

UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Tanja M. Petrović Pantić

**HIDROGEOTERMALNI RESURSI
SRPSKOG KRISTALASTOG JEZGRA**

doktorska disertacija

Beograd, 2014.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Tanja M. Petrović Pantić

**HYDROGEO THERMAL RESOURCES OF
SERBIAN CRYSTALLINE CORE**

Doctoral Dissertation

Beograd, 2014.

Mentor:

Dr Petar Papić, redovni profesor,
naučna oblast: hidrogeoeкологија
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Članovi komisije:

Dr Veselin Dragišić, redovni profesor
naučna oblast: vodosnabdevanje i menadžment podzemnih voda
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Prof. dr Olivera Krunić, redovni profesor
naučna oblast: hidrogeoeкологија
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Prof. dr Vladica Cvetković, redovni profesor
naučna oblast: petrologija
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Prof. dr Zoran Nikić, redovni profesor
naučna oblast: vodosnabdevanje i menadžment podzemnih voda
Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet

Datum odbrane: _____

Disertaciju posvećujem sinu Matiji,
mojoj najvećoj inspiraciji

Zahvalnica

Ovom prilikom zahvaljujem se Prof. dr Petru Papiću, kao i članovima komisije Prof. dr Veselinu Dragišiću, Prof. dr Oliveri Krunic, Prof. dr Vladići Cvetkoviću i Prof. dr Zoranu Nikiću na stručnim savetima, korisnim sugestijama i podršci u radu.

Posebnu zahvalnost dugujem preminuloj kolegini mr Mileni Zlokolici-Mandić na neizmernoj pomoći, podršci, strpljenju, savetima i na značajnom uticaju na moje stručno usavršavanje.

Zahvaljujem se kolegama iz Geološkog zavoda Srbije i sa Rudarsko-geološkog fakulteta na stručnim savetima, literaturi i dokumentaciji, posebno hvala Žarku Veljkoviću, Maji Prodanović, Vladimiru Živanoviću, Savi Magazinoviću i Marini Magazinović.

Za realizaciju hemijskih i izotopskih analiza zahvaljujem se dr Alecosu Demetriades-u i dr Manfredu Birke-u, kao i analitičarima u laboratoriji BGR u Berlinu i u laboratoriji Technical University in Dresden.

Za analize tricijuma, radioaktivnosti, ^{222}Rn i ^{226}Ra hvala dr Jovani Nikolov i kolegama sa Departmana za fiziku, Prirodno-matematičkog fakulteta, Univerziteta u Novom Sadu.

Mojim roditeljima, bratu, tetki Zori i bliskim prijateljima beskonačno hvala na podršci koju su mi pružali svih ovih godina i bez kojih kojih ne bih uspela da ostvarim sve uspehe u životu.

I neizmerno hvala suprugu Relji, za svu pruženu pomoć, nesebičnu podršku, ljubav i razumevanje.

HIDROGEOTERMALNI RESURSI SRPSKOG KRISTALASTOG JEZGRA

Rezime

U radu su proučavani hidrogeotermalni resursi na području hidrogeološkog rejlona Srpsko kristalasto jezgro. Podlogu istraživanja čine podaci ranijih geoloških, hidrogeoloških i geofizičkih istraživanja, dok su za potrebe ove disertacije urađene nove detaljne hemijske analize voda (terenski su određeni pH i elektroprovodljivost Ep, laboratorijski je određeno 69 elemenata), izotopske analize ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ i $\delta^3\text{H}$) i određena je radioaktivnost voda (alfa, beta, ^{222}Rn i ^{226}Ra).

Na osnovu ovih podataka definisani su: tip i svojstva voda, zona prihranjivanja, dubina zaleganja podzemnih voda, maksimalna očekivana temperatura rezervoara, zasićenje vode mineralima, korozivna i inkrustrativna svojstva vode, radiogena toplota, geotermalni gradijenti, geotermalni potencijal, proračunato je trenutno i potencijalno korišćenje geotermalne energije, i definisani su hidrogeotermalni sistemi Srpskog kristalastog jezgra.

Srpsko kristalasto jezgo je sačinjeno od kristalastih škriljaca koji su probijeni paleozojskim (bujanovački) do tercijskim granitoidima (surdulički, jastrebački) i andezitima (lečki andezitski masiv). U okviru ovog hidrogeološkog rejlona nalaze se značajnije pojave termalnih voda u Srbiji, pa su i lokaliteti na kojima se ove vode pojavljuju dobili status banja: Prolom Banja, Ribarska Banja, Sijarinska Banja, Vranjska Banja i Bujanovačka Banja, dok su pojave termalnih voda registrovane i na području sela Viča i sela Tulare. Hidrogeotermalne sisteme Srpskog kristalastog jezgra karakteriše konvektivno strujanje podzemne vode. Ukupno procenjene količine hidrogeotermalnih resursa, odnosno termalnih voda iznose 186 l/s.

Hemijske analize obuhvatile su 20 uzoraka voda, sa temperaturama u rasponu od 13 do 106°C. U Vranjskoj Banji su zabeležene najviše temperature podzemnih voda od 106°C

(termokarotaznim merenjima 126°C), na celom području Srbije. Analizirane vode su neutralne do alkalne, mineralizacije od 130 do 3822 mg/l. Po hemijskom sastavu vode su pretežno HCO₃-Na, dok se u pojedinim vodama javljaju i značajnije količine SO₄. Sadržaj F, B, Rb i SiO₂ je povišen na celom području, dok se u pojedinim vodama javljaju i povišene vrednosti sledećih elemenata: As, Be, Cs, Ga, Ge, Li, V i W. Svi elementi koji se javljaju u vodama su posledica interakcije između vode i stena kroz koje cirkulišu.

Vrednosti stabilnih izotopa ($\delta^{18}\text{O}$ od -8,07 do -11,14; $\delta^2\text{H}$ od -73,89 do -82,76) ukazuju da se termalne vode prihranjuju na okolnim masivima (jastrebačkom, surduličkom, leckom, bujanovačkom), izuzev voda u Viči i Tularu koje se prihranjuju na nižim nadmorskim visinama. Vrednosti ^3H su niže od 17,8 T.U.

Na osnovu silicijumskih geotermometara procenjene temperature u rezervoaru Srpskog kristalastog jezgra su od 45°C (u Prolom Banji) do 140°C (Vranjska Banja).

Dubina rezervoara, odnosno dubina cirkulacije termalnih voda od 1 km (Prolom Banja) do 2,3 km (Sijarinska Banja).

