \mu\text{S}/\text{cm}$. U CEVI 1, je tokom merenja pre unosa kontaminanta primećen porast vrednosti specifične električne provodljivosti od 10%. Porast merenih vrednosti se može pripisati ispiranju i rastvaranju mineralne materije iz zemljišta u CEVI 1, jer su vrednosti u odnosu na vrednosti u CEVI 2 više za 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nakon uvođenja kontaminanta dolazi do značajnog povećanja provodljivosti, vrednost je u CEVI 1 povećana za oko 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a u CEVI 2 za oko 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

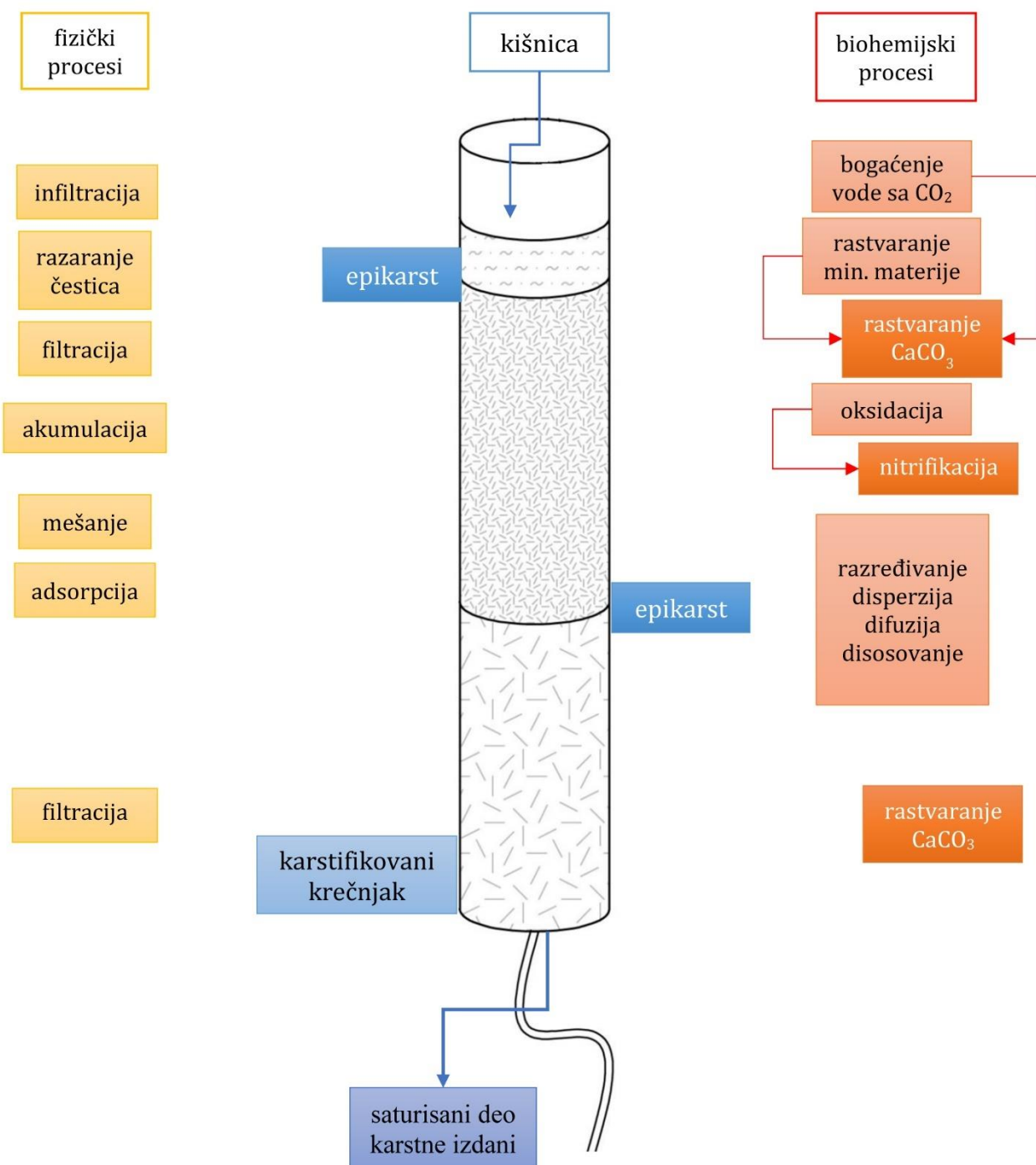
Prilikom mešanja dva rastvora (kontaminirane vode i vode u modelu) ravnoteža se brzo uspostavlja (Poglavlje 7.7.2.). Ravnotežna vrednost E_c u CEVI 1 je 790 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dok je vrednost u CEVI 2 oko 40% niža. Vrednosti specifične električne provodljivosti u dve cevi se u proseku razlikuju za 30%. Razlika u povećanju specifične električne provodljivosti u cevima 1 i 2 je nastala pre svega zbog manje količine „podzemne vode“ koja se pre uvođenja kontaminanta nalazila u CEVI 1. Proces mešanja dva rastvora se odigrava brzo, a uspostavljena ravnoteža u pogledu vrednosti specifične električne provodljivosti se ne menja, dok se ne promene uslovi, tj. ne uvede novi rastvor u sredinu.

U pogledu koncentracije nitrata, koja je u kontaminantu visoka (1160 mg/l), i u CEVI 1 i u CEVI 2 je zabeležen značajan porast koncentracija (Slika 7.128.), nakon nalivanja kontaminanta. Koncentracija nitrata u CEVI 1 je u proseku viša 2,5 puta u skoro svim uzorcima, od one u CEVI 2. Razlog ovakvoj razlici u koncentraciji nitrata u CEVI 1 i u CEVI 2, je isti kao i u slučaju promene

specifične električne provodljivosti. U CEVI 1 je prisutna 33% manja količina vode u epikarstu, pa je na raspolaganju za smanjenje koncentracije kontaminanta mnogo manje „čiste“ vode.

Teoretski koncentracija nitrata u modelu, u kojem se vrši mešanje kontaminanta i „čiste“ vode je postignuta (Filipović & Lipanović, 1995; Brown et al, 2018), dok mala odstupanja u iznosu od 30-40 mg/l potiču od prisutne adsorpcije nitrata na krečnjačke stene, ali i mobilisanja nitrata, koji su konstituenti zemljišta iskorišćenog pri kreiranju fizičkog modela epikarsta u CEVI 1.

Zaključak sprovedenog opita je da se i u modelu epikarsta obavlja delimično prečišćavanje kontaminanta, koje je u ovom slučaju zavisilo od količine vode u modelu i od sastava modela (Slika 8.24.). Smanjenje koncentracije nitrata je za 30% u CEVI 1, dok je u CEVI 2 smanjenje bilo veće od 50%.



Slika 8.24. Model procesa samoprečišćavanja vode u fizičkom modelu epikarsta

Uzevši u obzir rezultate eksperimenata sa kontaminantom organskog porekla – stajsko đubrivo i eksperimenta u laboratorijskim uslovima u fizičkom modelu epikarsta, zaključuje se da je sposobnost prečišćavanja koju poseduje epikarst značajna u odnosu na ovu vrstu zagađujućih supstanci. S obzirom na postojanje živog sveta u ovom potpovršinskom sloju (u prirodnim uslovima), došlo je od biohemijskog delovanja i delimične ili potpune razgradnje kontaminanta, ili barem umanjivanja njegove štetnosti po krajnje korisnike podzemne vode. Sa druge strane adsorpcija i biohemijski procesi su odigrali ulogu u delimičnom prečišćavanju vode u modelu epikarsta. Stoga se može zaključiti da epikarst povećava ukupni samoprečišćavajući potencijal karstne izdani i generalno utiče na poboljšanje kvaliteta podzemne vode. Ukoliko posmatramo samo vrela Mokra i Divljana, koja su najvećih izdašnosti u podnožju istočnih padina Suve planine, a oba su kaptirana za vodosnabdevanje Niša, moramo da naglasimo da podzemne vode imaju veoma dobar kvalitet u pogledu hemijskog i mikrobiološkog kvaliteta.

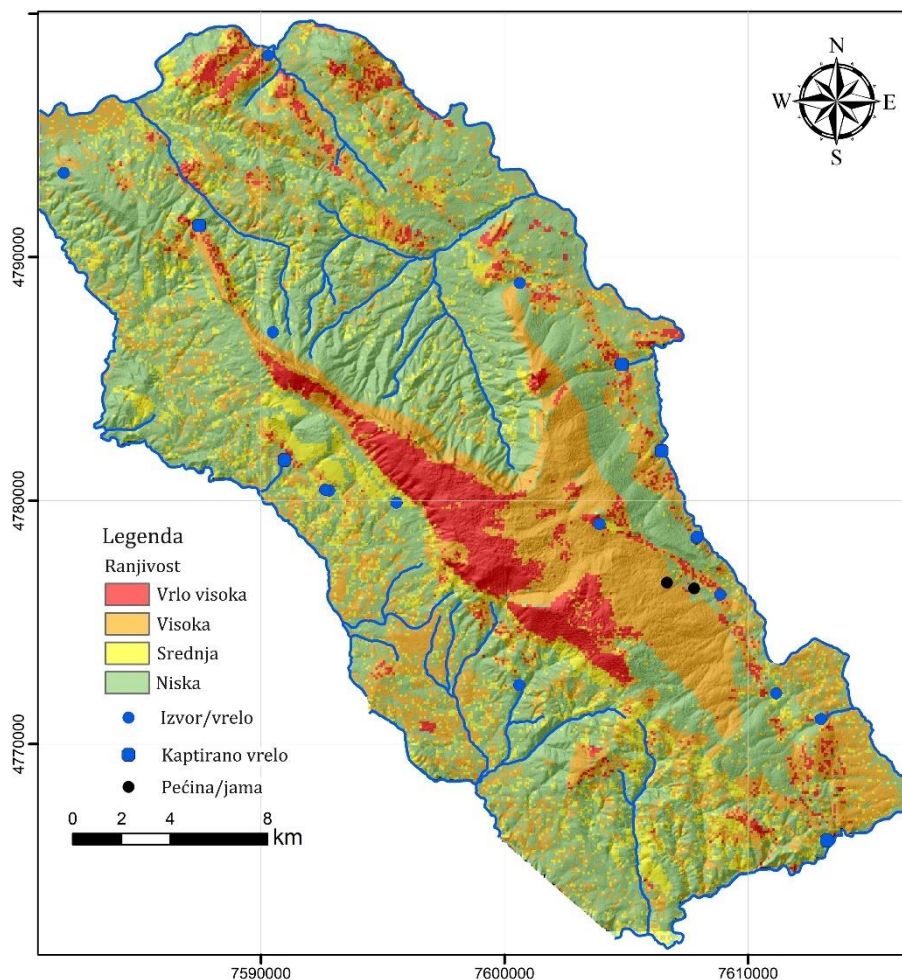
Epikarst u procesu akumuliranja podzemne vode i njenom „privremenom“ zadržavanju ima ulogu u izmeni kvaliteta vode koja nastavlja svoj put ka erozionom bazisu (lokalnom ili regionalnom) i ponovnom isticanju na površinu, o čemu je bilo reči u prethodnim poglavljima.

Posmatrano kroz prethodno navedene „uloge“ možemo reći da epikarst predstavlja *kožu* karstne izdani i svojevrsnu zaštitu koja se donekle može regenerisati, ali zbog osetljivosti na određene promene prirodnih uslova može biti i uzrok narušavanja dobrog stanja podzemnih voda akumuliranih u karstnoj izdani.

8.5. Predlog mera zaštite izvorišta „Mokra“ i „Divljana“

Procena prirodne ranjivosti podzemnih voda Suve planine, uz izračunavanje indeksa ranjivosti i izradu karata ranjivosti, uz rangiranje ranjivosti od „niske“ do „vrlo visoke“, izvršena je pimenom metoda: EPIK, PI i COP. Dosadašnja teorijska saznanja uključena su u kartiranje ranjivosti, koja je obuhvatala masiv Suve planine i delove neogenih basena koji zaplavljaju podnožje planine. Jedino krajnji jugoistočni obronci planine (JI od reke Lužnice) nisu bili uključeni u analizu, usled nedostatka osnovnih podataka o toj oblasti (Petrović B., 2016 i 2020, Petrović & Marinović, 2019c).

Karta izrađena metodom EPIK (Slika 8.25.) pokazuje raspon vrednosti ranjivosti od „veoma visoke“ do „niske“. Može se primetiti direktna povezanost (hidro)geoloških parametara istražnog područja i indeksa zaštite F. Tako su „vrlo visok“ i „visok“ indeks ranjivosti povezani sa oblastima sa dobro razvijenim epikarstom i znatnim brojem vrtača. Usled ovoga je efektivna infiltracija brža, pa parametar I ima najveći uticaj na konačni faktor zaštite. Pored toga, EPIK metoda ne uzima u obzir promenljive karakteristike, poput promene infiltracije tokom vremena. Teren koji je okarakterisan indeksom „srednje“ i „niske“ ranjivosti nalazi se duž oboda Suve planine.



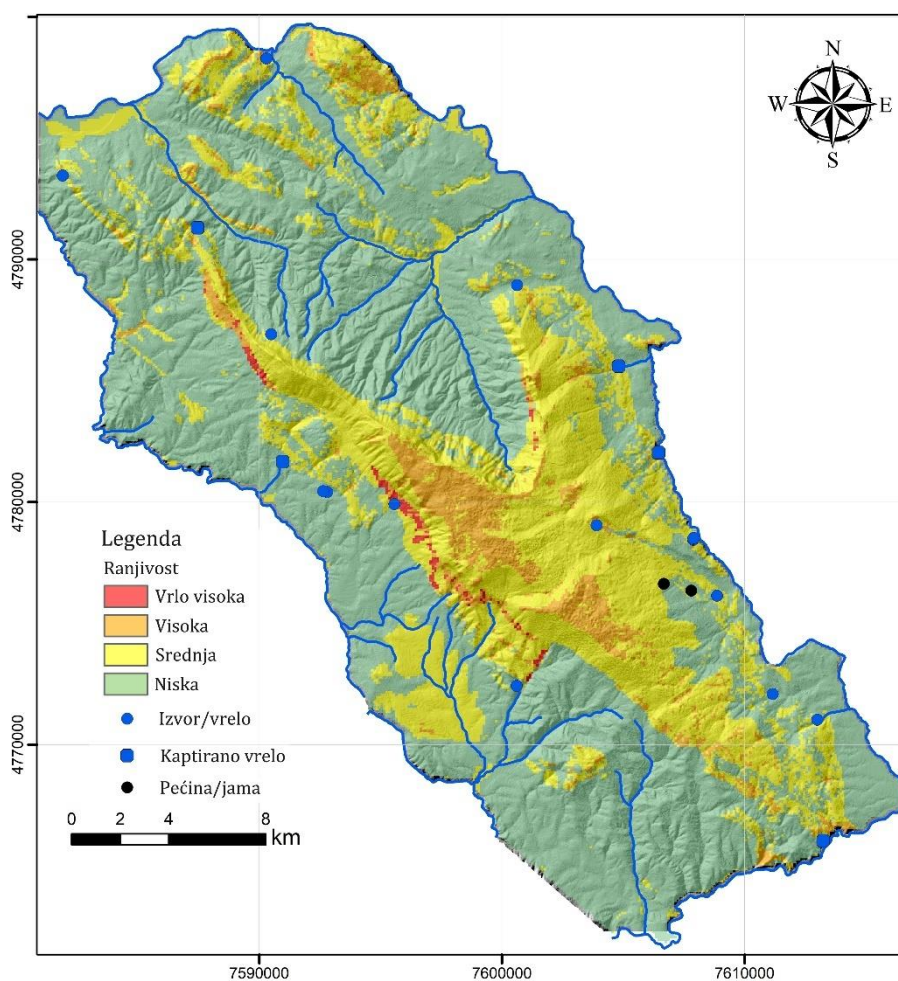
Slika 8.25. Karta ranjivosti istočnih padina Suve planine izrađena EPIK metodom (modifikovano prema Petrović B., 2016)

Primena parametarskih metoda vezana je i za određen stepen subjektivnosti pri određivanju vrednosti parametara i njihovih težinskih koeficijenata. Stoga, analiza osetljivosti omogućava da se preciznije utvrdi uticaj svakog od razmatranih parametara i njegov težinski koeficijent u primenjenoj metodi (Jemcov et al, 2008). U tom cilju, primenjene su dve analize: metoda izostavljanja parametara (eng. *Map-Removal Sensitivity*) koja definiše uticaj svakog od faktora ponaosob i procena efektivnih težinskih faktora (eng. *Effective Weighting Factors*). Metoda izostavljanja parametara podrazumeva isključivanje po jednog parametra iz analize ugroženosti, što u slučaju EPIK metode znači korišćenje tri umesto četiri parametra (Petrović B., 2016; Petrović et al, 2017). Na osnovu sprovedene analize, može se konstatovati da je najviša osetljivost parametara P, dok je najniža osetljivost parametra K, što ukazuje na činjenicu da veličina ovog parametra prati veličinu indeksa ugroženosti. Sa druge strane velika osetljivost faktora E pokazuje da je korelacija sa indeksom ugroženosti veoma mala.

Efektivni težinski faktor predstavlja uticaj svakog parametra za neko podpodručje pri proračunu konačnog indeksa ugroženosti. Efektivni težinski faktor pokazuje realni uticaj pojedinačnih parametara na indeks ugroženosti. Analiza je pokazala da parametar I ima najveću efektivnu težinu (36,78%), što ukazuje na to da ovaj faktor najviše utiče na ukupnu ugroženost podzemnih voda (Petrović B., 2016; Petrović et al, 2017), što korespondira sa realnim uslovima na terenu, jer su najosetljivije zone upravo one u kojima se vrši infiltracija (vrtače, uvale, ponorske zone...). Efektivne težine E i P faktora odgovaraju teoretskim vrednostima, dok je uticaj parametara K smanjen u odnosu na njegovu teoretsku vrednost. Na osnovu sprovedene statističke analize osetljivosti faktora uticaja može se zaključiti da

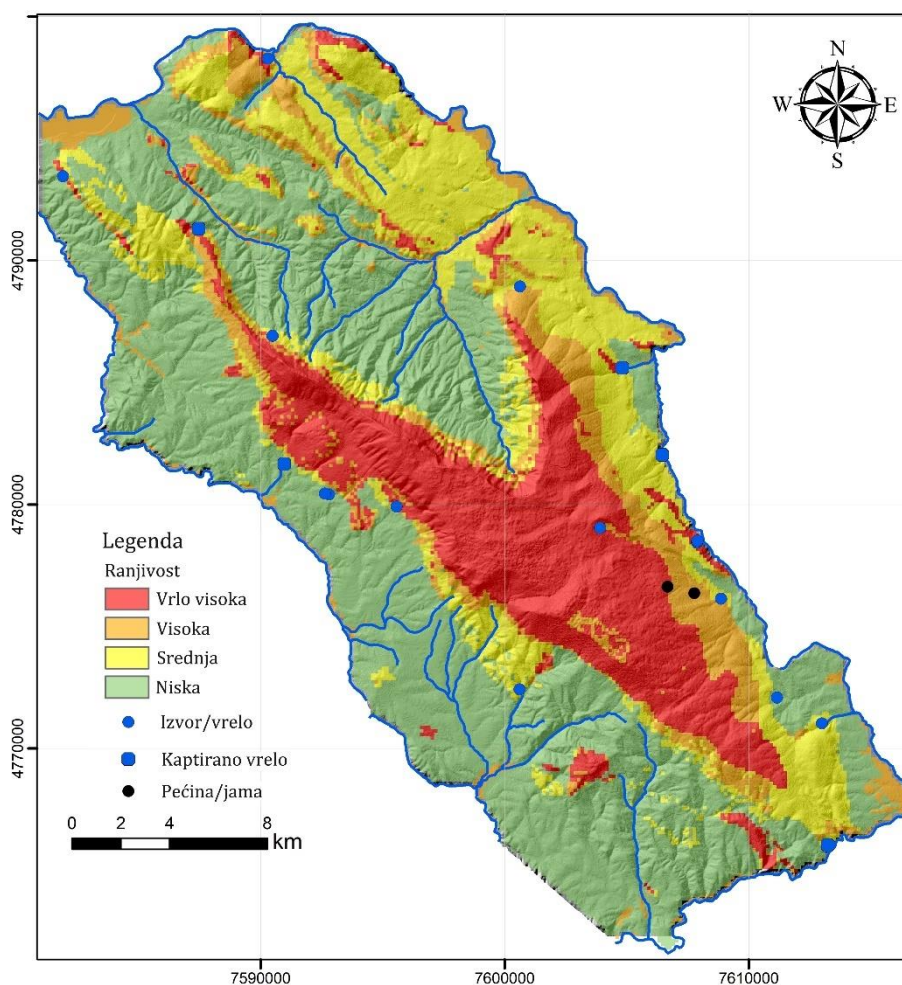
parametri E i I imaju najveći uticaj na konačni indeks zaštite F, koji se izračunava pomoću EPIK metode kartiranja ranjivosti.

Karta ranjivosti PI (Slika 8.26.) prikazuje prirodnu ranjivost izdani koja je pozicionirana kao hipsometrijski najviša. Karta prikazuje prostornu raspodelu faktora zaštite π , koji se dobija množenjem faktora P i I. Dobijena je karta u okviru koje su izdvojena 4 od 5 nivoa ranjivosti podzemnih voda. Jedino nije izdvojena „veoma niska“ ranjivost podzemnih voda, a razlog za to je to što su i kod faktora P i kod faktora I izdvojene 4 klase zaštitnog pokrivača, tj. stepena zaobilaženja zaštitne funkcije podzemnih voda. Može se primetiti da je u odnosu na EPIK metodu, manja površina istražnog područja okarakterisano „veoma visokom“ ranjivošću, a to je direktno povezano sa brojem i rasporedom vrtača. Vrtače služe kao pokazatelj dobro razvijenog epikarsta, tj. ukazuju na nizak stepen zaštite koji ovaj sloj pruža. Područja „visoke“ i „srednje“ ranjivosti se poklapaju sa ostatkom karstifikovanih terena. Ono što je na prvi pogled neočekivano je dobar (Osrednja efikasnost zaštitnog pokrivača) stepen zaštite podzemnih voda na području karstnog terena većeg dela Suve planine. Ovaj teren pored toga što je izgrađen od karstifikovanih karbonatnih stena, zbog velike dubine do nivoa podzemnih voda i rasprostranjenog (uglavnom) glinovitog tla i šumske vegetacije na površini, karakteriše se dobrom zaštitnom ulogom koju pruža nadzidanska zona, dok je ostatak područja ocenjen „niskom“ ranjivošću (uglavnom neogeni sedimenti i aluvijalne naslage: šljunak i pesak, sa glinom).



Slika 8.26. Karta ranjivosti istočnih padina Suve planine izrađena PI metodom (modifikovano prema Petrović B, 2016)

Karta ranjivosti podzemnih voda COP metodom je dobijena množenjem faktor C, O i P (Slika 8.27.). Princip izrade je skoro u potpunosti isti kao i kod primene PI metode. Faktor O koji predstavlja zaštitnu ulogu nadizdanske zone odgovara faktoru P kod PI metode. Dobijena karta za faktor O je prema karakteru slična karti faktora P, što je i očekivano, jer je slična i metodologija izrade, mada postoje određene razlike u rangiranju određenih područja usled razlika u vrednovanju određenih osobina stenske mase i zemljišnog sloja. Faktor C se nešto drugačije računa od faktora I kod PI metode. Karta ovog faktora pokazuje visoke vrednosti za delove terena izgrađene od karstifikovanih karbonatnih tvorevina, ovo je uticalo da se na finalnoj karti ranjivosti izdvoji mnogo više terena gde je ranjivost podzemnih voda veoma visoka. Ostatak istražnog područja uglavnom se karakteriše niskom i veoma niskom ranjivošću podzemnih voda. Važno je napomenuti da faktor P, koji opisuje uticaj padavina na ranjivost podzemnih voda, ima veoma mali uticaj na ukupan indeks ranjivosti, a razlog je slična vrednost faktora P za čitav prostor i kao takva ne smanjuje zaštitnu ulogu nadizdanske zone (Faktor O).



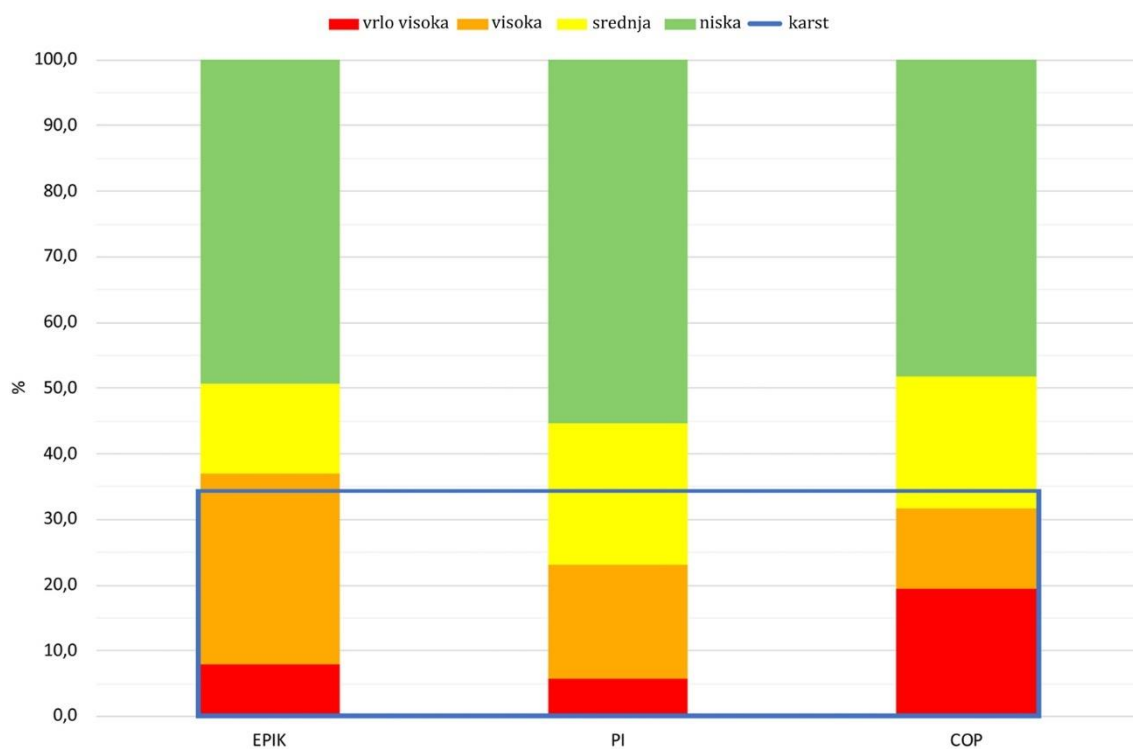
Slika 8.27. Karta ranjivosti istočnih padina Suve planine izrađena COP metodom (modifikovano prema Petrović B., 2016)

Od svih iskorišćenih metoda, COP omogućava veću diferencijaciju među klasama ranjivosti. Naime, kategorija "Vrlo visoka" ranjivost obuhvata 19,4% područja istraživanja (Slika 8.28.), dok je 12,3% istraživačkog terena okarakterisano kategorijom "visoka" ranjivost, a 19,9% istraživanog područja pripada kategoriji "srednje ranjivosti". Ostatak oblasti (48,4%) nije ugrožen, tj. ranjivost je ocenjena kao „niska“ (Petrović B., 2020). Ako se pogledaju rezultati PI i EPIK metode, vidi se da je „niska“ ranjivost procenjena na prilično sličnom području, 55,5% tj. 49,4%. Sa druge strane, manje od 10% istražnog područja spada u područje sa „vrlo visokom“ ranjivošću (7,8% i 5,6%, respektivno). Međutim, ako uzmemo u obzir dve najranjivije kategorije („vrlo visoku“ i „visoku“) i sumiramo ih, dobićemo 36,9% (EPIK), 23,0% (PI) i 31,7%

(COP) od ukupne površine istražnog područja koje je podvrgnuto analizi. Teren koji je okarakterisan kao područje sa „vrlo visokom“ i „visokom“ ranjivošću uglavnom je izgrađen od karstifikovanog krečnjaka i dolomita, sa tanjim slojem zemljišta i retkom šumskom vegetacijom. Na osnovu ovoga se može zaključiti da su sve tri metode dale dobre rezultate u karakterizaciji karbonatnih stena kao ranjivih tj. sklonih zagađenju.

Površina istražnog područja koja je na sve tri karte (EPIK, PI i COP) okarakterisana kao „srednje“ ranjiva predstavlja 13,7%, 21,5% i 19,9% od ukupne površine i ta su područja izgrađena od različitih geoloških formacija. Uglavnom su na obodu masiva Suve planine: paleogene/neogene stene sa izdanima koje su malih zapremina (intergranularne i/ili složene), obično prekrivene kvartarnim sedimentima (sitnozrne klastične naslage bogate glinom).

Karstifikovani tereni pokrivaju oko 35% istražnog područja prikazanog na kartama ranjivosti Suve planine (plavi pravougaonik na Slici 8.28.) i taj je broj sličan površini koja je EPIK metodom okarakterisana sa „vrlo visoka“ i „visoka“ ranjivost, dok PI i COP metoda neke od tih karstifikovanih stena kategorišu kao „srednju“ ranjivost. Razlika je nastala iz činjenice da PI i COP metoda, osim onih parametara koji se analiziraju i za potrebe primene EPIK metode, uzimaju u obzir i dubinu do NPV, vrstu i debljinu tla, kao i karakteristike stena u nadizdanskoj zoni i količini/intenzitetu padavina.

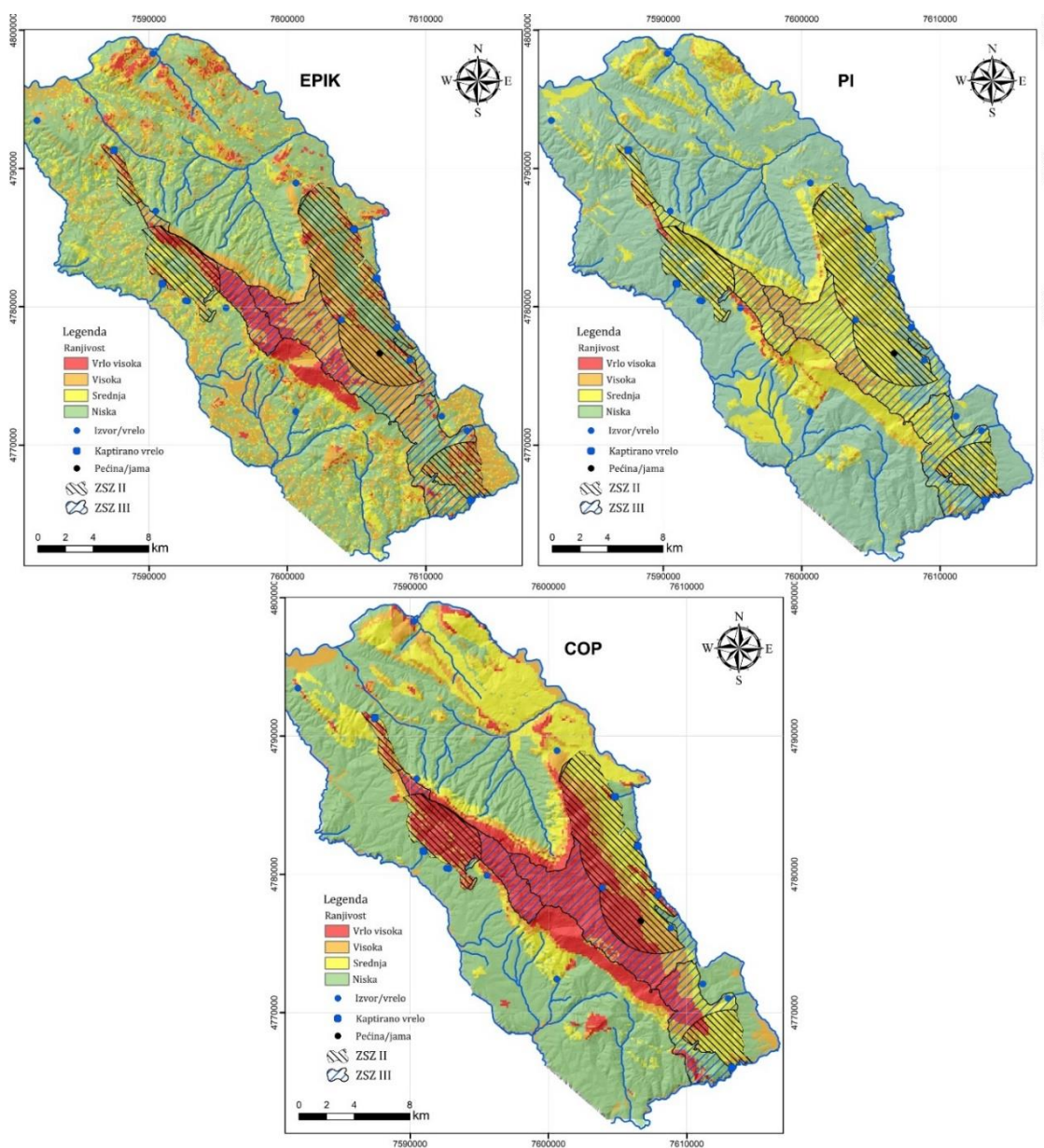


Slika 8.28. Procentualni udeo kategorija ranjivosti dobijen pomoću sve tri metode na istražnom području, u poređenju sa površinom karbonatnih stena (preuzeto iz: Petrović B., 2020)

Situacija na istražnom području, tj. u okolini SRP „Suva planina“ u pogledu zaštite izvorišta podzemnih voda je dobra, jer su ZSZ definisane, a delimično i primenjene na karstnim vrelima: Mokra, Divljana, Ljuberađa, Gornji Dušnik i Golemo vrelo. Odsustvo naselja na Suvoj planini pruža odlične uslove za zaštitu podzemnih voda. Ako uporedimo područja koja su zaštićena primenom ZSZ i područja koja bi trebalo zaštititi uzimajući u obzir karte ranjivosti, mogu se primetiti određena odstupanja (Tabela 8.1. i Slika 8.29.).

Tabela 8.1. Poređenje površine područja ZSZ i područja koja treba zaštititi uzimajući u obzir karte ranjivost (modifikovano prema Petrović B., 2020)

Vrsta zaštite	Tip ZSZ	Površina područja pod zaštitom (km ²)	Ukupno zaštićene površine (km ²)
Primena zakona RS	ZSZ II	92,72	165,05
	ZSZ III	72,32	
Površina područja koju treba zaštititi (km ²) u skladu sa kartama ranjivosti			
EPIK	ZSZ II	61,39	118,18
	ZSZ III	56,79	
PI	ZSZ II	67,72	122,13
	ZSZ III	54,41	
COP	ZSZ II	90,99	155,03
	ZSZ III	64,03	



Slika 8.29. Zone sanitarne zaštite (ZSZ) prema zakonskoj regulativi Republike Srbije upoređene sa kartama ranjivosti (modifikovano prema Petrović B., 2020)

Sumarna površina ZSZ II i ZSZ III koja bi trebalo da bude zaštićena, uz primenu srpske legislativne (Službeni glasnik RS, br. 92/2008), iznosi 165,05 km². ZSZ II i ZSZ III bi se prostirale na manjem području kada bi se primenilo pravilo da je potrebno zaštititi samo područja na

kojima je procenjena srednja, visoka i vrlo visoka ranjivost (Petrović & Marinović 2019c, Petrović, 2020). Površina pod zaštitom bila bi u tom slučaju 28% manja ako se primeni EPIK metoda za definisanje druge i treće zone sanitarne zaštite, 26% manja ako se primeni PI metoda i 6% manja ako se primeni metoda COP. S druge strane, ukoliko se primeni pravilo da samo područja sa visokom i veoma visokom ranjivošću treba da budu pod transparentnom zaštitom, površina primene ZSZ će se smanjiti na 32% površine od one predložene zakonodavstvom ako se primeni EPIK metoda, oblast pod zaštitom predložena zakonodavstvom biće manja 11% ako se primeni PI metoda i 35% od te površine ukoliko se primeni metoda COP. Primena ovih pravila u udaljenim područjima poput ovog veoma je teška, ponekad i nemoguća. Međutim, znakovi upozorenja koje zakon predviđa moraju biti postavljeni duž asfaltnih regionalnih puteva, kao i seoskih i šumskih puteva.