Indeks zasićenja određen je pomoću programa WATCH (Arnorsson and Bjarnason, 1993). Zasićenje kalcitom (SI>1) prisutno je u svim bušotinama Vranjske Banje, Bujanovačke Banje, Sijarinske Banje, bušotini u Viči i bušotini u Tularu i manifestuje se stvaranjem naslaga CaCO₃. Odnosno, inkrustrativna svojstva nemaju samo alkalne vode Prolom i Ribarske Banje, ali se u ovim vodama može očekivati manja korozija na instalacijama i cevima.

U cilju procene geotermalne potencijalnosti stena kao izvora toplote, izračunata je radiogena toplota, čime je najniža vrednost utvrđena u vulkanitima leckog masiva (1,97 $\mu\text{W}/\text{m}^3$), dok je najviša vrednost utvrđena u granitoidima i vulkanitima surduličkog masiva (3,19 $\mu\text{W}/\text{m}^3$), odnosno granitoidima i vulkanitima Besne kobile (3,44 $\mu\text{W}/\text{m}^3$).

Na geotermalnu potencijalnost Srpskog kristalastog jezgra ukazuju vrednosti gustine toplotnog toka koje se se kreću od $136,6 \text{ mW/m}^2$ do $191,5 \text{ mW/m}^2$, sa prosečnom vrednošću od oko $163,8 \text{ mW/m}^2$.

Termalne vode Srpskog kristalastog jezgra uglavnom se koriste u balneološke svrhe, pojedine vode se flaširaju, koriste za vodosnabdevanje i za piće i za zagrevanje banjskih objekata. Ukupno instalisani toplotni kapaciteti, za direktno korišćenje, procenjuju se na 26,86 MWt, pri korišćenju energije od oko 300 TJ/god, pri čemu se u Prolom Banji uz pomoć toplotnih pumpi ostvaruje korišćenje od još 40 TJ/god. Korišćenjem energetskih potencijala hidrogeotermalnih resursa umesto mazuta, sprečava se emisija 6307,5 t CO₂, dok se umesto uglja sprečava emisija 6530,5 t CO₂.

Ključne reči: *hidrogeotermalni resursi, termalne vode, geotermalna energija, geotermalni potencijal, geotermalni sistem, geohemija voda, Srpsko kristalasto jezgro*

Naučna oblast: Geološko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Hidrogeoekologija

UDK broj: 53:55:550.36:551.21/.24:553.065/.78

548:556.114/.3 (497.11)(043.3)

HYDROGEOHERMAL RESOURCES OF SERBIAN CRYSTALLINE CORE

Abstract

The paper considers hydrogeothermal resources on hydrogeology region Serbian crystalline core. Study is based on previously performed geological, hydrogeological and geophysical research, while the detailed chemical analyses of waters (field measurements of pH and Ep, laboratory analyses of 69 elements), isotopic analysis ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ i $\delta^3\text{H}$) and water radioactivity (alfa, beta, ^{222}Rn i ^{226}Ra) present new data used in this study.

Based on this new data, the following parameters have been defined: type and properties of waters, recharge zone, reservoir depths, maximal expected reservoir temperature, mineral saturation of waters, corrosive and scaling properties of waters, radiogenic heat, geothermal gradients and geothermal potential. Current and potential usage of geothermal energy has been calculated, and geothermal systems of Serbian crystalline core have been defined.

Serbian crystalline core consists of crystal schist which are pierced with Paleozoic (bujanovački) to Tertiary (surdulički, jastrebački) granitoids and andesits (lece massif). Within this hydrogeologic region significant occurrences of Serbian thermal waters are present, and the sites themselves are generally referred to as spas: Prolom Banja, Ribarska Banja, Sijarinska Banja, Vranjska Banja and Bujanovačka Banja, as well as the occurrence of thermal waters in the area of the villages Viča and Tulare. All hydrogeothermal systems of Serbian crystalline core are characterized by convective flow of groundwater. Total estimated outflow of hydrogeothermal recourses, respectively thermal waters is 186 l/s.

Chemical analyses have included 20 water samples, with temperatures in the range of 13°C to 106°C. In Vranjska Banja spa highest temperatures of groundwaters in Serbia

have been recorded 106°C on surface (maximum temperature from wireline log 126°C). Analyzed waters are neutral to alkaline, with mineralization of 130-3822 mg/l. The chemical composition of water is mainly HCO₃-Na, while in certain waters significant amount of SO₄ occurs. Concentrations of F, B, Rb i SiO₂ are higher in the entire area, while certain waters have higher values of As, Be, Cs, Ga, Ge, Li, V, W. All elements that have been measured in water samples are the result of interaction between water and reservoir rock.

The values of stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$ od -8.07 do -11.14; $\delta^2\text{H}$ od -73.89 do -82.76) indicate that the spa water have recharge area in the surrounding mountain massifs (jastrebački, surdulički, lecki, bujanovački), except the water of Viča and Tulare being recharged at lower altitudes. ^3H values are lower than the 17.8 T.U.

Based on silica geothermometers, estimated temperatures in the reservoir of Serbian-crystalline core are from 45°C (Prolom Banja Spa) to 146°C (Vranjska Banja Spa). Depth of the reservoir and circulation depth of thermal waters ranges from 1 km (Prolom Banja Spa) to 2.6 km (Sijarinska Banja Spa).

Saturation index has been determined using WATCH (The Iceland Chemistry Group) software. Calcite saturation (SI>1) is present in the wells of Vranjska Banja, Bujanovačka Banja and Sijarinska Banja spa, in the Viča and Tulare wells, and is manifested by deposition of CaCO₃ layers at surface. Scaling properties are present not just in alkaline waters of Prolom Banja and Ribarska Banja spas, but in these waters low level corrosion of surface equipment can be expected.

In order to evaluate the geothermal potentiality of rocks, radiogenic heat has been calculated, giving the lowest value in the volcanic of lecki massif (1.97 $\mu\text{W}/\text{m}^3$), while the highest value has been determined in the granitoid and volcanic massif of Surdulica (Besna Kobilica area, 3.44 $\mu\text{W}/\text{m}^3$).

Geothermal potential of Serbian crystalline core is also indicated by values of heat flow density, ranging between 136.6 mW/m² to 191.5 mW/m², with average value in area of 163.8 mW/m².