9. Osvrt na dobijene rezultate i predlog daljih istraživanja

U cilju definisanja načina na koji funkcioniše epikarst i kakav uticaj ima na režim, bilans i kvalitet podzemnih voda istočnog dela karstnog sistema Suve planine, korišćen je multidisciplinarni pristup. U uvodnom delu dat je osvrt na postavljene ciljeve i metode koje su bile primenjene tokom istraživanja. Primena određenih metoda prilikom realizacije istraživanja zavisila je od prirodnih uslova, tehničkih mogućnosti i ekonomskih uslova, koji su zajedno uticali na primenjivost metode i uspešnost realizacije istraživanja.

9.1. Prikaz primenjenih metoda, prednosti i ograničenja u odnosu na dobijene rezultate

Primenjene metode istraživanja pokazale su se zadovoljavajućim, međutim, određeni postupci nisu dali potpune rezultate za postizanje postavljenih ciljeva u istraživanjima istočnih padina Suve planine (Tabela 9.1.), za potrebe izrade doktorske disertacije.

Satelitski snimci su sve dostupniji i kvalitetniji, prekrivaju velike površine terena i omogućavaju sagledavanje regionalnih i nekih lokalnih struktura i pojava. Međutim, nedostatak nekomercijalnih snimaka, koji su uglavnom bili dostupni tokom realizacije istraživanja je niža rezolucija (najčešće do 30 metara). Često je bilo potrebno da se prvo izvrši procesiranje snimaka, radi uklanjanja distorzija i šumova. Rezultati koji su dobijeni pomogli su u definisanju generalnih pravaca kretanja podzemne vode i rasprostranjenja epikarsta na regionalnom nivou (istočne padine Suve planine). Aerosnimci su bolje rezolucije i omogućavaju da se prate prirodne promene u vremenu (ako postoje vremenske serije snimaka), ali su manje dostupni od satelitskih snimaka, naročito snimci koji su namenski izrađivani. Daljinska detekcija kroz analizu satelitskih snimaka (Landsat 8) pomogla je u izradi karte NDMI, a u kombinaciji sa analizom drugih karata (topografskih, DEM, pedoloških) rezultirala je izradom četiri oleate: S – nagib terena, N – oleata vegetacije, Z – zaštitna uloga zemljišta i K – stepen razvoja karstifikacije, koje su deo karte potencijala za razvoj epikarsta - E. Karta je poslužila prilikom izrade karte ranjivosti, a pomogla je u definisanju regionalnog razvoja epikarsta i kao podloga za detaljno kartiranje epikarsta u kasnijoj fazi terenskih istraživanja.

Geomorfološke metode istraživanja su pružile bolji uvid u stepen razvoja procesa karstifikacije, a samim tim i bolje definisanje rasprostranjenja epikarsta i njegovih odlika na terenima Suve planine, međutim, određeni delovi terena nisu mogli biti terenski istraženi iz tehničkih razloga pošto je teren nepristupačan. Prilikom budućih istraživanja metoda daljinske detekcije se može primeniti kao pomoć u realizaciji geomorfoloških istraživanja i definisanja stepena karstifikacije na lokalnom nivou uz primenu bespilotne letelice – drona.

Speleološka istraživanja su primenjena za određivanje osnovnih odlika dva pronađena podzemna karstna objekta, u ataru sela Bežište. Međutim, iako su podzemni karstni oblici mnogo ređi na istočnim padinama Suve planine, postoje informacije o jamama i pećinama, koje bi trebalo ispitati u narednom periodu.

Tabela 9.1. Primenjene metode istraživanja i rezultati

Primenjena istraživanja	Očekivani rezultat	Okvirno ostvaren rezultat (%)	Razlog ograničenja	Preporuka za korišćenje u sličnim uslovima	Preporuka druge ili suplement metode
strukturno-geološka (kolor-kompozitni satelitski snimci - Landsat 8)	izdvajanje ruptura	70	rezolucija piksela 100x100 m ili 30x30 m (uz poboljšanja 15x15 m)	mogu se koristiti za regionalna istraživanja i neke lokalne analize	1) upotreba komercijalnih satelitskih snimaka, veće rezolucije 2) stereoskopska analiza aerosnimaka (stereopar) 3) LIDAR ¹⁸ snimci 4) upotreba bespilotne letelice – dron
	izrada oleata za kartu epikarsta	90	rezolucija piksela 100x100 m ili 30x30 m (uz poboljšanja 15x15 m)	mogu se koristiti za regionalnu analizu	1) upotreba komercijalnih satelitskih snimaka, veće rezolucije 2) stereoskopska analiza aerosnimaka (stereopar) 3) LIDAR snimci
	stepen karstifikacije i razvoja epikarsta	80	nepriступačnost terena u određenim delovima užeg područja istraživanja	da	upotreba bespilotne letelice – dron
	stepen karstifikacije i razvoja epikarsta	70	„nedovoljan“ broj podzemnih objekata	da	/
geomorfološka	stepen karstifikacije i razvoja epikarsta	75	metoda VES nije dovoljno precizna	da, ali u kombinaciji sa drugim metodama	1) georadar 2) geoelektrična tomografija
speleološka	definisane tipa i čistoće karbonatnih stena, starosti i sukcesije, dijageneze	80	zavisi od broja uzoraka i njihovog prostornog rasporeda; nedovoljna tehnička opremljenost	da, ali u kombinaciji sa drugim metodama	1) tehnička analiza otpornosti krečnjaka 2) paleontološka analiza 3) litološka/mineraloška korelacija
petrološka	definisane tipa zemljišta prema sadržaju makrokomponenti	75	nedovoljan broj uzoraka i nedovoljna prostorna pokrivenost uzorkovanjem	da, ali u kombinaciji sa drugim metodama	/
	geohemijska karakterizacija zemljišta i zagađenosti	75			
	definisane organsko-geohemijskih parametara	70			
pedološka					/

<i>Primenjena istraživanja</i>	<i>Očekivani rezultat</i>	<i>Okvirno ostvaren rezultat (%)</i>	<i>Razlog ograničenja</i>	<i>Preporuka za korišćenje u sličnim uslovima</i>	<i>Preporuka druge ili suplement metode</i>
hidrogeološka	definisana karakteristika epikarsta	75	nepriступačan teren nedovoljna tehnička opremljenost	da	upotreba bespilotne letelice – dron
	definisane bilansa podzemnih voda	70	nedovoljna tehnička opremljenost	da, uz precizno definisanje oblasti prihranjivanja opitima trasiranja, povećanje tačaka osmatranja isticanja, i instaliranje kišomera / totalizatora u zoni prihranjivanja, instaliranje lizimetara u zoni prihranjivanja / isticanja	/
	definisane režima podzemnih voda	80	nedovoljna tehnička opremljenost	da, uz povećanje tačaka osmatranja isticanja	/
hemijska	definisane režima kvaliteta merenjima na terenu	75	nedovoljna tehnička opremljenost	da, uz poboljšanje tehničke opremljenosti uređajima za rad na terenu i veću frekvenciju merenja	/
	definisane osnovnog kvaliteta kišnice, procedne i podzemne vode definisane sadržaja mikroelemenata	80	nedovoljna tehnička opremljenost	da, uz poboljšanje opremljenosti	/
mikrobiološka	definisane kvaliteta procedne i podzemne vode	60	nedovoljna tehnička opremljenost / primenjene „zastarele“ metode	da, uz frekventnija uzorkovanja vode na vrelima i uz frekventnije uzorkovanje prilikom novih opita	1) analiza specifičnih mikroorganizama, za određeno područje 2) kombinovana primena MPN metode i spektrofotometrije kod definisanja broja bakterija

Primenjena istraživanja	Očekivani rezultat	Okvirno ostvaren rezultat (%)	Razlog ograničenja	Preporuka za korišćenje u sličnim uslovima	Preporuka druge ili suplement metode
izotopska	konstruisanje LIML i GIML za lokaciju Suva planina	90	1) potreban veliki broj uzoraka u dužem vremenskom periodu (optimalno 3 godine) 2) visoka cena analiza 3) nedovoljan broj laboratorija koji radi ove analize	da, uz frekventnije uzorkovanje i instaliranje kišomera / totalizatora u zoni prihranjivanja drugih karstnih vrela	/
	određivanje vremena zadržavanja vode u podzemlju	70	1) potreban veliki broj uzoraka u dužem vremenskom periodu (optimalno 3 godine) 2) visoka cena analiza 3) nedovoljan broj laboratorija koji radi ove analize	da, uz frekventnije uzorkovanje na svim pojavama isticanja podzemnih voda	1) definisanje sadržaja izotopa T, T+ ³ He i ¹⁴ C u podzemnoj vodi, 2) definisanje sadržaja izotopa ¹³ C u vodi i steni
opit trasiranja fluorescentnim traserom	utvrđivanje pravaca i brzine cirkulacije vode u epikarstu, definisanje razgranatosti mreže kanala u epikarstu	85	nedovoljna tehnička opremljenost opit je sproveden u zimskim uslovima	da, uz poboljšanje opremljenosti – fluorimetar i povećanje lokacija uzorkovanja, koje zavise od godišnjeg doba, preporuka je sredina proleća	primena različitih trasera na istoj lokaciji (eozin, rodamin, tinopal...) radi preciznijeg definisanja razgranatosti kanala i njihove vertikalne i horizontalne distribucije iznad tavanice pećine
opit sa kontaminantom	definisanje retencionih svojstava epikarsta, funkcionisanja procesa samoprečišćavanja u uslovima različitih količina procedne vode u pećini	80	izbor kontaminanta	da, uz primenu novih kontaminanta	primena kontaminanta hemijske i/ili mikrobiološke prirode u većoj koncentraciji
laboratorijski opit na modelu epikarsta	prikaz prirodnih uslova u sintetičkom modelu epikarsta i migracije hemijskog kontaminanta	75	nedovoljna tehnička opremljenost	da, uz poboljšanje opremljenosti	1) smanjenje aktivne poroznosti u CEVI 2 2) opit sa drugim kontaminantima hemijskog porekla i mikrobiološkog porekla

Na tri lokacije u okviru užeg istražnog prostora izvedena su geofizička merenja, koja su sprovedena primenom geoelektričnog merenja, postupkom vertikalnog električnog sondiranja (VES), elektrodnim dispozitivom tipa Šlumberže sa ukupno 11 sondi. Prikupljeni podaci su dali novi uvid u debljinu i rasprostranjenje ispucale i karstifikovane zone do dubine od 30 metara. Međutim, za stvaranje bolje slike o poziciji i prostornom položaju epikarsta potrebno je sprovesti istraživanja sa većim brojem sondi i na većem broju lokacija, i sa drugim geofizičkim metodama, što u periodu sprovođenja istraživanja za potrebe izrade ove disertacije nije bilo moguće ostvariti.

Petrološka istraživanja su precizno definisala tipove krečnjačkih stena sa tri lokacije, koje su bile odabrane, tako da predstavljaju svaki od tri tipa karbonata, na istočnim padinama Suve planine, koji su izdvojeni prilikom izrade geološke karte SFRJ (Vujisić et al, 1971). Preciznost analize zavisi od broja uzoraka, pa je preporuka imati ih više, sa različitim lokacija u okviru iste oblasti rasprostranjenja karbonatnih stena. Na taj način se može sprovesti i litološka / mineraloška korelacija sedimenata, radi preciznog definisanja prostiranja krečnjaka, naročito u oblastima prelaska iz jedne u drugu litološku jedinicu. Takođe, dopuna ovim metodama može biti paleontološka analiza i niz drugih tehničkih analiza krečnjaka.

Za potrebe definisanja odlika epikarsta sprovedeno je kartiranje na repnim profilima. Definisane su osnovne karakteristike epikarsta, na otvorenim izdancima i usecima, izvršeno je određivanje ili procena debljine epikarsta i određivanje oblasti prostiranja. Izdvojene su četiri kategorije epikarsta. Da bi karta rasprostranjenja epikarsta tj. potencijala za njegov nastanak i razvoj mogla da bude „kalibrisana“ potrebno je izvršiti još detaljnije kartiranje na većoj površini terena tj. na više repnih profila. Potrebno je prethodno primeniti i druge metode daljinskog izviđanja, uz upotrebu bespilotnih letelica, naročito na delovima terena koji su sa određenim potencijalom za nastanak epikarsta, a okarakterisani kao nepristupačni.

Režim i bilans podzemnih voda istočnih padina Suve planine je definisan za kaptirana vrela na kojima postoji osmatranje isteklih tj. zahvaćenih količina podzemne vode. Nisu postojale tehničke mogućnosti da se na nezahvaćenim vrelima vrši kontinualno osmatranje izdašnosti, koje bi dodatno pomoglo u definisanju režima i bilansa podzemnih voda koje na njima ističu, a samim tim pomoglo da se još bolje definiše uticaj epikarsta na isticanje podzemnih voda na vrelima u podnožju planine. Tokom budućih istraživanja potrebno je bolje definisati ulazne elemente bilansa, a kako bi se to uspešno uradilo neophodno je instalirati automatske kišomere ili barem kišomere „totalizatore“ u oblasti koja predstavlja zonu prihranjivanja.

Definisanje režima kvaliteta podzemnih voda je izvedeno sa manje problema, međutim, nedostatak određenih delova opreme je usporio ili odložio definisanje određenih parametara kvaliteta podzemnih voda, kao i rezultate opita trasiranja, opita sa kontaminantom i opita u laboratorijskom modelu. Međutim, uz pomoć hemijskih analiza koje su sprovedene u laboratorijama postignut je zadovoljavajući nivo poznavanja kvaliteta podzemne vode formirane u okviru karstne izdani na istočnim padinama Suve planine.

Hemijske i mikrobiološke analize su doprinele definisanju kvaliteta podzemne vode, ali i promena koje se obavljaju u okviru epikarsta prilikom filtracije vode kroz ovaj sloj, prilikom opita sa kontaminantom u vidu stajskog đubriva i zagađene bunarske vode. Takođe, doprinele su definisanju uslova koji su nastali prilikom formiranja fizičkog modela epikarsta u laboratorijskim uslovima.

Radi određivanja sastava stabilnih izotopa (^{18}O i ^2H) i konstruisanja lokalne izotopske meteorske linije vršeno je uzorkovanje kišnice, a paralelno je vršeno uzorkovanje podzemne vode sa četiri vrela u podnožju istočnih padina Suve planine. Izrađena LIML je pomogla u definisanju srednjeg vremena zadržavanja podzemnih voda, međutim, za preciznije definisanje „starosti“ podzemnih voda potrebno je izvršiti i dodatne analize drugih stabilnih izotopa i radioaktivnih izotopa. Nedostatak izotopskih metoda istraživanja je neophodnost prikupljanja velikog broja uzoraka i veoma visoka cena analiza, kao i nedovoljan broj laboratorija u zemlji koji radi ove analize.

Opit trasiranja je izveden na lokaciji pećine Peč, koja je odabrana jer je omogućila da se na malom prostoru izvede opit u okviru nadizdanske zone i isprati kretanje infiltrirane vode kroz povlatu pećine i njeno prikupljanje na mestima pojavljivanja. Usled nedostatka preciznog uređaja – fluorometra, vršeno je vizuelno određivanje prisustva trasera u procednoj vodi, pa je na osnovu tih privremenih rezultata definisan ritam uzorkovanja, dok su konačni rezultati kvalitativne analize sadržaja trasera pristigli kasnije. Pokazalo se da je traser uočen na vreme i ispraćen tokom celog perioda pojavljivanja na mestima procurivanja vode, ali da je frekvencija uzorkovanja trebala da bude malo veća. Lokacije na kojima je prikupljena voda za uzorke su zavisile direktno od količina vode koje su se proceđivale, pa je verovatno bolje vreme za organizovanje opita bilo sredina proleća.

Sprovedeni *in situ* eksperiment, pomogao je u definisanju parametara epikarsta, procesa samoprečišćavanja zavisno od vrste i količine zagađujuće supstance, kao i uticaja izlučenih padavina i/ili otopljenog snega u prirodnim uslovima na proces prečišćavanja vode. Međutim, analize uzoraka kontaminanta su pokazale neočekivano niske koncentracije azotnih jedinjenja, pa je zaključak da je prilikom pripreme kontaminanta, u želji da ne bude opasan po prirodnu sredinu, ipak napravljen rastvor „laganog“ hemijskog sastava. Sadržaj bakterija je bio pogodan za praćenje promene količine zagađujuće supstance, ali su metode analize koje su iskorišćene ipak bile nedovoljno precizne, naročito pri definisanju sadržaja bakterija koji je >161 (npr. određivanje broja koliformnih bakterija). Tehničke mogućnosti su ograničile frekvenciju uzorkovanja, pa je preporuka da se u narednim opitima osim na koncentraciju zagađujućih supstanci obrati pažnja i na frekvenciju uzorkovanja, iako je ona donekle diktirana prirodnim (sezonskim) uslovima, pa i ovde stoji preporuka da se opiti obavljaju sredinom proleća (april-maj). Predlog za naredna istraživanja je da se opit trasiranja sprovede istovremeno sa opitom sa kontaminantom.

Fizički model epikarsta je odgovorio na zahtev kreiranja uslova filtracije/proceđivanja sličnim onima koji vladaju u prirodnim uslovima i dao odgovore koji se tiču simuliranja migracije hemijskog kontaminanta, međutim, tehnički uslovi prilikom realizacije opita u laboratorijskim uslovima nisu dozvolili da se simulira mikrobiološko zagađenje i napravi poređenje tih rezultata sa rezultatima prikupljenim na terenu.

9.2. Predlog daljih istraživanja

Istraživanja na izdvojenom užem području, istočnih padina Suve planine, treba nastaviti, a istražni prostor proširiti na celokupan masiv planine, jer jedino integrisanim multidisciplinarnim istraživanjima, uz obavezna detaljna (hidro)geološka istraživanja karstnog masiva mogu se sagledati zone prihranjivanja i dreniranja, kao i pravci cirkulacije podzemnih voda, jednog ovako kompleksnog hidrogeološkog sistema.

U sklopu definisanja osnovnih odlika karstne izdani, a pre svega određivanja baze karstifikacije bilo bi poželjno da se izradi barem jedna, optimalno tri, istražne bušotine. Istražnom bušotinom dubine do 400 metara bi se osim informacija o promenama stepena karstifikacije sa dubinom, dobile relevantne informacije o debljini epikarsta u zoni istraživanja. Mikrolokacija istražne bušotine bi bila definisana nakon sprovedenih geofizičkih istraživanja (VES), na nekoj od lokacija koje se nalaze u zaleđu vrela Mokra i Divljana, na nadmorskoj visini od 700-750 metara, između lokaliteta, koji su na topografskoj karti list Bela Palanka (Bela Palanka, 583-4-1), nazvani Široka padina i Bagandijski laz. Ukoliko bi se ukazala prilika za izradu još dve istražne bušotine, dubine do 300 metara, mikrolokacije bi bile definisane na isti način u zaleđu Gornje Koritnice (jugoistočno od lokaliteta Markova bukva) i Bežišta (lokalitet Bukovica).

Radi boljeg definisanja bilansa i režima podzemnih voda karstne izdani, potrebno je preciznije definisati ulazne i izlazne parametre od onih koji su sada preko mreže RHMZ Srbije na raspolaganju. Naročito je značajno definisati količine padavina na slivu, pa se u te svrhe predlaže instaliranje klimatološke monitoring stanice, na lokaciji Rakoš česme ili šire okoline. Osim količine padavina, stanica bi merila i temperaturu vazduha i podatke slala putem sredstava mobilne telekomunikacije (*engl. Global System for Mobile Communications - GSM*). U slučaju nepostojanja tehničkih mogućnosti ili nemogućnosti da se nađe odgovarajuća i zaštićena lokacija, od vremenskih i antropogenih uticaja, neophodno je instalirati kišomer totalizator koji bi bio ukopan. U totalizator bi trebalo dodati rastvor CaCl_2 , radi pospešivanja otapanja snega. Ove uređaje bi trebalo instalirati i na lokaciji vrela Mokra i/ili Divljana, radi uspostavljanja određene zavisnosti između količina padavina na masivu Suve planine i njenom podnožju. Radi definisanja veličine isparavanja i povećanja preciznosti proračuna gubitaka vode iz sistema evaporacijom ili evapotranspiracijom, potrebno je instalirati lizimetar na barem jednoj lokaciji u okviru istražnog prostora (vrela Mokra, Divljana ili Bežište). Kvantitativni monitoring je potrebno nastaviti i sprovoditi kod kaptiranih vrela na dnevnom nivou, a kod nezahvaćenih izvora i vrela na petodnevnom nivou ili makar jednom nedeljno.

U pogledu kvalitativnog monitoringa od velikog značaja je da se na kvartalnom nivou vrše analize osnovnih fizičko-hemijskih parametara i koncentracije osnovnih hemijskih karakteristika na svim hidrogeološkim pojavama, na kojima se drenira karstna izdan. U okviru monitoringa potrebno je sprovesti i mikrobiološke analize na svim značajnijim izvorima i vrelima jednom mesečno, a naročito u vremenskim presecima promena godišnjih doba.

Geoelektrična istraživanja (VES) dala bi mnogo bolje rezultate da su primenjena na većem broju lokacija – repernih profila i sa većim brojem sondi, što nije bilo tehnički izvodljivo tokom realizacije terenskih istraživanja 2018-2019. godine, takođe, treba ih sprovesti i na drugim lokacijama na Suvoj planini. Geofizička istraživanja primenom geoelektrične tomografije i/ili georadara bi najverovatnije stvorila kompletniju sliku stepena razvoja epikarsta i ostatka nadizdanske zone u okviru karstnog izdanskog sistema Suve planine.

Kako bi karta rasprostranjenja epikarsta na istočnim padinama Suve planine mogla da bude „kalibrisana“ potrebno je izvršiti poguščavanje tačaka kartiranja. Kartiranje za potrebe definisanja rasprostranjenja i osnovnih odlika epikarsta na istočnim padinama Suve planine treba sprovesti, uz prethodno snimanje terena bespilotnom letelicom. Snimanje bi pomoglo u definisanju repernih profila na delovima terena koji nisu dovoljno pristupačni za direktna terenska istraživanja i koji nisu bili analizirani tokom terenskih istraživanja.

Geohemijsku karakterizaciju zemljišta treba poboljšati povećanjem broja uzoraka, sa više repernih profila, koji bi se preklapali sa profilima na kojima je izvršeno definisanje odlika epikarsta. U narednom periodu na osnovu rezultata dosadašnjih istraživanja potrebno je

izvršiti nove kampanje uzorkovanja zemljišta, koje će biti orijentisane i ka lokacijama gde postoje određene promene u tipu i gustini vegetacije.

U narednom periodu potrebno je nastaviti sa uzorkovanjem kišnice i podzemne vode sa karstnih vrela, koja su do sada analizirana, radi potvrđivanja konstruisane LIML i definisanja odnosa podzemne vode i kišnice. Kasnije bi ista istraživanja trebalo sprovesti i na ostalim vrelima koja dreniraju karstni izdanski sistem Suve planine. U cilju boljeg definisanja starosti podzemnih voda (Vasić, 2017) od određivanja srednjeg vremena zadržavanja u podzemlju, pomoću stabilnih izotopa kiseonika i vodonika, potrebno je utvrditi sadržaj radioaktivnih izotopa T, T+³He i ¹⁴C u što više uzoraka podzemne vode, ali i stabilnog izotopa ¹³C u vodi i steni, kao i sadržaja plemenitih gasova (He, Ne, Ar, Kr, Xe i ³He/⁴He) radi boljeg definisanja starosti voda i bolje procene dubine cirkulacije vrela Mokra, Divljana, Gornja Koritnica i Bežište.

Na osnovu opita trasiranja Na-fluoresceinom, zaključeno da je sistem prslina, pukotina i kaverni, dobro razvijen u povlatnim slojevima pećine, kao i da je prisutan epikarst vrlo dobro razvijen. S obzirom na pozitivne rezultate opita, potrebno je uraditi još nekoliko opita trasiranja epikarsta, odnosno, sprovesti istraživanja u cilju pronalaska novih podzemnih objekata pogodnih za nove opite. Radi preciznijeg definisanja razgranatosti i povezanosti kaverni i njihove vertikalne i horizontalne distribucije iznad tavanice pećine potrebno je uraditi nove opite sa istovremenom primenom više trasera.

Takođe, neophodno je sprovesti i opite trasiranja kojima bi se konačno definisale zone prihranjivanja vrela u istočnom podnožju Suve planine. Kao što je ranije navedeno, od opita sprovedenog na Rakoš česmi 1954. godine, nisu vršena nova istraživanja sa ciljem da se ustanove pravci kretanja podzemnih voda na Suvoj planini. Radi definisanja granica između „slivova“ vrela koja dreniraju Suvu planinu potrebno je izvršiti opite trasiranja sa različitim traserima na odgovarajućim lokacijama: Divna Gorica, Valožje, Rakoš, Mečiji vrh i sl. Tehnologija sprovođenja opita trasiranja je značajno napredovala od sredine XX veka i verovatno bi bilo moguće izvršiti trasiranje sa nekoliko različitih trasera istovremeno, a prikupljanje uzoraka bi trebalo vršiti kombinovanom¹⁷ i kontinualnom¹⁸ metodom (Stevanović & Milanović, 2017). Na taj način bi se smanjila potrebna količina obeleživača i ne bi došlo do narušavanja organo-leptičkih osobina podzemne vode na mestima pojavljivanja. Kombinovani monitoring bi se obavljao na nekaptiranim vrelima, dok bi se kontinualni monitoring vršio na vrelima koja su zahvaćena za vodosnabdevanje.

Kako bi se proverila mogućnost prečišćavanja podzemne vode u okviru nadizdanske zone, čiji je sastavni deo epikarst sproveden je opit u prirodnim uslovima. Dobijeni podaci su omogućili da se postave osnovni parametri epikarsta na lokaciji pećine Peč, kao i da se izvrši definisanje vremenskog okvira u kom se procesi prečišćavanja podzemne vode odigravaju. Ukoliko se pokaže da je količina vode koja se proceđuje dovoljna za sprovođenje opita, kao i u slučaju opita trasiranja, treba sprovesti još nekoliko opita u epikarstu na lokaciji pećine Peč, radi detaljnijeg definisanja procesa koji se odvijaju u ovom sloju. Najbolja varijanta organizacije opita sa novim kontaminantom je da se sprovede istovremeno sa opitom trasiranja. Potrebno je, takođe, prilikom analize broja prisutnih mikroorganizama koristiti metode koje se ne baziraju samo na tehnici najverovatnijeg broja već koristiti i turbidimetrijsku metodu, kojom bi se odredila broj svih bakterija, a ne samo živih ćelija.

¹⁷ Uzorkovanje podrazumeva apsorpcija (taloženje) obeleživača tokom vremena na aktivnom uglju, koji se kasnije analizira u laboratoriji

¹⁸ Podrazumeva merenje koncentracije trasera u kratkim vremenskim intervalima pomoću potapajućeg terenskog fluorometra

Raspored lokacija isticanja i količina istekle vode je pod uticajem distance koju voda mora preći od lokacije nalivanja trasera do osmatrane lokacije, ali veoma zavisi od prohodnosti kaverni koje su nastali u povlati pećine, i njihove međusobne povezanosti.

Laboratorijski eksperiment je obezbedio početne parametre za simuliranje funkcionisanja epikarsta, kao i za rad sa kontaminantima hemijskog porekla (azotna đubriva), ali je potrebno nastaviti eksperimente sa novim količinama i tipovima kontaminanta, uz uključivanje i mikrobioloških kontaminanata. Potrebno je za ove testove obezbediti pouzdaniju metodu determinacije i kvantifikovanja sadržaja bakterija od metode MPN. Takođe, potrebno je izvršiti određene modifikacije sistema, pre svega CEVI 2, u cilju poboljšanja sličnosti sa prirodnom sredinom.

Nastavak detaljnih i dugotrajnih, hidrogeoloških i drugih srodnih istraživanja istočnih padina Suve planine, kao i celog masiva rezultiraće podacima koji će biti od naučnog i praktičnog (ekonomskog) značaja.

10. Zaključak

U doktorskoj disertaciji prikazani su rezultati istraživanja kojim je utvrđen uticaj epikarsta na funkcionisanje karstnog sistema istočnih padina Suve planine u pogledu bilansa, režima kvantiteta i kvaliteta vode. Istraživanja su na prostoru istočnih padina Suve planine izvedena u periodu od 2017-2020. godine. Ocenjena je sposobnost epikarsta da u sistemu sa zemljištem u velikoj meri popravi kvalitet i „prečisti“ podzemne vode.

Primena daljinske detekcije pomogla je u izradi karte rupturnog sklopa u cilju izdvajanja ruptura koje usmeravaju podzemne vode prema zonama isticanja. Osim za određivanje osnovnog rupturnog sklopa, daljinskom detekcijom su definisane geološke karakteristike terena, izvršena analiza satelitskih snimaka, tipova zemljišta i vegetacije kao faktora koji utiču na epikarst. Izvršene analize su rezultirale izradom karte potencijala za razvoj epikarsta E.

Geomorfološka istraživanja su vršena u nekoliko etapa, a najznačajniji deo obavljen je tokom letnjih meseci 2018. godine. Utvrđeno je postojanje, broj, raspored i veličina određenih geomorfoloških objekata, a registrovana su dva nova podzemna geomorfološka oblika na istočnim padinama Suve planine: jama Prosek i pećina Peč. Na lokaciji pećine obavljena su dva terenska opita za potrebe definisanja odlika epikarsta u prirodnim uslovima.

Geofizička istraživanja, postupkom vertikalnog električnog sondiranja (VES), izvedena su na tri lokacije: Rakoš česma, Bukovica i Mokra. Rezultati VES su pokazala postojanje sloja epikarsta čija debljina zavisi od litološkog sastava stena, tektonike i lokacije izvedenih merenja (nagiba i izloženosti terena). Debljina epikarsta opada sa opadanjem kvaliteta (čistoće) karbonatnih stena, povećanjem nagiba i povećanjem udaljenja od rasednih zona. Debljina epikarsta je na lokaciji Rakoš od 3-15 metara, na lokaciji Bukovica 1,5-9 metara i na lokacijama Mokra, tj. Divljana 0,5 do 4 metra.

Na istočnim padinama Suve planine, za potrebe definisanja rasprostranjenja i stepena razvoja epikarsta izdvojene su četiri kategorije: 1-slabo razvijen, 2-razvijen, 3-srednje razvijen i 4-izuzetno razvijen. Terensko hidrogeološko kartiranje epikarsta je sprovedeno nakon izrade karte potencijala razvoja epikarsta, pa je na ovaj način izvršena provera uspešnosti primene daljinske detekcije za potrebe izrade karte potencijala razvoja epikarsta.

Izdašnost vrela je definisana na kaptiranim vrelima Mokra i Divljana (dnevna očitavanja – JKP „Naissus“) u cilju definisanja režima i bilansa karstne izdani i utvrđivanja odnosa proticaja sa fizičko-hemijskim parametrima i izotopskim sastavom. Najveći proticaji vrela Mokra i Divljana, odnosno maksimalne izdašnosti javljaju se: 1) nakon većih izlučivanja padavina i otapanja snega u proleće, i 2) nakon obilnih (i često olujnih) jesenjih padavina. Letnje padavine uglavnom ne utiču na izdašnost vrela Mokra, dok se delimično odražavaju na povećanje izdašnosti vrela Divljana. Utvrđeno je da izdašnost vrela Mokra ima mnogo dužu „memoriju“ od vrela Divljana, tj. da postoji mnogo bolja retencija podzemnih voda i da su karstni kanali verovatno bolje razvijeni i povezani, uz pretpostavku da je njihovo zaleganje dublje u odnosu na sistem kanala vrela Divljana. Period recesije na vrelima u osmatranom periodu traje i do 100 dana. Analiza bilansa ukazuje da 56,2 % padavina izlučenih na sliv vrela Mokra i Divljana istekne, što je u skladu sa rezultatima ranijeg bilansiranja ležišta karstnih izdanskih voda u karstu Karpato-balkanida Srbije.

Terenska hidrogeološka istraživanja su obuhvatila kvalitativni monitoring pojava na mesečnom i kvartalnom nivou. Rezultati prikazani u doktorskoj disertaciji su pokazali da je kvalitet podzemnih voda karstne izdani Suve planine veoma dobar. Osim povoljnih prirodnih

uslova na dobar kvalitet voda imaju uticaj i procesi samoprečišćavanja, koji se odigravaju u podzemlju, uključujući i prostor epikarsta.

Izotopski sastav stabilnih izotopa (^{18}O i ^2H) podzemnih voda sva četiri vrela je sličan i može se videti na osnovu prikazanih dijagrama da su izotopi uglavnom locirani iznad LIML. Izotopski sastav vode hipsometrijski najvišeg vrela Bežište ukazuje na „najteži“ izotopski sastav. Na osnovu rezultata analiza stabilnih izotopa $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{D}$ u podzemnoj vodi i poređenja sa LIML Suve planine, uočava se jaka veza sa padavinama, odnosno sve tačke padaju jako blizu LIML, što ukazuje da se radi o karstnim podzemnim vodama sa relativno brzom cirkulacijom.

Izvedeni terenski eksperimenti ukazuju da je sastav prokapne vode značajno izmenjen u odnosu na sastav kišnice. Promene sastava procedne vode su najvećim delom nastale tokom filtracije kišnice kroz zemljišni sloj i epikarst u čijem sastavu su, takođe, sadržane čestice zemljišta (*terra rosa*, glina). Intenzivno rastvaranje krečnjaka se odvija u epikarstu, što potvrđuju prikupljeni podaci sa lokacije pećine Peč. Porast pH i specifične električne provodljivosti, zajedno sa pratećim povećanjem sadržaja osnovnog jonskog sastava i mikroelemenata (koji su poreklom pre svega iz zemljišta), ukazuje na značajne izmene sastava infiltrirane vode na samom ulasku u karstni izdanski sistem. U nastavku cirkulacije podzemne vode kroz karstnu izdan, procesi rastvaranja krečnjaka i obogaćivanja sastava podzemne vode kalcijumom i magnezijumom sa jedne, a bikarbonata sa druge strane preuzimaju primat nad ostalim procesima, koji se odvijaju u znatno manjoj meri. Stoga podzemna voda, koja ističe na karstnim vrelima u podnožju istočnih padina Suve planine, ima sastav u kojem potpuno dominiraju kalcijum (više od 85%ekv) i bikarbonati (više od 95%ekv), sa magnezijumom čiji je sadržaj oko 12%ekv, dok su kalijum, natrijum, sulfati i hloridi zajedno u koncentracijama koje ne prelaze 5%ekv.

Istraživanjima na terenu utvrđeno je da važnu ulogu i funkciju u procesu samoprečišćavanja podzemnih voda ima epikarst. Radi definisanja prostorno-vremenskih okvira odvijanja procesa samoprečišćavanja u epikarstu sprovedena su dva terenska opita.

Opit trasiranja je sproveden pomoću Na-fluoresceina. Fiktivna brzina kretanja podzemne (procedne) vode je bila od 14,76 m/h do 21,6 m/h. Brzina filtracije podzemne vode kroz epikarstnu izdan, manja je od brzine cirkulacije kroz karstnu izdan, jer je virtuelna brzina kretanja podzemne vode kroz karstnu izdan koja se drenira na Gornjoj Koritnici bila 172,8 m/h. Kvantitativna analiza opita trasiranja pokazala je da je 3,5% trasera isteklo tokom opita. Raspored isticanja i količine istekle vode je pod uticajem distance koju voda mora preći od lokacije nalivanja do lokacija u pećini, ali pre svega zavisi od prohodnosti kaverni i kanala i njihove međusobne povezanosti. Sumarna količina vode koja je kapala sa tavanice pećine na početku opita trasiranja iznosila je oko 25 l/h, dok je na kraju opita iznosila oko 6 l/h. Sistem pukotina i kaverni je dobro povezan na mikrolokaciji pećine Peč. Epikarst je vrlo dobro razvijen uz postojanje drenova, kanala prvog reda, koji vodu brzo sprovode iz gornjih slojeva zemljišta kroz epikarst do mesta isticanja na tavanici pećine. Razgranatost i povezanost mreže sekundarnih i tercijarnih kanala sa primarnim kanalima je dobra, jer se traser pojavio na svim osmatranim lokacijama skoro istovremeno. Distanca koju voda pređe od infiltracije do pojavljivanja na tavanici pećine, utiče na vreme koje voda provodi u podzemlju, ali je prohodnost i veličina šupljina primaran faktor koji utiče na brzinu filtracije.