Thermal waters of Serbian crystalline core are mostly used in balneotherapy, some of these waters are bottled, and some used for water supply or to heat objects in spa. Total installed thermal capacities, for direct usage, are estimated at 28.86 MWt, with annual usage of energy of 300 TJ. In Prolom Banja spa additional energy of 40 TJ/year is obtained by usage of heat pumps. Usage of energy from geothermal recourses in these spas instead of oil fuel, prevents emission of 6307.5 t of CO₂, and usage instead of coal, prevents emission of 6530,5 t CO₂.

Keywords: *hydrogeothermal resources, thermal water, geothermal energy, geothermal potential, geothermal system, geochemistry of water, Serbian crystalline core*

Scientific field: Geological engineering

Specific scientific field: Hydrogeoecology

UDC number: 53:55:550.36:551.21/.24:553.065/.78

548:556.114/.3 (497.11)(043.3)

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. POSTOJEĆA SITUACIJA EKSPLOATACIJE I KORIŠĆENJA HIDROGEOTERMALNIH RESURSA	8
2.1. Korišćenje hidrogeotermalnih resursa u svetu	9
2.2. Korišćenje hidrogeotermalnih resursa u Srbiji.....	10
3. METODE ISTRAŽIVANJA	13
3.1. Hemijske analize voda.....	16
3.2. Određivanje maksimalnih temperatura u rezervoaru	18
3.2.1. Geotermometri	18
3.2.2. Indeks zasićenja SI	21
3.3. Langelier-ov (LSI) i Ryznar-ov (RSI) indeks.....	22
3.4. Izotopske analize voda.....	24
3.5. Radiometrijske analize stena.....	25
3.6. Geotermalna potencijalnost	26
3.7. Dubina cirkulacije podzemnih voda.....	28
3.8. Korišćenje geotermalne energije.....	28
4. HIDROGEOTERMALNI RESURSI SRPSKOG KRISTALASTOG JEZGRA.....	29
4.1. PROLOM BANJA	30
4.1.1. Opšte karakteristike Prolom Banje.....	30
4.1.2. Geološke karakteristike područja Prolom Banje.....	31
4.1.3. Hidrogeološke karakteristike terena.....	36
4.1.4. Stanje i kapacitet objekata na području Prolom Banje	37
4.2. RIBARSKA BANJA	40
4.2.1 Opšte karakteristike Ribarske Banje	40
4.2.2 Geološke karakteristike područja Ribarske Banje	41
4.2.3 Geofizička istraživanja	46

4.2.4 Hidrogeološke karakteristike terena	48
4.2.5 Stanje i kapacitet objekata na području Ribarske Banje.....	50
4.3. SIJARINSKA BANJA.....	54
4.3.1 Opšte karakteristike Sijarinske Banje.....	54
4.3.2 Geološke karakteristike područja Sijarinske Banje.....	55
4.3.3 Geofizička istraživanja	58
4.3.4 Hidrogeološke karakteristike terena	60
4.3.5 Stanje i kapacitet objekata na području Sijarinske Banje	61
4.4. VRANJSKA BANJA	69
4.4.1 Opšte karakteristike Vranjske Banje	69
4.4.2 Geološke karakteristike područja Vranjske Banje	70
4.4.3 Hidrogeološke karakteristike terena	75
4.4.4 Stanje i kapacitet objekata na području Vranjske Banje	76
4.5. BUJANOVAČKA BANJA.....	81
4.5.1 Opšte karakteristike Bujanovačke Banje	81
4.5.2 Geološke karakteristike područja Bujanovačke Banje	82
4.5.3 Geofizička istraživanja	86
4.5.4 Hidrogeološke karakteristike terena	87
4.5.5 Stanje i kapacitet objekata na području Bujanovačke Banje	89
5. REZULTATI I DISKUSIJA.....	97
5.1. Rezultati i diskusija hemijskih analiza voda.....	98
5.2. Određivanje maksimalnih temperatura rezervoara.....	119
5.3. Procena korozije i inkrustracije u bušotinama	133
5.4. Rezultati i diskusija izotopskih analiza.....	137
5.5. Proračun radiogene toplote stenskih masa.....	144
5.6. Geotermalna potencijalnost Srpskog kristalastog jezgra	148
5.7. Procena dubine cirkulacije termalnih voda.....	154
5.8. Korišćenje hidrogeotermalnih resursa Srpskog kristalastog jezgra	156

6. GEOTERMALNI SISTEMI SRPSKOG KRISTALASTOG JEZGRA	166
7. KRITIČKI OSVRT NA PODATKE RANIJIH ISTRAŽIVANJA	175
8. ZAKLJUČAK.....	177
LITERATURA	183

Biografija autora

Izjava o autorstvu

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Izjava o korišćenju

SPISAK TABELA

Tabela 1. Primenjene analitičke metode i granice detekcije (laboratorija BGR, Berlin)	17
Tabela 2. Primenjene formule za određivanje temperatura geotermometrima	20
Tabela 3. Prosečne vrednosti toplotno-fizičkih osobina ispitivanih stena sa teritorije Srbije (Milivojević i Perić, 1990, fond. dok.)	27
Tabela 4. Maksimalne, minimalne i srednje vrednosti mesečnih suma padavina (mm) na kišomernoj stanici Prolom 1954-1991 (RHMZ)	30
Tabela 5. Pregled hidrogeoloških pojava na području Prolom Banje (prema podacima: Protić, 1995, Milanović, 2009, fond. dok.)	39
Tabela 6. Maksimalne, minimalne i srednje vrednosti mesečnih suma padavina (mm) na kišomernoj stanici Jastrebac 1970-1984 (RHMZ).....	40
Tabela 7. Pregled hidrogeoloških pojava na području Ribarske Banje (prema podacima: Milovanović, 2001, fond. dok; Živanović i saradnici, 2010).....	52
Tabela 8. Maksimalne, minimalne i srednje vrednosti mesečnih suma padavina (mm) na kišomernoj stanici Leskovac u periodu od 1961 do 2010 (RHMZ).....	54
Tabela 9. Pregled hidrogeoloških pojava na području Sijarinske Banje (prema podacima sa terena, 2011 i podacima Zlokolica i Ilić, 1994, fond.dok).....	68
Tabela 10. Maksimalne, minimalne i srednje vrednosti mesečnih suma padavina (mm) na kišomernoj stanici Vlasina i na kišomernoj stanici Vranje 1961-1991 (RHMZ)	69
Tabela 11. Pregled hidrogeoloških pojava na području Vranjske Banje (prema podacima sa terena, 2011; i podacima: Zlokolica i saradnici, 1994, fond. dok.; Martinović i Magazinović, 2010).....	80
Tabela 12. Maksimalne, minimalne i srednje vrednosti mesečnih suma padavina (mm) na kišomernoj stanici Bujanovac u periodu od 1946 do 1991 (RHMZ).....	81