Opit pomoću kojeg je definisana migracija zagađujuće supstance i proces njenog menjanja u funkciji vremena obavljen je sa kontaminantom organskog porekla (rastvor stajskog đubriva i zagađene podzemne vode iz bunara). Migracija hemijskog dela kontaminanta - nitrata, odvijala

se brzinom od 0,00011 m/s do 0,0003 m/s. Dok je brzina migracije bakteriološkog zagađenja, iznosila od 0,00005 m/s do 0,00008 m/s.

Količina vode koja se filtrirala kroz epikarst tokom opita bila je značajna usled zasićenja epikarstne izdani kišnicom. Brzo otapanje snega izazvalo je efekat „klipa“ na vodi akumuliranoj u izdani, što je povećalo količinu procedne vode i količine kontaminanta na određenim lokacijama uzorkovanja.

Samoprečišćavajući potencijal epikarsta u pogledu hemijskog zagađenja koje je organskog porekla je znatno izražen. Koncentracije zagađujućih supstanci koje su određene tokom eksperimenta sa kontaminantom su bili u granicama MDK za vodu za piće ili daleko ispod njih. Jedini parametar koji je tokom monitoringa pokazao promenljivost tokom vremena i određenu zavisnost od količine voda koje su se filtrirale kroz epikarst je nitratni anjon. Koncentracija nitrata se tokom vremena povećavala u određenim intervalima u skladu sa pojačavanjem intenziteta kapanja vode sa tavanice pećine do koje je dolazilo usled pulsog kretanja vode kroz epikarstnu izdan.

Rezultati eksperimenta sa kontaminantom su pokazali da heterogenost i anizotropija epikarsta utiču na uslove egzistencije određenih rodova bakterija. Koliformne bakterije, kao i aerobne mezofilne bakterije, uspevaju da prođu kroz epikarst, u skoro neizmenjenom broju (lokacije SP1 i SP3), ali je migracija ipak usporena u odnosu na brzinu kretanja podzemne vode. Broj detektovanih fekalnih bakterija u procednoj vodi je višestruko smanjen u odnosu na broj u kontaminantu. Sulfitoredukujuće klostridije i streptokoke fekalnog porekla su u potpunosti uklonjene iz procedne vode.

Zaključak koji se nameće je da se prečišćavanje određenih bakterija obavlja jako uspešno, s obzirom na uočena smanjenja, a da određeni rodovi bakterija usled uslova koji postoje u prirodnoj sredini (epikarstu) ipak postoje u vodi. Razlog postojanja bakterija fekalnog porekla u slojevima zemljišta i/ili epikarsta i pre nalivanja kontaminanta može biti feces divljih životinja, produkti raspadanja organske materije i na kraju antropogeni uticaj. Sa druge strane aerobne mezofilne bakterije predstavljaju deo živog sveta, koji nastanjuje zemljište, tako da je njihovo pojavljivanje u vodi koje potiče iz epikarsta očekivano.

Ukoliko se u obzir uzmu rezultati terenskog i laboratorijskog eksperimenata sa kontaminantom, može se zaključiti da je sposobnost samoprečišćavanja koju poseduje epikarst značajna u odnosu na ovu vrstu zagađujućih supstanci. Postojanje živog sveta u epikarstu, dovelo je do biohemijskog delovanja i delimične ili potpune razgradnje kontaminanta, ili barem umanjanja njegove štetnosti po krajnje korisnike podzemne vode. Sa druge strane fizička i hemijska adsorpcija i biohemijski procesi su odigrali ulogu u delimičnom prečišćavanju vode u modelu epikarsta.

Funkcionisanje epikarsta u smislu zadržavanja i ispuštanja akumulirane vode može se pratiti preko režima isticanja vode na karstnim vrelima Bežište i Mokra, dok je uticaj epikarsta na izdašnost vrela Divljana i Gornja Koritnica manje uočljiv. U slučaju vrela Bežište uticaj epikarsta na bilans, režim i kvalitet podzemne vode je značajniji nego uticaj na vrelu Gornja Koritnica, usled činjenice da je u okviru zone prihranjivanja vrela Bežište epikarst prisutniji i bolje razvijen. Sličan zaključak se može doneti i u odnosu na uticaj epikarsta na kvantitet i kvalitet podzemne vode koja se drenira na vrelima Mokra i Divljana. Međutim, uticaj epikarsta na režim i bilans karstne izdani, kao i na kvalitet podzemne vode ova dva vrela je manje uočljiv. Mokra i Divljana najverovatnije predstavljaju tačke dreniranja jednog zajedničkog slivnog područja, koje se sastoji od dva dobro povezana podsliva, pa je usled te povezanosti mreže kanala uticaj

epikarsta na režim i izdašnost vrela umanjen. Efekat pulsacije izdašnosti tj. pojava sekundarnih pikova, usled postojanja epikarsta ne uočava se jasno na hidrogramima vrela Mokra i Divljana.

Procena prirodne ranjivosti podzemnih voda Suve planine, uz izračunavanje indeksa ranjivosti i izradu karata ranjivosti, uz rangiranje ranjivosti od „niske“ do „vrlo visoke“, izvršena je primenom metoda: EPIK, PI i COP. COP metoda omogućava veću diferencijaciju među klasama ranjivosti. Sumarna površina dve najranjivije kategorije („vrlo visoka“ i „visoka“ ranjivost) dobijena uz primenu ove tri metode iznosi: 36,9% (EPIK), 23,0% (PI) i 31,7% (COP) od ukupne površine istražnog područja koje je podvrgnuto analizi. Teren koji je okarakterisan kao područje sa „vrlo visokom“ i „visokom“ ranjivošću uglavnom je izgrađen od karstifikovanog krečnjaka i dolomita. Može se zaključiti da su sve tri metode dale dobre rezultate u karakterizaciji karbonatnih stena kao ranjivih tj. sklonih zagađenju. Odsustvo naselja na Suvoj planini pruža odlične uslove za zaštitu podzemnih voda. Površina ZSZ II i ZSZ III koju treba zaštititi, uz primenu zakona RS, iznosi 165,05 km². ZSZ II i ZSZ III bi se prostirale na manjem području kada bi se primenilo pravilo da je potrebno zaštititi samo područja na kojima je procenjena srednja, visoka i vrlo visoka ranjivost.

Podaci koji su dobijeni istraživanjima na terenu ukazuju na važnost postojanja epikarsta kako za kvantitet vodnih resursa u karstu, tako i njihov kvalitet. Uklanjanjem sloja zemljišta i epikarsta (npr. usled otvaranja kamenoloma, što je česta pojava na krečnjačkim terenima) može doći do narušavanja uspostavljene osetljive ravnoteže koja postoji u prirodnim uslovima. Stoga očuvanje ovog akumulacionog elementa karstnog izdanskog sistema u određenoj meri može uticati na poboljšani kvalitet i količinu podzemnih voda koje ističu iz karstne izdani na istočnim padinama Suve planine. Dobijeni rezultati se mogu analogno primeniti i na druge prostore karsta, posebno u oblasti Karpato-balkanida istočne Srbije, a imaju i širi značaj za očuvanje i dalje održivo korišćenje izdanskih voda.

11. Literatura

1. Aller L., Bennet T., Lehr J., Petty R. & Hackett G., 1985: DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings, U.S. EPA, Chicago, Illinois
2. Al-Fares W., Bakalowicz M., Albouy Y., Vouillamoz J.-M., Dukhan M., 2001: Contribution de la géophysique à l'étude d'un aquifère karstique – Exemple: le site karstique du Lamalou, 3^{ème} Colloque GEOFCAN, Orléans, pp.43-46
3. Al-Fares W., Bakalowicz M., Guerin R., Dukhan M., 2002: Analysis of the karst aquifer structure of the Lamalou area (Herauld, France) with ground penetrating radar, *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 51 (2-4), pp: 97-106
4. Anđelković D., 1976: Geofizika na karstu, Zavod za geološka, hidrogeološka, geofizička i geotehnička istraživanja – Geofizički institut, Posebna izdanja knj. 17, Beograd, p. 220
5. Anđelković M., 1967: Strukturno-facijalne zone Karpato-balkanida Srbije. Zbornik radova Rudarsko-Metalurškog fakulteta i Instituta za bakar, Bor, br. 4
6. Antonović G.M., 1982: Pedološka karta SFRJ R=1:50.000 – List Niš 4, Institut za zemljište, Geokarta, Beograd
7. Antonović G.M. & Protić N., 1982: Pedološka karta SFRJ R=1:50.000 – List Pirot 3, Institut za zemljište, Geokarta, Beograd
8. Attkinson T.C., 1977: Carbon dioxide in the atmosphere of the unsaturated zone: An important control of groundwater hardness in limestones, *Journal of Hydrology*, Vol. 35, Issue 1, pp. 111-123
9. Bakalowicz M., 1975: Géochimie des eaux karstiques et karstification. (Karst groundwater geochemistry and karstification). *Annales de Spéléologie* 30(4): 581–589
10. Bakalowicz M., 1995: La zone d'infiltration des aquifères karstiques. Méthodes d'étude. Structure et fonctionnement. (The infiltration zone of karst aquifers. Study methods. Structure and functioning). *Hydrogéologie* 4: 3–21
11. Bakalowicz M., 2003: The epikarst, the skin of karst, In: Jones WK, Culver DC, Herman JS (eds), *Proceedings of the symposium, Shepherdstown, West Virginia, USA, Karst Waters Institute, Charles Town*, pp: 16-22
12. Bakalowicz M., 2005: Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology Journal*, Vol. 13, pp. 148–60
13. Bakalowicz M., Blavoux B., Mangin A., 1974: Apports du traçage isotopique naturel à la connaissance du fonctionnement d'un système karstique—teneurs en oxygène 18 de trois systèmes des Pyrénées, France, (Natural isotope tracing as an informer of karst system functioning. Oxygen-18 content of three karst systems in the Pyrenees, France), *Journal of Hydrology*, Vol. 23, Issues 1-2, pp. 141-158
14. Bakalowicz M.J. & Jusserand C., 1987: Etude de l'infiltration en milieu karstique par les methodes geochemiques et isotopiques, Cas de la Grotte de Niaux (Ariege, France). *Bulletin du Centre d'Hydrogeologie, Universite Neuchatel*, 7, pp. 265–83
15. Barbel-Perineau A., Emblanch C., Danquigny C., 2015: Spatial and Temporal Hydrodynamic Variations of Flow in the Karst Vadose Zone (Rustrel, France) in Function of Depth and Fracturing Density, in: *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems* (Andreo, B., Carrasco, F., Durán, J.J., Jiménez, P., LaMoreaux, J. Eds.), ISBN: 978-3-642-17435-3, pp. 11-18
16. Batiot C., Emblanch C., Blavoux B., Simler R., Daniel M., 2000: Organic matter in karstic aquifers: a potential tracer in the carbon cycle, A small-scale laboratory model approach, „Tracers and modelling in hydrogeology (TraM'2000 Conference)“, Liege, Belgium, IAHS, pp. 459-463

17. Bechtel T.D., Bosch F.P., Gurk M., 2010: Geophysical methods, in: *Methods in Karst Hydrogeology*, (eds. Goldscheider N. & Drew D.), IAH, vol 26. Taylor & Francis/Balkema, London, pp. 171-200
18. Benavente J., Vadillo I., Carrasco F., Soler A., Lián C., Moral F., 2010: Air carbon dioxide contents in the vadose zone of a Mediterranean karst. *Vadose Zone Journal*, Soil Science Society of America, Vol. 9, WI-USA, pp. 126–136
19. Blecha M. & Faimon J., 2014: Spatial and temporal variations in carbon dioxide (CO₂) concentrations in selected soils of the Moravian Karst (Czech Republic), *Carbonates and Evaporites*, Springer Berlin Heidelberg, Vol. 29, Issue 4, pp 395–408
20. Bonacci O., 1987: *Karst Hydrology, with Special Reference to the Dinaric Karst*, Springer-Verlag, p. 184
21. Bonacci O., 1993: Karst springs hydrographs as indicators of karst aquifers, *Hydrological Sciences Journal*, 38:1, pp. 51-62
22. Bottrell S.H. & Atkinson T.C., 1992: Tracer study and storage in the unsaturated zone of a karstic limestone aquifer, in: *Tracer Hydrology* (Hotzl, H. & Werner, A. (eds.)), Rotterdam, Balkema, pp. 207–211
23. Bögli A., 1980: *Karst Hydrology and Physical Speleology*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, ISBN: 978-3-642-67671-0, p. 284
24. Brown T. E., LeMay H. E., Bursten B. E., Murphy C., Woodward P., Stoltzfus M. E., 2018: *Chemistry: The Central Science*, 14th Edition, MasteringChemistry Series, Pearson, p. 1240
25. Charlier J.B., Mudry J., Bertrand C., 2010: Use of dissolved organic carbon to characterize infiltration in a small karst system in the French Jura mountains (Fertans, France), in: *Advances in Research in Karst Media* (eds. Andreo B., Carrasco F., Durán J.J., LaMoreaux J.W.), Environmental Earth Sciences series, pp. 151-156
26. Chernyshev S.N., Dearman W.R., 1991: *Rock Fractures*, Butterworth-Heinemann, London, p. 272
27. Clemens T., Hückinghaus D., Liedl R., auter M., 1999: Simulation of the development of karst aquifers: role of the epikarst, *International Journal of Earth Sciences*, Vol. 88, pp. 157–162
28. Craig H., 1961a: Isotopic variations in meteoric waters, *Science* 133 (3465), pp. 1702–1703
29. Craig H., 1961b: Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen -18 in natural water, *Science*, 133(3465), pp. 1833–1834
30. Curie P., Curie M., Bémont G., 1898: Sur une nouvelle substance fortement radio-active contenue dans la pechblende, *Compte Rendus des Séances de l'Academie des Sciences*, Paris, 127: 1215-7
31. Cvijić J., 1893: Das Karstphänomen - Versuch einer morphologischen Monographie, *Geographische Abhandlungen*, Hrsg. von Prof. Dr A. Penck, Wien, Bd 5: Heft. 3, p. 114
32. Cvijić J., 1895: Pećine i podzemna hidrografija u Istočnoj Srbiji, *Glas SKAN*, XLVI, Beograd, p. 101 (Sabrana dela Jovana Cvijića, Knjiga 7-drugo izdanje, SANU, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, 2000)
33. Cvijić J., 1896: Izvori, tresave i vodopadi u Istočnoj Srbiji, *Glas SKAN*, LI, Beograd (Sabrana dela Jovana Cvijića, Knjiga 13, SANU, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, 1996)
34. Cvijić J., 1912: Suva planina i karst Valožja, *Glasnik Geografskog društva*, sv. 1, Beograd. Pp. 92-99 (Sabrana dela Jovana Cvijića, Knjiga 13, SANU, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, 1996)
35. Čičulić M., 1961: Rezultati geoloških ispitivanja terena u oblasti Zaplanja, *Vesnik Zavoda za geol. i geof. istraž.*, 19, A, Beograd
36. Milić Č., 1959: Prilog problemu geneze crvenice na Suvoj planini, *Zbornik radova Geografskog instituta S. A. N.*, LXVII, knjiga 16, pp. 59-104

37. Milić Č., 1960: Lužnička vrela - Prilog klimatskoj morfologiji krasa, Zbornik radova Geografskog instituta SANU, LXXII, knjiga 17, pp. 23-69
38. Milić Č., 1962: Glavne odlike krasa Suve planine, Zbornik radova Geografskog instituta „Jovan Cvijić“, knjiga 18, pp. 93-154
39. Milić Č., 1970: Osnovne karakteristike geomorfološke evolucije krečnjačkih terena istočne Srbije, Zbornik radova Geografskog instituta „Jovan Cvijić“, knjiga 23, pp. 33-51
40. Čubrilović P., 1984: Uticaj geostrukturnih odnosa na hidrodinamički režim kraških izdani (primeri iz sliva Nišave i Lužnice), Zbornik radova VIII jugoslovenskog simpozijuma o hidrogeologiji, knj. 1, Budva
41. Danilova A. & Anđelković J., 1968: Mikropaleontološki aspekt biostratigrafije mezozoika na severoistočnim padinama Suve planine, Vesnik Zavoda za geol. i geof. istraž., 26, A, Beograd
42. Doerflinger N., Jeannin P-Y., Zwahlen F., 1999: Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method), *Environmental Geology*, Vol. 39 (2), pp. 165-176
43. Dragišić V., 1994: Ekscesna zagađenja karstne izdani, *Zaštita voda i upravljanje vodnim resursima* (Ed. S. Prohaska), posebno izdanje J. Černi, Beograd, pp. 189-204
44. Dragišić V., 1997: Opšta hidrogeologija, Univerzitetski udžbenik, RGF, Univerzitet u Beogradu, Beograd, p. 434
45. Dragišić V. & Živanović V., 2014: Opšta hidrogeologija, Univerzitetski udžbenik, RGF, Univerzitet u Beogradu, Beograd, p. 487
46. Dragišić V. & Polomčić D., 2009: Hidrogeološki rečnik, Univerzitetski udžbenik, RGF, Univerzitet u Beogradu, Beograd, p. 272
47. Drake J.J., 1984: Theory and model for global carbonate solution by groundwater, in: *Groundwater as a Geomorphic Agent* (R. G. LaFleur ed.), Allen&Unwin, London, pp. 210-226
48. Ek C. & Gewalt M., 1985: Carbon dioxide in cave atmospheres, New results in Belgium and comparison with some other countries. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10, pp. 173-187
49. European Parliament (EP) and the Council of the European Union (EC), 2000: Directive 2000/60 EC of the European Parliament and the Council of the 23 October 2000 establishing a framework for Community Action in the Field of Water Policy, *Official Journal of the European Communities* L 327/1, Luxembourg
50. Faimon J., Ličbinská M., Zajíček P., Sracek O., 2012: Partial pressures of CO₂ in epikarstic zone deduced from hydrogeochemistry of permanent drips, the Moravian Karst, Czech Republic. *Acta Carsologica* 42, pp. 47-57
51. Fernandez-Cortes A., Calaforra J.M., Sánchez-Martos F., 2008: Hydrogeochemical processes as environmental indicators in drip water: Study of the Cueva del Agua (Southern Spain), *International Journal of Speleology*. 37. pp. 41-52
52. Filipović B., 1980: Metodika hidrogeoloških istraživanja 1, Naučna knjiga, Beograd
53. Filipović I. & Lipanović S., 1995: Opća i anorganska hemija I i II, Nova školska knjiga, Zagreb, p. 1145
54. Fiorillo, F., 2014: The Recession of Spring Hydrographs, Focused on Karst Aquifers; *Water Resources Management*, 28, pp. 1781-1805
55. Folk R.L., 1959: Practical petrographic classification of limestones. *Bulletin American Association Petroleum Geologists*, v. 43, p. 1-38.
56. Flugel E., 2004: *Microfacies of Carbonate Rocks. Analysis, Interpretation and Application*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag. 976 pp.
57. Ford D.C. & Williams P.W., 1989: *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, Unwin Hyman, London, p. 601

58. Ford D.C. & Williams P.W., 2007: Karst Hydrogeology and Geomorphology, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, p. 562
59. Friederich H. & Smart P.L., 1981: Dye tracer studies of the unsaturated-zone recharge of the Carboniferous Limestone aquifer of the Mendip Hills, England, Proceedings of the 8th International Congress of Speleology, Vol. 1, pp. 283–286
60. Gabrovšek F., 2000: Evolution of early karst aquifers: from simple principles to complex models, Založba ZRC, p. 150 Ljubljana, Slovenija
61. Geyer T., Birk S., Liedl R., Sauter M., 2008: Quantification of temporal distribution of recharge in karst systems from spring hydrographs, J Hydrol, 348, pp. 452–463
62. Geofizika-ING, 2010a: Elaborat o rezervama i kvalitetu podzemnih voda kaptiranog vrela Mokra kod Bele Palanke, "GEOFIZIKA-ING", Preduzeće za geofizika istraživanja u geologiji, hidrogeologiji, rudarstvu i građevinarstvu d.o.o., p. 37
63. Geofizika-ING, 2010b: Elaborat o rezervama i kvalitetu podzemnih voda kaptiranog vrela Divljana kod Bele Palanke, "GEOFIZIKA-ING", Preduzeće za geofizika istraživanja u geologiji, hidrogeologiji, rudarstvu i građevinarstvu d.o.o., p. 38
64. Goldscheider N., 2010: Delineation of Spring Protection Zones. In: Groundwater Hydrology of Springs (Eds. N. Kresic, Z. Stevanovic), Elsevier, pp. 305-338
65. Goldscheider N., Klute M., Sturm S. and Hötzl H. 2000: The PI method – a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. Z Angew Geol 46:157–166
66. Goldscheider N. & Drew D. (eds), 2007: Methods in karst hydrogeology, International contribution to hydrogeology, IAH, vol 26. Taylor & Francis/Balkema, London, p. 264
67. Goldscheider N., Meiman J., Pronk M., Smart C., 2008: Tracer tests in karst hydrogeology and speleology, Int J Speleol, 37, pp. 27–40
68. Goodwin N.R., Coops N.C., Wulder M.A., Gillanders S., Schroeder T.A., Nelson T., 2008: Estimation of insect dynamics using a temporal sequence of Landsat data, Remote Sensing of Environment, Vol. 112, pp. 3680-3689
69. Grozdanović- Radovanović J., 2000: Citologija, Zavod za udžbenike, Beograd, p. 397
70. Gunn J., 1985: A conceptual model for conduit flow dominated karst aquifers, in Karst Water Resources (eds. Gultekin Gunay, A. Ivan Johnson; Proceedings of the Ankara - Antalya Symposium, July 1985), IAHS Publ. no. 161, pp. 587-596
71. Herman J.S., 2003: The chemical character of water in epikarst: the transport of solutes and colloids to depth, Karst Water Institute Special Publication 9, pp. 36-41, Charles Town
72. Holting B., Haertle T., Hohberger K., Nachtigall K., Villinger E., Weinzierl W., Wrobel J.P., 1995: Konzept zur ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. Geol. Jb. C63, p. 5-24
73. Hudson J.A. & Harrison J.P., 1997: Engineering rock mechanics: an introduction to the principles, Pergamon, Tarrytown, NY, p. 444
74. Hunkeler D. & Mudry J., 2007: Hydrochemical methods, in: Methods in Karst Hydrogeology, (eds. Goldscheider N. & Drew D.), IAH, vol 26. Taylor & Francis/Balkema, London, pp. 93-122
75. Huntoon P.W., 1995: Is it appropriate to apply porous media groundwater circulation models to karstic aquifers? In: A.I. El-Kadi (ed.), Groundwater Models for Resources Analysis and Management, Boca Raton, Florida. Lewis Publishers, pp. 339–358
76. Huntoon, P.W., 1997: The Case for Upland Recharge Area Protection in the Rocky Mountain Karst of the Western United States, in Karst Waters and Environmental Impacts (G. Günay and A. I. Johnson (eds.)), Balkema, Rotterdam, pp. 95–102.
77. Jakovljević M., Blagojević S., Raičević V., 2000: Hemija i mikrobiologija voda, Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni fakultet, Beograd-Zemun, p. 89

78. Jeannin P-Y., Groves C., Hauselman P., 2007: Speleological investigations, in: *Methods in Karst Hydrogeology*, (Goldscheider N. & Drew D. (eds.)), IAH vol 26., Taylor & Francis/Balkema, London, pp. 25-44
79. Jemcov I., 2009: Bilans karstnih izdanskih voda i optimizacija rešenja njihovog zahvata na primerima iz Srbije, *Doktorska disertacija*, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, p. 396
80. Jemcov I., Živanović V., Čolić S., Milanović S., 2008: Ocena ugroženosti podzemnih voda karstnog masiva Tara – podrška racionalnom upravljanju Nacionalnim parkom, *Zbornik radova za kras i speleologiju*, Knjiga IX, SANU, Beograd, p 65-80
81. Jones W.K., Culver D.C., Herman, J.S. (eds), 2004: Epikarst, *Special Publication 9*, Karst Waters Institute, Charles Town, p. 160
82. Jiang Z, Lian Y. & Qin X., 2013: Carbon cycle in the epikarst systems and its ecological effects in South China, *Environmental Earth Science*, Volume 68, Issue 1, pp. 151–158
83. Jiang Z., Lian Y., Qin X., 2014: Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration, *Earth-Science Reviews*, Vol. 132, pp. 1-12
84. Kiraly L., 2003: Karstification and Groundwater Flow, *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, Vol 1, Issue 3, pp. (Republished from Gabrovšek, F. (Ed.). 2002. *Evolution of karst: from prekarst to cessation*. Postojna-Ljubljana, Založba ZRC, 155-190.)
85. Kiraly L., Perrochet P., Rossier Y., 1995: Effect of the epikarst on the hydrograph of karst springs: a numerical approach, *Bulletin du Centre d'Hydrogéologie*, vol. 14, pp. 199-220
86. Kirchner J.W., 2003: A double paradox in catchment hydrology and geochemistry, *Hydrol Process* Vol. 17, Issue 4, pp. 871–874, doi:10.1002/hyp.5108
87. Klimchouk A.B., 1987: Conditions and peculiarities of karstification in the shallow subsurface zone of carbonaceous massifs, *Caves of Georgia*, v. 11, (In Russian, res. Engl.), pp. 54-65.
88. Klimchouk A.B., 1995: Karst Morphogenesis in the epikarstic zone, *Cave and Karst Science*, Vol. 21, No. 2, *Transactions of the British Cave Research Association*, pp. 45-50
89. Klimchouk A.B., 2000: The formation of epikarst and its role in vadose speleogenesis, In: *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers* (Eds. Klimchouk A.B., Ford D.C., Palmer A.N. and Dreybrodt W.), *National Speleological Society of America*, pp. 261-273, Huntsville, AL-USA
90. Klimchouk A.B., 2004: Towards defining, delimiting and classifying epikarst: Its origin, processes and variants of geomorphic evolution, *Speleogenesis and evolution of karst aquifers*, *The Virtual Scientific Journal*, pp. 1-13
91. Klimchouk A.B. & Andrejchuk V.N. 1996: Breakdown development in cover beds, and landscape features induced by intrastratal gypsum karst. In: *Gypsum Karst of the World* (Klimchouk A.B., Lowe D., Cooper A., and Sauro U. (eds.)), *International Journal of Speleology* Theme issue 25 (3-4), pp. 127-144
92. Klimchouk A.B., Ford D.C., Palmer A.N., Dreybrodt W. (eds), 1996: *Speleogenesis; Evolution of Karst Aquifers*, *National Speleological Society Press*, Huntsville, AL, 527 pp.
93. Klimchouk A.B., Tymokhina E., Amelichev, G., 2012: Speleogenetic effects of interaction between deeply derived fracture-conduit and intrastratal matrix flow in hypogene karst settings, *International Journal of Speleology*, 41, pp. 35-55
94. Kogovšek J., 1997: Water tracing tests in vadose zone, *Tracer Hydrology*, Balkema, Rotterdam, ISBN: 90-5410-875-4, pp 167-172
95. Kogovšek, J. & Šebela, S., 2004: Water tracing through the vadose zone above Postojnska Jama, Slovenia. *Environmental Geology*, 45, pp. 992–1001
96. Kogovšek J., 2010: Characteristics of percolation through the karst vadose zone, *Karst Research Institute ZRC SAZU, Postojna*, p. 168
97. Komatina M., 1975: Development conditions and regionalization of karst, in: *Hydrogeology of Karstic Terrains* (eds Burger A., Dubertret L.), IAH, Paris, pp. 21–29

98. Komatina M., 1984: Hidrogeološka istraživanja, Metode istraživanja I, SOUR „Geozavod“, Beograd, p. 370
99. Kostić M., 1953: Glavne fizičko-geografske i ekonomsko-geografske odlike Koritnice, Zbornik radova Geografskog instituta, XXXII, SAN, knj. 6, „Naučna Knjiga“, Beograd, pp. 89–105
100. Kostić M. & Martinović Ž., 1967: Ostrovičke terme – Prilog proučavanju termalnih izvora Srbije, Zbornik radova Geografskog instituta „Jovan Cvijić“, XXXII, SAN, knj. 21, Zaštitna radionica „Vuk Karadžić“, Niš, pp. 277–295
101. Kranjc A., 2012: Dinaric Karst – An Example of Deforestation and Desertification of Limestone Terrain, in Deforestation Around the World (Ed. Paulo Moutinho), pp. 73-94
102. Krešić N., 1988: Karst i pećine Jugoslavije, Naučna knjiga, Beograd, p. 150
103. Krešić N., 1991: Kvantitativna hidrogeologija karsta, sa elementima zaštite podzemnih voda, Naučna knjiga, Beograd, p. 192
104. Krešić N., 1997: Quantitative Solutions in Hydrogeology and Groundwater Modeling. LAW Engineering and Environmental Services, INC. CRC Press, p. 461
105. Krešić, N. 2009: Groundwater resources: Sustainability, Management, and Restoration, McGraw-Hill, USA, p. 496
106. Krešić N., 2010: Types and classifications of springs, in: Groundwater Hydrology of Springs (eds. Krešić N. & Stevanović Z.), Elsevier, pp. 30-85
107. Krešić N., 2013: Water in karst, McGraw-Hill, New York, p. 736
108. Krešić N. & Mikszewski A., 2013: Hydrogeological conceptual site models: data analysis and visualization, CRC/Taylor & Francis Group, Boca Raton, p. 600
109. Lakey B., & Krothe N.C., 1996: Stable Isotopic Variation of Storm Discharge from a Perennial Karst Spring, Indiana, Water Resources Research, Hydrogeochemistry and Water Chemistry, Vol. 32, Issue 3 , pp. 721–731
110. Lalošević V., 2011: Mikrobiologija za studente veterinarske medicine, Departman za veterinarsku medicinu, Poljoprivredni fakultet u Novom Sadu, Mala knjiga, Novi Sad, p. 272
111. Li W., Yu L., Yuan D., Wu Y., Zeng X., 2005: A study of the activity and ecological significance of carbonic anhydrase from soil and its microbes from different karst ecosystems of Southwest China, Plant and Soil, Springer Netherlands, Vol. 272, Issue 1, pp. 133–141
112. Lian B., Yuan D., Liu Z., 2011: Effect of microbes on karstification in karst ecosystems, Chinese Science Bulletin, Vol. 56, No. 35, pp. 3743-3747
113. Linhua S. & Fuyuan L., 2003: Distribution of CO₂ in different karst geomorphologies and the influence of vegetation in Shilin National Park, Karst Water Institute Special Publication 9, pp. 42-49, Charles Town
114. Loop C.M. & White W.B., 2001: A conceptual model for DNALP transport in karst ground water basins. Ground Water, 39(1), pp. 119–127
115. Luković M. & Petković K., 1933: Niška Banja. Geološki sastav šire okoline Banje i pojava termalnih radioaktivnih izvora, Glas Srpske kraljevske akademije, Sv. VIII, Beograd, pp.1-64
116. Malík P., 2015: Evaluating Discharge Regimes of Karst Aquifer: In: Karst Aquifers—Characterization and Engineering (Stevanović Z. (ed)), Professional Practice in Earth Sciences, Springer, Cham, pp. 205-249
117. Maloszewski P., Stichler W., Zuber A., Rank D., 2002: Identifying the flow systems in a karstic fissured-porous aquifer, the Schneealpe, Austria, by modelling of environmental O-18 and H-3 isotopes, Journal of Hydrology, 256, pp. 48–59
118. Mangin A., 1973: Sur la dynamiques des transferts en aquifere karstique, Proceedings of the 6th International Congress of Speleology, Olomouc, CSSR, Vol. 6, 157–62

119. Mangin A., 1974: Contribution a l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques, 2eme partie, Concept méthodologiques adoptés. Systèmes karstiques étudiés. Ann Spéléol 29(4), pp. 495–601
120. Mangin A., 1975: Contribution a l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques, 3eme partie, Constitution et fonctionnement des aquifères karstiques. Ann Spéléol 30(1):21–124
121. Mangin A., 1994: Karst hydrogeology. In: Groundwater ecology (Stanford J, Gibert J, Danielopol D (eds)), Academic Press, pp 43–67
122. Margat J., 1968: Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution: Bases de la cartographie: Orléans, France, Bureau de Recherche Géologique et Minière, Document 68 SGL 198 HYD
123. Mazar E., 2004: Chemical and isotopic groundwater hydrology, 3rd edition, New York
124. Mijatović B., 1990: Kras. Hidrogeologija kraških vodonosnika, Specijalna izdanja Geozavoda, Beograd, p. 304
125. Milanović P., 1979: Hidrogeologija karsta i metode istraživanja, Hidroelektrane na Trebišnjici, Institut za korišćenje i zaštitu voda na kršu, Trebinje, p. 302
126. Milanović P., 1981: Karst hydrogeology, Water Resources Publications, Littleton
127. Milanović P., 1999: Geološko inženjerstvo u karstu, brane, akumulacije, injektiranje, vodozahvati, tuneli, zaštita voda, Energoprojekt, ISBN: 86-83163-02-4, p 291
128. Milanović S., 2004: Speleoronjenje, značajan metod istraživanja i zaštite podzemnih voda u karstu, Vodoprivreda, Vol. 36, br. 5-6, str. 427-439
129. Milanović S., 2010: Formiranje fizičkog modela karstne izdani na primeru Beljanice (istočna Srbija), Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, p. 425
130. Milanović S., 2012: Speleologija i speleoronjenje u hidrogeologiji karsta, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, p. 315
131. Milanović S. & Vasić Lj., 2011: Hidrogeološka osnova zaštite podzemnih voda u karstu na primeru Beljanice, Vodoprivreda, vol. 43, br. 4-6, pp. 165-173
132. Milić Č., 1959: Prilog problemu geneze crvenice na Suvoj planini, Zbornik radova SANU, LXVII - Geografski institut, knj. 16, Beograd, pp. 89–104
133. Milić Č., 1960: Lužnička vrela, Zbornik radova SANU, LXXII - Geografski institut, knj. 17, Beograd, pp. 23–69
134. Milić Č., 1962: Glavne odlike krasa Suve planine, Zbornik radova SANU, Geografski institut, knj. 18, Naučno delo, Beograd, pp. 93–154
135. Milić Č., 1970: Osnovne karakteristike geomorfološke evolucije krečnjačkih terena u Istočnoj Srbiji, Zbornik radova SANU, Geografski institut, knj. 23, „Sava Mihić“, Beograd, pp. 93–154
136. Miljanić Š., 2008: Udžbenik nuklearne hemije, Univerzitetski udžbenik, Fakultet za fizičku hemiju, Univerzitet u Beogradu, Beograd
137. Milojević N., 1968: Hidrogeologija, Zavod za izdavanje udžbenika SR Srbije, Beograd, p. 380
138. Milovanović B., Schuster P., Radovanović M., Ristić Vakanjac V., Schneider C., 2017: Spatial and temporal variability of precipitation in Serbia for the period 1961–2010, Theor Appl Climatol, Vol. 130 (1-2): pp. 687-700
139. Mitrović D., Smiljković Ž., Dojčinović B., Đoković N., & Jovančićević B., 2019: Determination of heavy metal content by ICP-OES in soil from special nature preserve (Suva Mountain), 20th European Meeting on Environmental Chemistry, 1P19, p. 115
140. Neukum C. & Hötzl H., 2005: Standardisation of vulnerability map, Proceedings of International Conference "Water Resources and Environmental Problems in Karst – KARST 2005", (Stevanović Z and Milanović P (eds.)), Beograd-Kotor, pp. 11-19
141. Nikolić R., 1913: Sumnjivi glečerski tragovi na Suvoj planini, Glasnik Srpskog Geografskog Društva, II, knj. 2, pp. 298-304