Tabela 13. Pregled hidrogeoloških pojava na području Bujanovačke Banje (prema podacima sa terena, 2011 i podacima fondovske dokumentacije: Stanković, 1988, Tasić, 2006, Jovanović, 2008, Jovanović, 2012).....	96
Tabela 14. Hemijske analize termalnih voda Srpskog kristalastog jezgra (rađene u laboratoriji BGR, Berlin, 2011).....	99
Tabela 15. Statistički parametri analiziranih voda (n=20).....	102
Tabela 16. Hemijske analize termalnih voda Sijarinske Banje (rađene u Institutu za rehabilitaciju, Beograd, 2006).....	108
Tabela 17. Vrednosti Nb, Zr i HREE u vodi iz bunara B-1 u Viči (rađene u laboratoriji BGR, 2011) u odnosu na statističke vrednosti istih elemenata određene u flaširanim vodama Evrope (Reimann and Birke, 2010)	117
Tabela 18. Određivanje maksimalnih temperatura u bušotinama i izvorima Srpskog kristalastog jezgra pomoću hemijskih geotermometara.....	120
Tabela 19. Langelierov indeks zasićenja (LSI) i Ryznar-ov indeks stabilnosti (RSI). 134	
Tabela 20. Sadržaj izotopa i radioaktivnost termalnih voda Srpskog kristalastog jezgra (izotopske analize rađene u laboratoriji TU, Dresden, 2011; radioaktivnost određena u laboratoriji PMF-a u Novom Sadu, 2013. godine).....	140
Tabela 21. Sadržaji U, Th i K u parcijalnim statističkim uzorcima stena Leca, Jastrepa i Surdulice i proračunata vrednost radiogene toplote.	145
Tabela 22. Proračun geotermalnog gradijenta i gustine toplotnog toka u bušotinama Srpskog kristalastog jezgra	149
Tabela 23. Procena dubine cirkulacije termalnih voda	155
Tabela 24. Procena mogućnosti korišćenja termalnih voda u Vranjskoj Banji (Petrović i Ilić, 2005).....	160
Tabela 25. Korišćenje geotermalne energije na području Srpskog kristalastog jezgra, sa stanjem tokom 2012. godine.....	162
Tabela 26. Procene energetske efikasnosti i uštede CO ₂ koje se ostvaruje korišćenjem geotermalne energije na području Srpskog kristalastog jezgra.....	163

SPISAK SLIKA

Slika 1. Geološka građa Srpskog kristalastog jezgra 1:1.000.000 (Parlić i Krunić, 2005, izmenjeno)	3
Slika 2. Karta geotermalnih resursa Srbije (Milivojević, 2001; Martinović and Milivojević, 2010; izmenjeno)	12
Slika 3. Dijagram primenjene metodologije istraživanja i dobijenih rezultata	15
Slika 4. Geografski položaj Prolom banje	30
Slika 5. Geološka karta šireg područja Prolom Banje (Malešević i saradnici, 1974; izmenjeno)	32
Slika 6. Lecki vulkanski kompleks (Malešević i saradnici, 1980; izmenjeno)	33
Slika 7. Litološki stub i konstrukcija bušotine B-4 u Prolom Banji (Milanović, 2009, fond. dok; izmenjeno)	38
Slika 8. Česma u Prolom Banji (foto: Petrović Pantić, 2011)	39
Slika 9. Geografski položaj Ribarske Banje	40
Slika 10. Geološka karta šire okoline Ribarske Banje (Rakić i saradnici, 1969; Krstić i saradnici, 1974, Spahić, 2006, fond. dok.; izmenjeno)	42
Slika 11. Bušotina RB-4 (foto: Petrović Pantić, 2011)	52
Slika 12. Bušotina RB-5 (foto: Petrović Pantić, 2011)	52
Slika 13. Litološki stub i konstrukcija bušotine B-5 u Ribarskoj Banji (Milovanović, 2001, fond. dok.; izmenjeno)	53
Slika 14. Geografski položaj Sijarinske Banje	54
Slika 15. Geološka karta šireg područja Sijarinske Banje (Dimitrijević i saradnici, 1964; izmenjeno)	57
Slika 16. Pregledna aeromagnetsko-strukturna karta lista Leskovac (Vukašinović, 2010)	59
Slika 17. Mikrolokacija hidrogeoloških pojava na području Sijarinske Banje	62
Slika 18. Gejzer u Sijarinskoj Banji (foto: Petrović Pantić, 2011)	62
Slika 19. Bušotina B-4 u Sijarinskoj Banji (foto: Petrović Pantić, 2011)	65

Slika 20. Litološki stub i konstrukcija bušotine B-4 u Sijarinskoj Banji (Zlokolica i Ilić, 1994, fond. dok.; izmenjeno)	67
Slika 21. Geografski položaj Vranjske Banje	69
Slika 22. Geološka karta šireg područja Vranjske Banje (Terzin i saradnici, 1976; Babović i Cvetković, 1968, izmenjeno)	72
Slika 23. Regionalni neotektonski rupturni sklop (Tasić i Vasković, 2000; Martinović i Magazinović, 2010)	74
Slika 24. Mikrolokacija hidrogeoloških objekata u Vranjskoj Banji	76
Slika 25. Litološki stub i konstrukcija bušotine VG-2 u Vranjskoj Banji (Zlokolica i saradnici, 1994, fond. dok., izmenjeno)	79
Slika 26. Bušotina VG-3 (foto: Petrović Pantić, 2011)	80
Slika 27. Geografski položaj Bujanovačke banje	81
Slika 28. Geološka građa šireg područja Bujanovačke Banje (Terzin i saradnici, 1976, izmenjeno)	83
Slika 29. Pregledna tektonska karta šireg područja Bujanovačke Banje (Vukanović i saradnici, 1977; izmenjeno)	85
Slika 30. Pregledna aeromagnetsko-strukturna karta lista Vranje (Vukašinović, 2010)	86
Slika 31. Mikrolokacija hidrogeoloških pojava na širem području Bujanovačke Banje	89
Slika 32. Partizanska česma (foto: Petrović Pantić, 2011)	90
Slika 33. Litološki stub i konstrukcija bušotine A-2 u Bujanovačkoj Banji (Stanković, 1988, fond. dok., izmenjeno)	92
Slika 34. Bušotina A-3 u Ljiljancu (foto: Petrović Pantić, 2011)	93
Slika 35. Trilinearni dijagram termalnih voda Srpskog kristalastog jezgra	103
Slika 36. Cl-SO ₄ -HCO ₃ dijagram termalnih voda Srpskog kristalastog jezgra	106
Slika 37. Genetski dijagram termalnih voda Srpskog kristalastog jezgra	107
Slika 38. Scholler-ovi dijagrami termalnih voda Srpskog kristalastog jezgra	110