142. Palmer A.N., 2003: Growth and modification of epikarst, Karst Water Institute Special Publication 9, pp. 56-61, Charles Town
143. Parise M., Gabrovšek F., Kaufmann G., Ravbar N., (eds), 2018: Advances in Karst Research: Theory, Fieldwork and Applications, Geological Society, London, Special Publication 466, p. 783
144. Perrin J., 2003: A conceptual model of flow and transport in a karst aquifer based on spatial and temporal variations of natural tracers, PhD thesis presented to the Faculty of Sciences of the University of Neuchâtel, p. 227
145. Perrin J., Jeannin P-Y., Zwahlen F., 2003a: Epikarst storage in a karst aquifer: A conceptual model based on isotopic data, Milandre test site, Switzerland, Journal of Hydrology, Vol. 279, Issue 1-4, pp. 106-124
146. Perrin J., Jeannin P., Zwahlen F., 2003b: Implications of the spatial variability of infiltration-water chemistry for the investigation of a karst aquifer: A field study at Milandre test site, Swiss Jura, Hydrogeology Journal, Springer-Verlag, vol. 11, Issue 6, pp. 673-686, Berlin
147. Perrin J. & Kopp L., 2005: Hétérogénéité des écoulements dans la zone non saturée d'un aquifère karstique (site de Milandre, Jura suisse), Bulletin d'Hydrogéologie, Issue 21, pp. 33-58
148. Perunović T., Stojanović K., Kašanin-Grubin M., Šajnović A., Simić V., Jovančićević B., Brčeski I. 2015: Geochemical investigation as a tool in determining of the potential hazard for soil contamination (Kremna Basin, Serbia). Journal of the Serbian Chemical Society 80, pp. 278-285
149. Petković K.V., 1930: Geološki sastav i tektonski sklop Suve planine, Posebna izdanja Srpske kraljevske akademije, knj. 76, Prirodnjački i matematički spisi, knj. 21, p. 136
150. Petrović B. et al, 1973: OGK SFR Jugoslavije, list Vlasotince K 34-45 tumač i karta, R=1:100.000, Savezni geološki zavod (SGZ), Beograd, p. 76
151. Petrović B., 2005: Ugroženost od zagađivanja i mere zaštite karstnog izvorišta "Nemanja" kod Čuprije, Diplomski rad, Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu
152. Petrović B., 2014a: Osnovne karakteristike izdanskog toka karstnih voda Svrljiških planina i Suve planine, Zbornik radova XVI kongresa geologa Srbije „Optimalno istraživanje i održivo korišćenje geoloških resursa“, Donji Milanovac, ISBN: 978-86-86053-14-5, pp. 340-346
153. Petrović B., 2014b: Preliminary characterization of the karst groundwater flow of Suva Planina Mountain (Eastern Serbia), Proceedings of the DIKTAS Conference: "Karst without boundaries", Trebinje and Dubrovnik, (eds. Kukurić N, Stevanović Z, Krešić N (eds)), ISBN: 978-99938-52-58-2, pp. 230-236
154. Petrović B., 2016: Karta ranjivosti karstne izdani Suve planine, Seminarski rad iz predmeta „Specijalna poglavlja iz hidrogeologije životne sredine“, Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu
155. Petrović B., 2020: Intrinsic groundwater vulnerability assessment by multiparameter methods, a case study of Suva Planina Mountain (SE Serbia). *Environ Earth Sci* 79, 85.
156. Petrović B., Marinović V., Stevanović Z., Milanović S., & Vasić Lj., 2017: EPIK Intrinsic Groundwater Vulnerability Assessment and Statistical Sensitivity Analysis: Case Studies from Serbian Karst, Book of Abstracts 44th Annual Congress of the International Association of Hydrogeologist (IAH) "Groundwater Heritage and Sustainability", Dubrovnik, Croatia, pp. 312
157. Petrović B. & Marinović V., 2018: Analysis of discharge conditions of Mokra and Divljana karst springs (SE Serbia); In: Review of the Bulgarian Geological Society, vol. 79, part 3; National Conference with international participation "GEOSCIENCES 2018", Bulgarian Geological Society, Sofia, Bulgaria, p. 147 – 148

158. Petrović B. & Marinović V., 2019a: Analysis of hydraulic conditions of the selected karst springs of Inner Dinarides and Carpatho-Balkanides of Serbia; In: Proceedings of IAH2019, the 46th Annual Congress of the IAH: „Groundwater Management and Governance: Coping with Uncertainty“, AIH-GE, Málaga, pp. 552
159. Petrović B. & Marinović V., 2019b: Groundwater turbidity dynamics in karst hydrogeological system. Case study: Suva planina Mt., SE Serbia, Proceedings of 4th Conference of IAH CEG "Toward sustainable management of groundwater resources" and Guide of Geotrip of the IAH karst commission, Belgrade, pp. 127
160. Petrović B., & Marinović V., 2019c: Revalorizacija zona sanitarne zaštite karstnih izvorišta Mokra i Divljana primenom GIS okruženja, Knjiga apstrakata 9. Simpozijuma o zaštiti karsta, Akademski speleološko – alpinistički klub (ASAK), Beograd, 1 - 3 novembar 2019. godine, pp. 28
161. Petrović J., 1953: Izvori, vrela i tresave u Belopalanačkoj kotlini, Glasnik srpskog geografskog društva, sv. XXXIII, br. 1, pp. 2-30
162. Petrović J., 1958: Kraška vrela Suve planine i njihov značaj, Zbornik radova Geografskog instituta PMF, sv. 5, Beograd, pp. 45-60
163. Petrović J., 1974: Krš istočne Srbije, Posebna izdanja Srpskog geografskog društva, sv. 40, Srpsko geografsko društvo, p. 96
164. Petrović J., 1976: Jame i pećine SR Srbije, Vojnoizdavački zavod, Beograd, p. 512
165. Pipan T. & Culver D.C., 2013: Forty years of epikarst: what biology have we learned?, International Journal of Speleology, 42 (3), pp. 215-223, Tampa, FL-USA
166. Polomčić D., Stevanović Z., Bajić D., Hajdin B., Ristić Vakanjac V., Dokmanović P., Milanović S., 2012: Vodosnabdevanje i održivo upravljanje podzemnim vodnim resursima u Srbiji, Vodoprivreda 44, br. 4-6, pp. 225-231
167. Price D.G. & Knill J., 2009: Ground Response to Engineering and Natural Processes, in: Engineering Geology - Principles and Practice (ed. de Freitas M. H.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 229-246
168. Price D.G. & de Freitas M. H., 2009: Withdrawal of Support by Surface Excavations, in: Engineering Geology - Principles and Practice (ed. de Freitas M. H.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 247-294
169. Rakić M. et al, 1973: OGK SFR Jugoslavije, list Niš K 34-32 tumač i karta, R=1:100.000, Savezni geološki zavod (SGZ), Beograd, p. 49
170. Renault P., 1982: CO₂ atmospherique karstique et speleomorphologie, Revue Belge Geographique, 106, pp. 121-130
171. Reynolds J.M., 2011: An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, 2nd Edition, Wiley-Blackwell, p. 712
172. Ristić V., 2007: Razvoj simulacionog modela za proračun dnevnih isticanja iz karstnih vrela, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, p. 299
173. Shiyi H., Genxing P., Jianhua C., Yuxiang T., Yongzhong T., 2000: Research on characteristics of carbon cycle in epi-karst ecological system, Quaternary Sciences, 04
174. Simon K.S. & Benfield E.F., 2002 - Ammonium retention and whole-stream metabolism in cave streams. Hydrobiologia, 482, pp. 31-39
175. Simon K.S., Pipan T., Culver D.C., 2007: A conceptual model of the flow and distribution of organic carbon in caves, J. Cave Karst Stud. 69, pp. 279-284
176. Simon K.S., Pipan T., Ohno T., Culver D.C., 2010: Spatial and temporal patterns in abundance and character of dissolved organic matter in two karst aquifers. Fundamental and Applied Limnology, 177, pp. 81-92
177. Smart P.L. & Friederich H., 1987: Water movement and storage in the unsaturated zone of a maturely karstified carbonate aquifer, Mendip Hills, England, In: Proceedings of the

- Conference on Environmental Problems of Karst Terrains and their Solutions, National Water Well Association, Dublin, Ohio, pp. 59–87
178. Službeni glasnik Republike Srbije, 2008: Pravilnik o načinu određivanja i održavanja zona sanitarne zaštite objekata za snabdevanje vodom za piće, br. 92/08
 179. Službeni glasnik Republike Srbije, 2010: Zakon o vodama, br. 30/10
 180. Službeni glasnik Republike Srbije, 2012: Prostorni plan područja posebne namene Specijalnog rezervata prirode Suva planina, br. 55/12
 181. Službeni glasnik Republike Srbije, 2015: Uredba o proglašenju Specijalnog rezervata prirode „Suva planina“, br. 72/15
 182. Službeni glasnik Republike Srbije, 2019: Pravilnik o izmenama pravilnika o higijenskoj ispravnosti vode za piće, br. 28/19
 183. Službeni list Savezne Republike Jugoslavije, 1998: Pravilnik o higijenskoj ispravnosti vode za piće, br. 42/98
 184. Službeni list Savezne Republike Jugoslavije, 1999: Pravilnik o higijenskoj ispravnosti vode za piće, br. 44/99
 185. Službeni list Socijalističke Republike Srbije, 1982: Pravilnikom o opasnim materijama u vodama, br. 31/82
 186. Smiljković Ž., 2019: Geohemijska karakterizacija zemljišta sa istočnih obronaka Specijalnog rezervata prirode „Suva planina“, Diplomski rad, Hemijski fakultet, Univerzitet u Beogradu, p. 47
 187. Smith D.I. & Atkinson T.C., 1976: Process, landforms and climate in limestone regions, in *Geomorphology and Climate* (ed. E. Derbyshire), John Wiley & Sons, Chichester, pp. 369–409
 188. Sparks D., 1995: *Environmental Soil Chemistry*, Academic Press, Elsevier, p. 267
 189. Stevanović Z., 1981: Mogućnosti iskorišćavanja podzemnih voda za vodosnabdevanje u SR Srbiji, *Naučni pregled* 10-11, str. 111-118
 190. Stevanović Z., 1986: Pojave bakterioloških zagađenja i uslovi zaštite karstnih izdanskih voda na primerima iz SR Srbije, XI Kongres geologa Jugoslavije, Knj. 5 „Hidrogeologija, inženjerska geologija, geotermalna energija“, SGD-SITS, Tara
 191. Stevanović Z., 1987: Kvalitet karstnih izdanskih voda u funkciji režima izdašnosti i položaja kote isticanja, *Naš krš, Sarajevo XIII* (22), pp. 39–45
 192. Stevanović Z., 1988: Kvalitet karstnih izdanskih voda istočne Srbije, *Zbornik Odbora za kras i speleologiju SANU*, br. III, Pos. izd., knjiga DLXXXIX, Odelj. Prir.-mat. nauka, knj. 63, str. 65-86
 193. Stevanović Z., 1991: Hidrogeologija karsta Karpato-Balkanida istočne Srbije i mogućnosti vodosnabdevanja, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, p. 245
 194. Stevanović Z., 1992: Opšti uslovi i stanje zaštite karstnih izdanskih voda u istočnoj Srbiji, *Zbornik radova I Simpozijuma o zaštiti karsta, ASAK*, str. 75-80
 195. Stevanović Z., 1994: Karst groundwaters of Carpatho-Balkanides in Eastern Serbia, in: *Groundwaters in Carbonate Rocks of the Carpatho-Balkan Mountain Range* (Stevanović Z. & Filipović B. (eds.)), Carpathian-Balkan Geological Association, Belgrade, pp. 203-237
 196. Stevanović Z., 1995: Karstne izdanske vode Srbije – korišćenje i potencijal za regionalno vodosnabdevanje, u: *Vodni mineralni resursi litosfere Srbije* (ed. Z. Stevanović), Pos. izd. RGF/IHG, Beograd, str. 77-120
 197. Stevanović Z., 2009: Karst groundwater use in the Carpathian–Balkan region. In: *Global groundwater resources and management* (Paliwal B. (ed.)), Scientific Publishers, Jodhpur, pp. 429–442
 198. Stevanović Z., 2010: Utilization and regulation of springs. In: *Groundwater hydrology of springs: engineering, theory, management and sustainability* (Krešić N., Stevanović Z. (eds.)), Elsevier, Amsterdam, pp 341–389

199. Stevanović Z. (ed.), 2015: Karst Aquifer – Characterization and Engineering, Series: Professional Practice in Earth Sciences, Springer
200. Stevanović Z., 2015a: Karst Environment and Phenomena, in Karst Aquifer – Characterization and Engineering (Stevanović Z. (ed.)), Springer, pp. 19-46
201. Stevanović Z., 2015b: Characterization of Karst Aquifer, in: Karst Aquifer – Characterization and Engineering (Stevanović Z. (ed.)), Springer, pp. 47-125
202. Stevanović Z., 2018: Global distribution and use of water from karst aquifers, In: Advances in Karst Research: Theory, Fieldwork and Applications (Parise M, Gabrovsek F, Kaufmann G & Ravbar N, eds.), Geological Society, London, Special Publications, 466, pp. 217-236, ISBN 978-1-78620-359-5, <https://doi.org/10.1144/SP466.17>
203. Stevanović Z., 2019a: Vodosnabdevanje podzemnim vodama, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, p. 329
204. Stevanović Z., 2019b: Karst waters in potable water supply: a global scale overview. Environmental Earth Science. 78: 662; <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8670-9>
205. Stevanović Z. & Filipović B., 1994: Hydrogeology of carbonate rocks of Carpatho-Balkanides, in: Groundwaters in Carbonate Rocks of the Carpatho-Balkan Mountain Range (Stevanović Z. & Filipović B. (eds.)), Carpathian-Balkan Geological Association, Belgrade, pp. 35-113
206. Stevanović Z. & Papić P., 2008: The origin of groundwater. In: Groundwater management in large river basins (Dimkić M, Brauch HJ, Kavanaugh M. (eds.)), IWA Publishing, London, pp. 218–246
207. Stevanović Z., Ristić Vakanjac V., Milanović S., Vasić Lj., Petrović B., 2011: Značaj monitoringa podzemnih voda u karstu Srbije, Zbornik 7. Simpozijuma o zaštiti karsta, ASAK, Bela Palanka, pp. 35-42
208. 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
209. Stevanović Z. & Milanović S., 2017: Metode hidrogeoloških istraživanja, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, p. 552
210. Šušterčič F., 1999: Vertical zonation of the speleogenetic space, Acta Carsologica 28/2, Ljubljana, pp. 187-201
211. Trček, B., 2003: Epikarst zone and karst aquifer behaviour – A case study of the Hubelj catchment, Slovenia, Geološki zavod Slovenije, Ljubljana, p. 100
212. Trček B. & Krothe N., 2004: Oxygen isotope studies of major karst springs on the Mitchell plain (USA) and the Trnovski Gozd karst plateau (Slovenia), in: Epikarst (Jones, W., Culver, D. & J. Herman Eds.), Karst Waters Institute Special Publication 9, pp. 92–98, Charles Town
213. Tooth A.F. & Fairchild I.J., 2003: Soil and karst aquifer hydrologic controls on the geochemical evolution of speleothem-forming drip waters, Crag Cave, southwest Ireland, Journal of Hydrology, Vol. 273, Issues 1–4, pp. 51–68
214. US EPA, 1992: APHA Standard Methods #2510
215. Vasić Lj., 2017: Geneza i uslovi cirkulacije voda kompleksnih karstnih sistema Kučajsko-beljaničkog masiva, RGF, UB, doktorska disertacija, p. 393
216. Vasić Lj., Milanović S., Petrović B., Stevanović Z., 2013: Uticaj cirkulacije podzemnih voda u karstu na pojavu bakteriološkog zagađenja, Vodoprivreda, 45, str. 219-229, Beograd
217. Vasić Lj., Stevanović Z., Milanović S., Petrović B., 2015: Attenuation of bacteriological contaminants in karstic siphons and relative barrier purifiers: case examples from Carpathian Karst in Serbia. In: Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems (Andreo B., Carrasco F., Durán J., Jiménez P., LaMoreaux J. (eds)), Environmental Earth Sciences, Vol 1. Springer, Berlin, Heidelberg