Slika 39. Scholler-ovi dijagrami termalnih voda Srpskog kristalastog jezgra a) Vranjska Banja; b) Bujanovačka Banja	111
Slika 40. Dijagrami zavisnosti log Q/K u odnosu na promenu temperature, termalne vode u Prolom Banji	121
Slika 41. Dijagrami zavisnosti log Q/K u odnosu na promenu temperature, termalne vode u Ribarskoj Banji	122
Slika 42. Dijagrami zavisnosti log Q/K u odnosu na promenu temperature, termalne vode u Sijarinskoj Banji	123
Slika 43. Dijagrami zavisnosti log Q/K u odnosu na promenu temperature, u bušotini V-1 u selu Viča i bušotini T-1 u Tularu	124
Slika 44. Dijagrami zavisnosti log Q/K u odnosu na promenu temperature, termalne vode u Vranjskoj Banji	125
Slika 45. Dijagrami zavisnosti log Q/K u odnosu na promenu temperature, termalne vode Bujanovačke Banje	126
Slika 46. Na-K-Mg trilinearni dijagram termalnih voda Srpskog kristalastog jezgra	132
Slika 47. Sadržaj $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ u termalnim vodama Srpskog kristalastog jezgra	141
Slika 48. Radiogeni geotermalni sistem (Anderson and Lund, 1979; izmenjeno)	144
Slika 49. Gustina toplotnog toka Srbije u mW/m^2 (Milivojević i saradnici, 1992; Martinović i Milivojević, 2010)	150
Slika 50. Interpolovana karta geotermalnih gradijenata metodom Inverse Distance Weighting (IDW) (prema podacima Milovanović, 1978, fond. dok.)	152
Slika 51. Interpolovana karta gustine toplotnog toka metodom Inverse Distance Weighting (IDW) (prema podacima Milovanović, 1978, fond. dok.)	152
Slika 52. Dijagram promene temperature sa porastom dubine, bušotina B-4 u Sijarinskoj Banji (prema podacima: Obrenović, 1990, fond. dok.)	153
Slika 53. Lindal-ov dijagram korišćenja termalnih voda (Lindal, 1973; izmenjeno)	165
Slika 54. Šematski prikaz idealnog konvektivnog geotermalnog sistema (Dickson and Fanelli, 2004; izmenjeno)	167

Registar korišćenih jedinica:

°C	stepen Celzijusa, jedinica za temperaturu
K	Kelvin, jedinica za temperaturu, [°C] + 273,15
l/s	litar po sekundi, jedinica za kapacitet vode
mg/l	miligram po litru, jedinica za koncentraciju hemijskih elemenata u vodi
µg/l	mikrogram po litru, 10^{-3} mg/l
ppm	parts-per-million, jednak je sa mg/l za vodu ili mg/kg za stenu
T.U.	tricijumova jedinica, jedinica za izotop ^3H
Bq/l	Bekerel po litru, jedinica za alfa i beta radioaktivnost
W/m ³	vat po metru kubnom, jedinica za radiogenu toplotu
µW/m ³	mikrovat po metru kubnom, 10^{-6} W/m ³
mW/m ²	milivat po metru kvadratnom, gustina toplotnog toka, 10^{-3} W/m ²
TJ/god	tera dzula godišnje, korišćenje energije, 10^{12} J/god
W	jedinica za snagu = 1J/s
MW	megavat, 10^6 W, = $3,154 \cdot 10^{13}$ J/god
MWt	megavat termal, jedinica za termalnu snagu što je isto kao i MW
kWh	kilovat čas, jedinica za energiju, 10^3 W
MWh	megavat, jedinica za energiju, 10^6 W
Ma	<i>Megaannum</i> ili milion godina, oznaka koja se koristi za starost u geologiji
‰	promil, jedinica za sadržaj $\delta^{13}\text{C}$ u gasu CO_2
t	tona, jedinica za masu, 10^3 kg,
m	metar, jedinica za dužinu
km	kilometar, jedinica za dužinu, 10^3 m,
m ²	kvadratni metar, jedinica za površinu
km ²	kvadratni kilometar, 10^6 m ²

h/dan	čas po danu (dan=24h)
W/mK	vat po metru Kelvinu, jedinica za toplotnu provodljivost stena
°C/m	celzijus po metru, jedinica za geotermalni gradijent
kg/m ³	kilogram po metru kubnom, jedinica za gustinu stena
J/kgK	džul po kilogram Kelvinu, jedinica za specifičnu toplotu
bar	bar, jedinica za pritisak = 100,000 Pa

1. UVOD

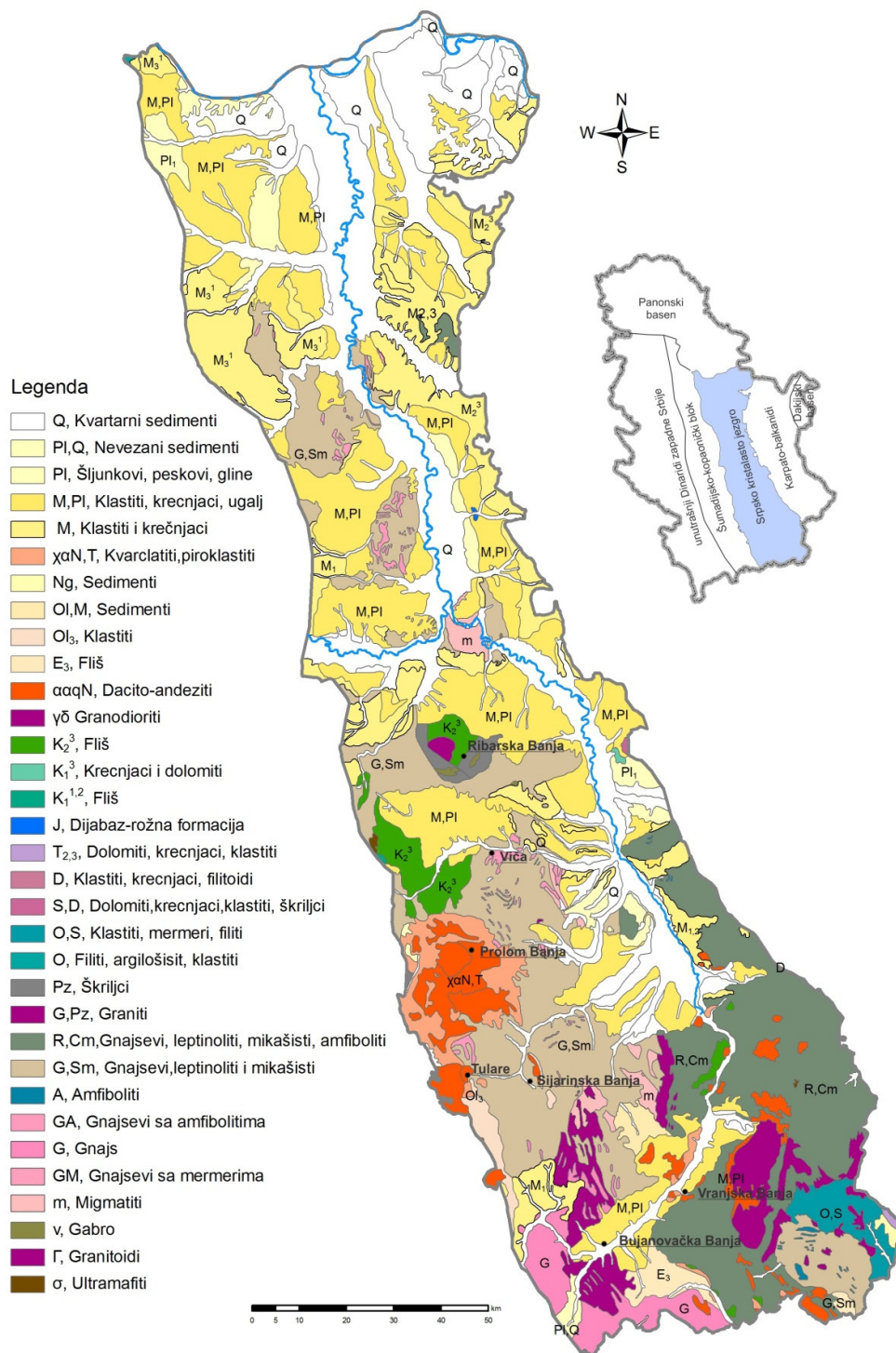
Geotermalni resursi predstavljaju ukupnu količinu unutrašnje toplote Zemlje, odnosno, toplotu akumuliranu u okviru suvih stenskih masa, magme, podzemnih voda i vodenih para. Prefiks hidro ispred geotermalnih resursa (hidrogeotermalni resursi) primenjen je da bi se naglasilo da se pod resursima podrazumevaju podzemne vode i vodene pare. Tako da *hidrogeotermalni resursi* predstavljaju dostupne količine termalnih podzemnih voda i vodenih para koje se mogu racionalno zahvatati i koristiti.

Granična temperatura hidrogeotermalnih resursa u svetskoj literaturi nije jasno definisana. U pojedinim delovima Severne Amerike, termin hidrogeotermalni resursi, odnosi se na podzemne vode sa temperaturom koja se može koristiti za dobijanje električne energije (uglavnom iznad 100°C). Iako temperatura nije jasno definisana, u domaćoj literaturi se pod hidrogeotermalnim resursima podrazumevaju termalne vode, odnosno *podzemne vode sa temperaturom većom od srednje godišnje temperature datog mesta (najčešće iznad 20°C za umereni klimatski pojas)* (Dragišić i Polomčić, 2009).

Toplota podzemnih voda posledica je: magmatskih intruzija, raspadanja radioaktivnih elemenata i visokih vrednosti toplotnih tokova (koja je u zavisnosti od toplotne provodljivosti stena i temperaturnih gradijenata), odnosno uzlaznog kretanja podzemnih voda koje cirkulišu na dubinama od nekoliko kilometara i zagrevaju se normalnim temperaturnim gradijentom i/ili cirkulacije i akumuliranja voda u okviru stena sa visokom toplotnom provodljivošću, pod uslovom da nema rasipanja toplote, odnosno da su pokrivene stenama sa niskom toplotnom provodljivošću.

Na području Srbije izdvajaju se sledeći hidrogeološki rejoni (Filipović i saradnici, 2005): rejon Dakijskog basena, rejon Karpato-balkanida, rejon Srpskog kristalastog jezgra, rejon Šumadijsko-kopaoničko-kosovske oblasti, rejon unutrašnjih Dinarida Zapadne Srbije i rejon Panonskog basena (slika 1).

Najveći broj termalnih izvora zabeležen je u okviru unutrašnjih Dinarida Zapadne Srbije, dok su najviše temperature zabeležene u okviru metamorfnih i magmatskih stena Srpskog kristalastog jezgra. Srpsko kristalasto jezgro je poznato i pod nazivima Srpsko makedonska masa, Rodopska masa, Srpsko međugorje, Moravikum. Obuhvata centralnu i jugoistočnu Srbiju, odnosno pruža se duž sliva Velike Morave.



Slika 1. Geološka građa Srpskog kristalastog jezgra 1:1.000.000 (Parlić i Krunić, 2005, izmenjeno)

Najstarije stene na području Srpskog kristalastog jezgra predstavljene su proterozojskim i paleozojskim kristalastim škriljcima koji su izvojeni u donji i gornji kompleks (Filipović i saradnici, 2005).

Donji kompleks izgrađuje zapadni deo Srpskog kristalastog jezgra. Izgrađen je od gnajseva, leptinolita, mikašista, amfibolita, dok se mestimično javljaju mermeri i migmatiti.

Gornji kompleks zauzima istočni deo jezgra, izgrađuju ga kristalasti škriljci nižeg kristaliniteta: liskunsko-hloritske stene, hloritske i hlorit-epidotske stene, amfibolske stene i metabazalti, kvarciti, mermeri, kalkšisti, metakvarcporfiri i albitsko-epidotsko-muskovitski škriljci.

Na složenost metamornih procesa Srpskog kristalastog jezgra, ukazuju petrološka ispitivanja na području Batočine (Cvetković et al, 1995), gde su otkrivene tri poslednje faze metamorfizma: kaledonska orogeneza (500 Ma), hercinska metamorfna faza (275 Ma), a potom je cela serija prerađena u alpskom periodu (127-160 Ma) sa zagrevanjem stena do 400°C.