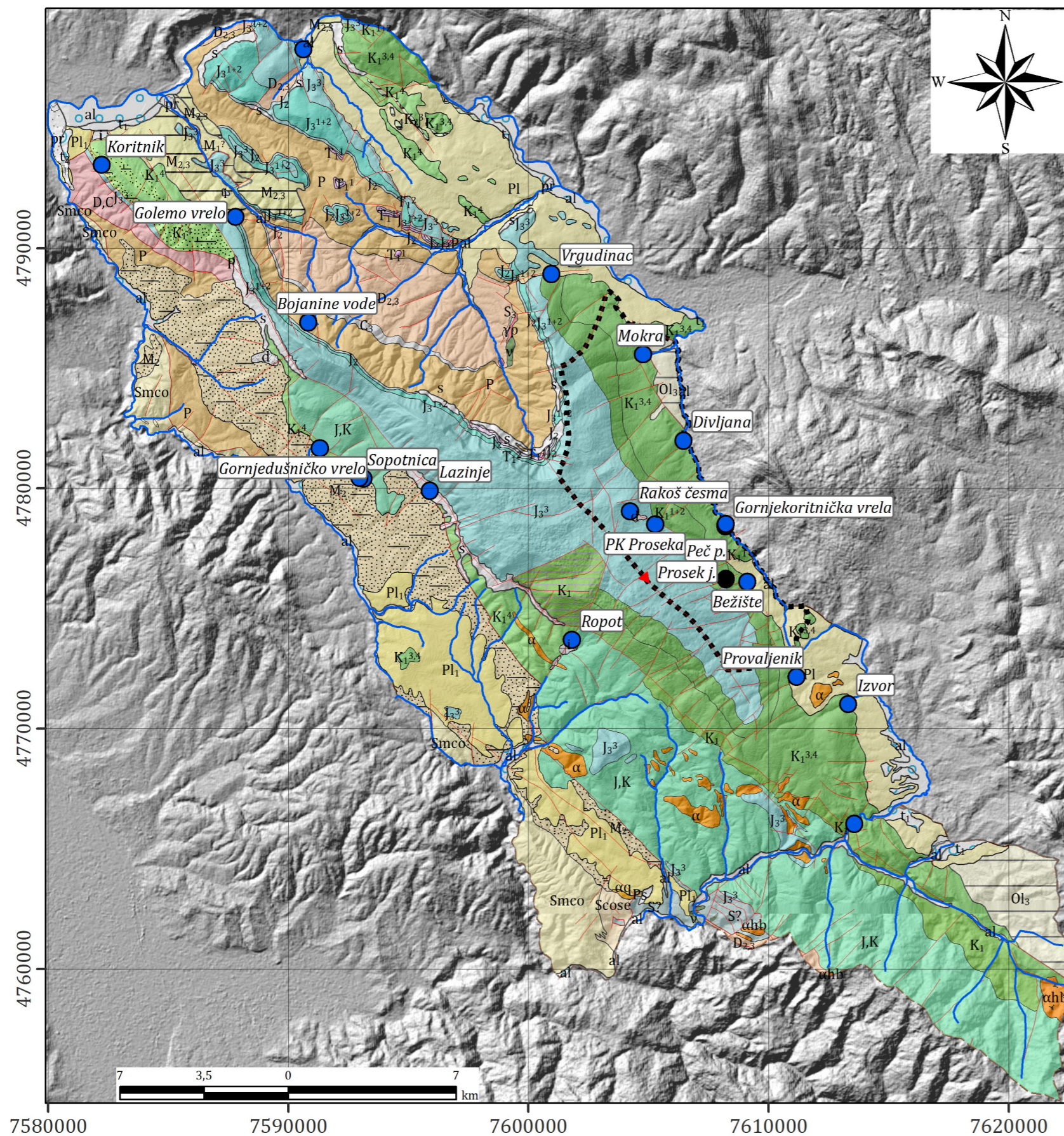
218. Vasić Lj., Palcsu L., Fen H., 2019: Groundwater gravitational circulation of Karst Veliko Vrelo and Malo Vrelo springs by isotope and the noble gas method: case study of the Beljanica Massif. *Environmental Earth Science*, Vol. 78, Article No: 307, <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8294-0>
219. Vasić Lj., Milanović S., Stevanović Z., Palcsu L., 2020: Definition of groundwater genesis and circulation conditions of the complex hydrogeological karst system Mlava–Belosavac–Belosavac-2 (eastern Serbia). *Carbonates Evaporites*, Vol. 35, Article No: 16, <https://doi.org/10.1007/s13146-020-00550-3>
220. Veselinović D., Gržetić I., Đarmati Š., Marković D., 2005: Fizičko-hemijske osnove zaštite životne sredine - knjiga 1: Stanja i procesi u životnoj sredini, Fakultet za fizičku hemiju Beograd, p. 496
221. Vías J.M., Andreo B., Perles M.J., Carrasco F., Vadillo I., Jiménez P., 2006: Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method, *Hydrogeology Journal*, Vol. 14, Issue: 6, pp. 912–925
222. Vouillamoz J.M., Legchenko A., Albouy Y., Bakalowicz M., Baltassat J.M., Al-Fares W., 2003: Localization of saturated karst aquifer with magnetic resonance sounding and resistivity imagery, *Ground Water*, Vol. 41, No. 5, pp. 578-586
223. Vrba J. & Zaporožec A., 1994: Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability, *International Contributions to Hydrogeology, IAH*, Vol. 16, p. 131, Hannover
224. Vujisić T. et al, 1971: OGK SFR Jugoslavije, list Bela Palanka K 34-33 tumač i karta, R=1:100.000, Savezni geološki zavod (SGZ), Beograd, p. 69
225. Vukićević M., Pajčić T., Kostić S., Kundačina D., 2010a: Elaborat o rezervama podzemnih voda kaptiranog vrela Mokra kod Bele Palanke, *Geofizika-Ing*, Beograd, p. 37
226. Vukićević M., Pajčić T., Kostić S., Kundačina D., 2010b: Elaborat o rezervama podzemnih voda kaptiranog vrela Divljana kod Bele Palanke, *Geofizika-Ing*, Beograd, p. 38
227. Worthington S.R.H., Ford, D.C., Beddows, P.A., 2000: Porosity and permeability enhancement in unconfined carbonate aquifers as a result of solution, In: *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers* (Klimchouk A., Ford D., Palmer A. and Dreybrodt W. (eds.)), National Speleological Society of America, Huntsville, AL, 200-203
228. Worthington S.R.H., Smart C.C., Ruland W., 2001: Karst hydrogeological investigations at Walkerton, Report, p. 67
229. Worthington S.R.H., Smart C.C., Ruland W., 2002: Assessment of Groundwater Velocities to the Municipal Wells at Walkerton, in: *Ground and Water: Theory to Practice - Proceedings of the 55th Canadian Geotechnical and 3rd Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conferences* (Edited by D. Stolle, A.R. Piggott and J.J. Crowder), Niagara Falls, Canada, pp. 1081-1086
230. Worthington S.R.H., 2011: Management of Carbonate Aquifers, In: van Beynen P. (eds) *Karst Management*, Springer, Dordrecht, pp. 243-261
231. Williams P.W., 1983: The role of the subcutaneous zone in karst hydrology, *Journal of Hydrology*, 61, pp. 45-67
232. Williams P.W., 1985: Subcutaneous hydrology and the development of doline and cockpit karst. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 29(4), pp. 463–482
233. Williams P.W., 2004: The epikarst: evolution of understanding, in: Jones, W.K., Culver, D.C. & Herman, J.S. (Eds.) – *Epikarst*. Charles Town, WV: Karst Waters Institute, Special Publication 9: 11-22.
234. Williams P.W., 2008: The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review, *International Journal of Speleology*, 37 (1), Bologna, pp. 1-10
235. Williams P.W., Fowler A., 2002: Relationship between oxygen isotopes in rainfall, cave percolation waters and speleothem calcite at Waitomo, New Zealand, *Journal of hydrology*, New Zealand Hydrological Society, vol. 41, No 1, Christchurch, New Zealand, pp. 53-70

236. Won-In K. & Charusiri P. 2003: Enhancement of thematic mapper satellite images for geological mapping of the Cho Dien area, Northern Vietnam, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 4, Number 3, pp. 183-193
237. Xiong Y.J., Qiu G.Y., Mo D.K., Lin H., Sun H., Wang Q.X., Zhao S.H. & Yin J., 2009: Rocky desertification and its causes in karst areas: a case study in Yongshun County, Hunan Province, China, *Environ Geol* 57, pp. 1481–1488
238. Zhang J.Y., Dai M. H., Wang L.C., Zeng C.F., Su W. C., 2016: The challenge and future of rocky desertification control in karst areas in southwest China, *Solid Earth*, 7, pp. 83-91
239. Zini L., Calligaris C., Zavagno E., 2014: Classical Karst hydrodynamics: a shared aquifer within Italy and Slovenia, *Evolving Water Resources Systems: Understanding, Predicting and Managing Water–Society Interactions Proceedings of ICWRS2014*, Bologna, (IAHS Publ. 364), pp. 499-504
240. Zwahlen F., 2004: Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, COST Action 620, Office for Official Publications of the European Communities, p. 297, Luxembourg
241. Živanović V., 2011: Ocena ranjivosti podzemnih voda od zagađenja na primerima karsta Srbije, Magistraska teza, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, p. 215
242. Živanović V., 2016: Razvoj metodologije zaštite izvorišta podzemnih voda primenom karata ranjivosti, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, p. 258
243. Žujović J., 1889: Osnovi za geologiju Kraljevine Srbije, *Annales géologiques de la Peninsule balkanique*, Kraljevsko-srpska državna štamparija, Beograd, p. 130
244. Žujović J., 1893: Sur les terrains sédimentaires de la Serbie, Paris

WEB literaturni izvori i uputstva

245. <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/product/imagery/band-combinations-for-landsat-8/> prvi put posećeno: 10.4.2018. godine
246. <https://gisgeography.com/landsat-8-bands-combinations> prvi put posećeno: 13.4.2018. godine
247. <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/convolution-function.htm> prvi put posećeno: 15.5.2018. godine
248. <http://www.meteomanz.com/> prvi put posećeno: 19.11.2018. godine
249. <https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Geograf208> posećeno: 15.5.2019. godine
250. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Suva_planina_16.jpg posećeno: 15.5.2019. godine
251. http://www.seismo.gov.rs/Seizmicnost/Karte_hazarda_1.htm posećeno: 4.3.2019. godine
252. <http://mrsbioblog.blogspot.rs/2014/02/chapter-43-cycling-of-matter.html> prvi put posećeno: 15.5.2015. godine

V GRAFIČKI PRILOZI



Legenda

- s sipar
- oal aluvijum
- pr proluvijum
- d deluvijum
- i izvorski sedimenti
- t₁ rečna terasa
- t₂ rečna terasa
- Pl peskovi, šljunkovi, laporci, gline
- Pl₁ šljunkovi, peskovi, gline sa ugljem
- M_{2,3} gline sa ugljem, peskovi i šljunkovi
- α amfibolski andeziti
- M₂ peskovi, gline, šljunkovi, konglomerati
- aq hornblenda biotitski andeziti
- ahb amfibol biotit andeziti
- M₁? laporci, peščari, glinci, ugalj, krečnjaci
- Ol₃ alevroliti, laporci, glinci, peščari, konglomerati
- K₂ rudistni krečnjaci
- K₁⁴ konglomerati, peščari, alevroliti, krečnjaci
- K₁⁴ peščari, laporci; krečnjaci
- K₁^{3,4} krečnjaci i dolomiti, laporoviti krečnjaci

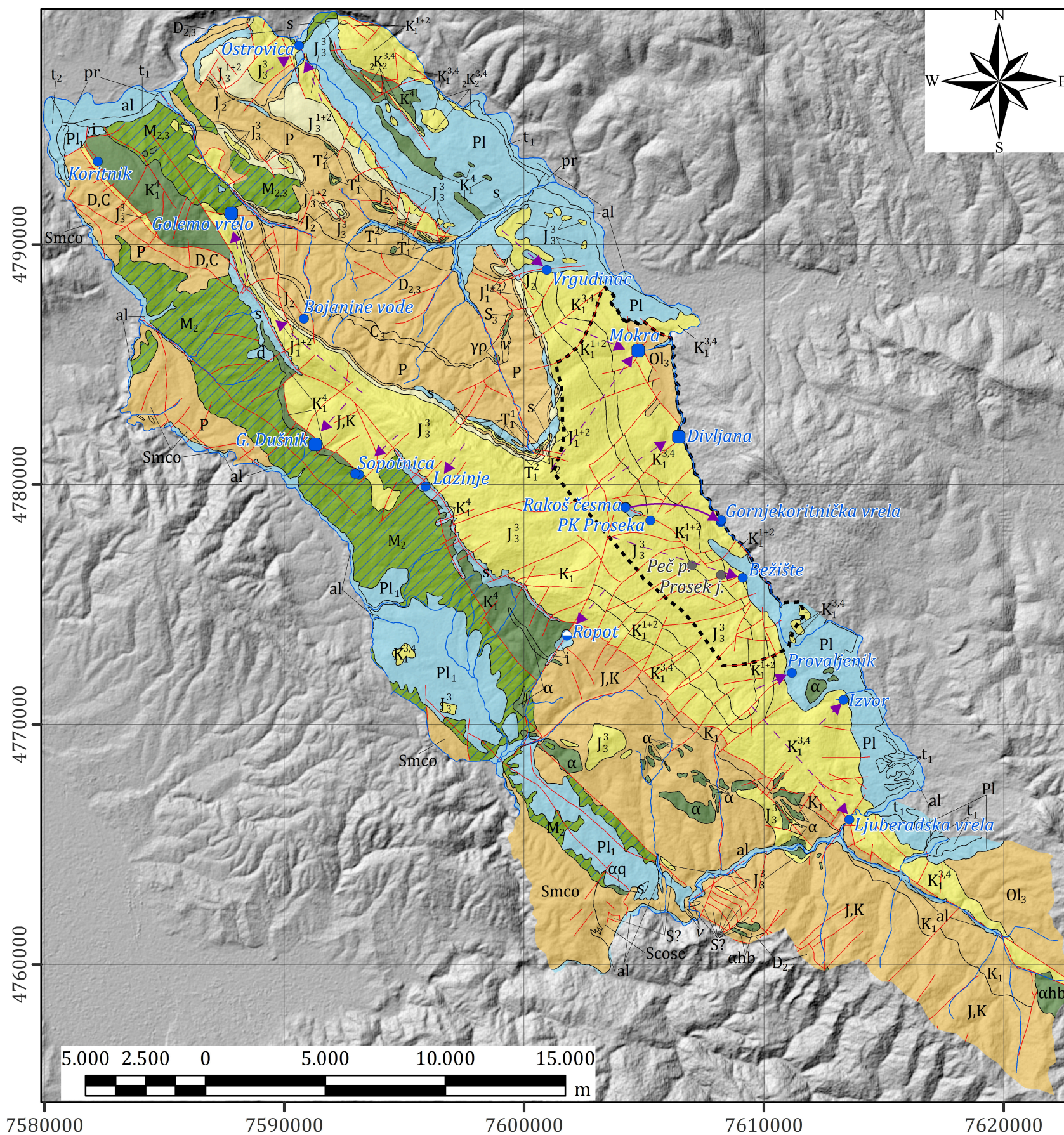
- K₁¹⁺² krečnjaci, dolomiti, peščari, laporci
- K₁ bankoviti krečnjaci i dolomiti
- K₁ laporci i glinci
- J,K karbonatno-klastični fliš
- J,K bankoviti i slojeviti krečnjaci i dolomiti
- J₃³ bankoviti i slojeviti krečnjaci i dolomiti
- J₃¹⁺² dolomiti, dolomitični krečnjaci sa rožnacima
- J₂ krečnjaci i peščari
- T₁² peskoviti i laporoviti krečnjaci, peščari
- T₁¹ konglomerati i grubozrni peščari
- P konglomerati, peščari, alevroliti
- C₃ peščari, glinci, konglomerati
- γp plagiograniti
- D,C peščari, filiti, hloritski škriljci
- D_{2,3} fliš; peščari; grauvake; krečnjaci
- S₃ krečnjaci
- S? metapeščari, glinci, škriljci, krečnjaci
- v metamorfisani gabrovi
- Scose hlorit-sericitski škriljci
- Smco muskovit-albit-hlorit kvarcni škriljci

Legenda standardnih oznaka

- rased: pretpostavljen, utvrđen
- geološka granica: pretpostavljena, utvrđena
- ▶ osa tonuće antiklinale

- Uža zona istraživanja

Karta je izrađena prema
 OGK SFR Jugoslavije list Bela Palanka K 34-33, SGZ (1971)
 OGK SFR Jugoslavije list Niš K 34-32, SGZ (1973)
 OGK SFR Jugoslavije list Vlasotince K 34-45, SGZ (1973)



Legenda

Hidrogeološke oznake

- Karstna izdan, veće izdašnosti
- Karstna izdan, manje izdašnosti
- Intergranularna izdan
- Pukotinska izdan
- Složena izdan
- Uslovno bezvodni delovi terena
- Utvrđen pravac kretanja podzemnih voda
- Pretpostavljeni pravac kretanja podzemnih voda

Hidrogeološke pojave

- Karstno vrelo, kaprtirano
- Karstno vrelo/izvor, nekaptirano
- Povremeno karstno vrelo

Geomorfološke pojave

- Pećina ili jama
- Uža zona istraživanja

Na hidrogeološkoj karti su prikazane pojave i objekti osmatrani za potrebe izrade disertacije. Legenda strukturnih i litoloških oznaka data je uz geološku kartu - Prilog 1

BIOGRAFIJA AUTORA

Branislav Z. Petrović, rođen je 27.3.1981. godine u Kragujevcu. Drugu kragujevačku gimnaziju, opšteg smera, završio je 2000. godine. Smer za Hidrogeologiju i osnovne studije, na Rudarsko-geološkom fakultetu završava 2005. godine sa prosečnom ocenom 9,50 i ocenom 10 na diplomskom ispitu. Oktobra 2011. godine upisao je doktorske akademske studije na Rudarsko-geološkom fakultetu u Beogradu, naučna oblast Hidrogeologija, i kao užu specijalnost odabrao izučavanje hidrogeologije karsta.

Autor i koautor je 7 naučnih radova objavljenih u časopisima sa SCI liste, od čega je na jednom prvi autor, 5 objavljenih radova u domaćim časopisima, kao i preko dvadeset saopštenja sa naučnih međunarodnih skupova i skupova od nacionalnog značaja.

Stručno i naučno usavršavanje sprovodio je u okviru kurseva: 1. Međunarodna škola karsta (2007, 2008 i 2009), Postojna, Slovenija; 2. Water Supply in a Changing Environment, na projektu „Climate change and impact on water supply – CC-WaterS“, Solun, Grčka (2011); 3. Međunarodni trening kurs „Introduction to GIS“, Beograd, Srbija (2013); 4. Problems and Solutions in Numeric Modeling of Karst Aquifers, Trebinje, Bosna i Hercegovina (2013); 5. VII IRCK International Training Course on Karst Landscape, Geopark, Natural Heritage, Environmental Geology Mapping and Data Mining, Nanning, Kina.

Učestvovao je u organizaciji međunarodnih konferencija: 1. „Karst 2005 - Water Resources and Environmental Problems in Karst“ (2005); 2. „Karst without Boundaries“ (2014); 3. „KARST 2018 – Expect the Unexpected“ (2018), kao tehnički sekretar; i 4. Međunarodnog kursa „Characterization and Engineering of Karst Aquifers – CEKA“

Kao saradnik u nastavi bio je angažovan na predmetima „Metode hidrogeoloških istraživanja“, „Vodosnabdevanje podzemnim vodama“, „Karakterizacija i inženjering karstnih izdani“, „Istražno bušenje“ i „Izrada bunara“.

Svoje istraživačke aktivnosti doktrand ostvaruje kao istraživač saradnik na Departmanu za hidrogeologiju, Rudarsko-geološkog fakulteta i član Centra za hidrogeologiju karsta (CKH). Član je Srpskog geološkog društva (SGD) i Međunarodne asocijacije hidrogeologa (IAH).

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Бранислав Петровић

Број индекса Г 812/11

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Функционисање и утицај епикарста на режим, биланс и квалитет подземних вода
источног дела карстног система Суве планине

- 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, 26.6.2020. године

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Бранислав Петровић

Број индекса Г 812/11

Студијски програм Хидрогеологија

Функционисање и утицај епикарста на режим, биланс и
Наслов рада квалитет подземних вода источног дела карстног система Суве планине

Ментор проф. др Зоран Стевановић и др Саша Милановић, доцент

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања 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, 26.6.2020. године

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Функционисање и утицај епикарста на режим, биланс и квалитет подземних вода источног дела карстног система Суве планине

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, 26.6.2020. 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.