U okviru kristalastih stena Srpskog kristalastog jezgra, duž velikih dislokacionih linija došlo je do proboja granitoida (staropaleozojski granitoid Vljajne, variscijski bujanovački granitoid i terciarni granitoidi: oligocenski granitoid Surdulice i eocenski granitoid Jastrepcu) i njihovih vulkanskih ekvivalenata, andezita, dacita i tufova (lecki andezitski masiv, područje Surduličkog granitoida, okolina Vranja). U terciarnim magmatskim formacijama dominantno su prisutne kisele i intermedijarne stene, koje su veoma povezane na osnovu sastava, porekla, pojavljivanja u vremenu i prostoru (Cvetković et al, 2000).

Naslage terciarne starosti uglavnom su rasprostranjene u severnim i središnjim delovima reiona, dok su naslage kvartarne starosti dominantno prisutne duž većih vodotokova.

Srpsko kristalasto jezgro izdijeljeno je u blokove sistemom rasednih struktura dominantnog pravca pružanja SZ-JI i SI-JZ. Duž rasednih struktura došlo je do intenzivnog spuštanja terena u severnim delovima Srbije i izdizanja u južnim delovima. Tokom paleogena intenzivna izdizanja od 500 do 1000 m zahvatila su planinu Radan i

Goljak kao i Juhor, Jastrebac, Vidojevicu, Kukavicu, Seličevicu i Babičku goru. Izdizanja na Radanu su se dešavala i tokom neogena (Ćirić, 1968; Ćirić, 1996).

Hidrogeotermalni resursi javljaju se u okviru južnog dela Srpskog kristalastog jezgra (slika 1). Resursi temperatura od 30 do 100°C, javljaju se u Prolom Banji, Ribarskoj Banji, Sijarinskoj Banji, Vranjskoj Banji i Bujanovačkoj Banji. Niže temperature zabeležene su i u vodi iz sela Viča (23°C) i iz sela Tulare (26°C). Na osnovu temperature (Muffler and Cataldi, 1978), hidrogeotermalni resursi Srpskog kristalastog jezgra se klasifikuju kao nisko temperaturni (<90°C) do srednje temperaturni (90-150°C).

Vode se zahvataju iz andezita (Prolom Banja, Tulare), andezita i gnajseva (Sijarinska Banja), gnajseva (Vranjska Banja), škriljaca (Ribarska Banja, Viča) i granita, granitnog grusa, laporaca i peskova (Bujanovačka Banja). Dosadašnjim istraživanjima rezervoari geotermalnih sistema Srpskog kristalastog jezgra nisu jasno definisani, upravo iz razloga što su najveće količine voda zahvaćene iz metamornih stena koje se po opšte prihvaćenim stavom na odlikuju povoljnim filtracionim karakteristikama za akumulaciju značajnijih količina voda.

Prema Milivojeviću i Periću (1990, fond. dok.), na osnovu rezultata izotopa $\delta^{13}\text{C}$ u gasu CO_2 -5,2 do -2,65 ‰ (prema Viena Pee Dee Belemnite), rezervoar termalnih voda Sijarinske Banje, Tulara i Viče čine mermeri, koji se pružaju na oko 1000 km², dok kasnije Milivojević (2003) za rezervoar ovih voda navodi ispucale gnajseve, mermere i kvarcite na površini od 1700 km²

Za rezervoar termalnih voda Vranjske Banje, Milivojević i Perić (1990, fond. dok.) navode ispucali deo granitoidne intruzije i termometamorfne zone u škriljcima.

Protić (1995) za rezervoar termalnih voda Prolom Banje, Ribarske Banje, Vranjske Banje, Sijarinske Banje i Tulara, navodi vulkanogene tvorevine (andezite, dacite, piroklastite, vulkanske breče).

Prema Zlokolici i saradnicima (1994, fond.dok.) i Zlokolici i Iliću (1994, fond.dok.), značajne količine voda Vranjske Banje (100 l/s) i Sijarinske Banje (~95 l/s) formiraju se u okviru hidrogeoloških kompleksa koje čine škriljci, u koje su utisnuti andeziti, granodioriti, pri čemu postoji mogućnost postojanja karbonatnih stena u podini.

Za izvor toplote podzemnih voda, pretpostavke su da je povišen temperaturni režim uslovljen obližnjim granitoidom ili nekadašnjom vulkanskom aktivnošću područja. Mlađi intruzivi su nosioci veće količine toplote, tako da je važno napomenuti da je proučavanjem tercijarnog magmatizma na području Srbije (Cvetković et al, 2004a), na granici Srbije sa Makedonijom, utvrđeno postojanje najmlađih stena oligocenske, miocenske i pliocenske starosti (Klinovac, 32,73 Ma, Slavujevac, 6,57 Ma, Cer 3,86).

Hidrogeotermalni resursi se najčešće koriste u balneologiji i za toplifikaciju banjskih objekata. Osim toga vode Bujanovačke Banje se flaširaju pod imenom Heba i Bivoda, dok se voda iz Prolom Banje flašira pod imenom Prolom voda. Za zagrevanje staklenika i za farme koristi se samo voda iz Vranjske Banje.

Direktnom primenom, ukupno godišnje korišćenje geotermalne energije na području Srpskog kristalastog jezgra iznosi 298,86 TJ/god, toplotne snage 26,86 MWt sa stepenom iskorišćenosti 0,5 (poglavlje 5.8).

Sa temperaturom preko 100°C Vranjska Banja je poslednjih godina predmet istraživanja u cilju izrade geotermalnog postrojenja za proizvodnju električne energije. Prosečni toplotni tok Srbije iznosi oko 100 mW/m² (Martinović i Milivojević, 2010), dok je prosečni toplotni tok na Zemlji 91,6 mW/m² (Davies and Davies, 2010). Za potrebe izrade ove disertacije proračunat je toplotni tok Srpskog kristalastog jezgra, odnosno južnog dela jezgra sa vrednostima od 136,3 mW/m² do 191,5 mW/m².

Navedeni podaci ukazuju da je područje Srpskog kristalastog jezgra veoma značajno sa aspekta geotermalne potencijalnosti i da kao takvo zaslužuje detaljniju analizu, počevši od analize terena, odnosno geotermalne potencijalnosti stena do analiza vode (hemijski sastav vode, izotopske analize vode-poreklo voda, kvalitet voda u cilju iskorišćavanja i moguće očekivane temperature), kao i sagledavanje geotermalnih sistema analiziranih lokaliteta.

Za potrebe izrade doktorske disertacije za 20 uzoraka termalnih voda urađene su hemijske analize, određeni izotopi $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ i ^3H , urađene analize alfa i beta radioaktivnosti, kao i sadržaj ^{226}Ra i ^{222}Rn u vodama. Prilikom eksploatacije hidrogeotermalnih resursa često dolazi do pojave inkrustracije i taloženja mineralnih materija čija je problematika razmatrana u ovom radu.

Na području istraživanja hidrogeološka istraživanja vršena su u cilju dobijanja veće količine vode, više temperature, kao i u cilju utvrđivanja rezervi podzemnih voda. Malobrojni podaci su publikovani, pa je prilikom izrade disertacije korišćena fondovska dokumentacija da bi se prikupili podaci o bušotinama, stanju objekata, količinama vode i temperaturama.

2. POSTOJEĆA SITUACIJA EKSPLOATACIJE I KORIŠĆENJA HIDROGEOTERMALNIH RESURSA

2.1. Korišćenje hidrogeotermalnih resursa u svetu

U ranim godinama 19. veka geotermalni fluidi su eksploatisani zbog svog sadržaja. Tako je u Italiji, oblast Larderello, korišćena borna kiselina iz termalnih voda, koja se zahvatala na površini voda ili je zahvatana iz plitkih bušotina. Od 1910. do 1940. u oblasti Tuscany, Italija, topla para se koristila u industrijske svrhe, za zagrevanje stambenih objekata i staklenika. U Americi 1892. godine počinje korišćenje geotermalne energije u oblasti Idaho. U to vreme, drugi izvori energije su bili ekonomičniji, pa se toplifikacija geotermalnom energijom nije dugo održala (Dickson and Fanelli, 2004).

Za direktnu primenu koriste su hidrogeotermalni resursi temperatura od 20°C do 150°C, dok su resursi temperatura iznad 150°C najpogodniji za proizvodnju električne energije. Za proizvodnju električne energije moguće je koristiti i resurse temperatura iznad 80°C, koristeći binarni sistem (Organic Rankine Cycle). Podzemne vode, temperatura od 5°C do 30°C koriste se uz pomoć geotermalnih pumpi uglavnom sa ciljem zagrevanja i hlađenja prostorija. Direktna primena geotermalne energije obuhvata korišćenje toplotne energije u balneologiji, za zagrevanje bazena, prostorija, staklenika, ribnjaka, u industriji, za sušenje povrća i voća, kao i za grejanje i hlađenje uz pomoć toplotnih pumpi, čija primena je u naglom porastu poslednjih desetak godina. Prema podacima iz 2010 (Lund, et al, 2011), direktno korišćenje geotermalne energije u svetu je 423.830 TJ/god, odnosno instalisana termalna snaga je 48.493 MWt, pri čemu se ostvari ušteta od 18,8 miliona tona ekvivalente nafte, spreči emisija 16,6 miliona tona ugljenika, 53,4 miliona tona CO₂, 0,37 miliona tona SO_x i 0,011 miliona tona NO_x. Ovaj vid primene geotermalne energije najzastupljeniji je u Kini (75.348,3 TJ/god), SAD (56.551,8 TJ/god), Švedskoj (45.301 TJ/god), Turskoj (36.885,9 TJ/god), Japanu (25.697,94 TJ/god), Islandu (24.361 TJ/god) itd. U porastu je izgradnja geotermalnih elektrana, koje zauzimaju mali prostor, imaju niske troškove proizvodnje, dok se energija proizvodi 24 h/dan. Najniže zahtevana temperatura vode je 80°C (binarna postrojenja). Geotermalne elektrane su najbrojnije u SAD-u, na Islandu, Novom Zelandu. Na osnovu postojećih geotermalnih postrojenja u svetu za dobijanje električne energije godišnje se uštedi 38 miliona tona nafte što sprečava emisiju 33 miliona tona ugljenika, 107 miliona tona CO₂, 0,74 miliona tona SO_x i 0,022 miliona tona NO_x (Lund, et al, 2011).

2.2. Korišćenje hidrogeotermalnih resursa u Srbiji

Srbija je zemlja bogata termalnim vodama, na šta ukazuju brojni termalni izvori. Na području Panonskog basena nema prirodnog isticanja termalnih voda, već na ovom području postoji 78 geotermalnih bušotina koje zahvataju termalne vode iz gornje pontskih peščara i trijaskih krečnjaka (Martinović i saradnici, 2010). Na području Srbije, bez Panonskog basena broj izvora i bušotina nije pouzано utvrđen. U literaturi se sreću podaci o 159 prirodnih termalnih izvora, temperature iznad 15°C (Martinović i Milivojević, 2010) do 1080 prirodnih i veštačkih izvora raspoređenih na 241 lokalitet (Soleša i saradnici, 1995).

Najveći broj pojava i najveće količine termalnih voda sa temperaturama iznad 20°C, zahvataju se iz karbonatnih izdani ispod debelih naslaga neogenih sedimenata Mačve i Panonskog basena, dok su podzemne vode sa najvišim temperaturama zahvaćene u okviru magmatskih, metamorfnih i kontaktno-metamorfnih stena Srpskog kristalastog jezgra. Najviša temperatura voda u Srbiji zabeležena je u Vranjskoj Banji od 111°C, potom u Jošaničkoj Banji (78°C), Bogatiću (78°C) i Sijarinskoj Banji (77°C).

U Srbiji se hidrogeotermalni resursi najčešće koriste u balneologiji i za sportsko-rekreacione svrhe. Iako postoji 59 banja, samo 15 banja je razvijeno u moderne rehabilitacione centre. Korišćenje za grejanje i druge energetske svrhe je veoma skromno u odnosu na potencijalnost resursa. Najpovoljnija situacija je u okviru Panonskog basena gde se termalne vode koriste iz 23 bušotine: za proizvodnju povrća u staklenicima; za zagrevanje farmi za uzgoj svinja; u fabrikama kože i tekstila u proizvodnom procesu; za zagrevanje poslovnih prostorija. Van Panonskog basena termalne vode se koriste za grejanje na nekoliko lokaliteta: Vranjska Banja, Sijarinska Banja, Kuršumlijska Banja, Lukovska Banja, Prolom Banja, Ribarska Banja, Niška Banja, Ovčar Banja, Gamzigradska Banja, prvenstveno za zagrevanje banjskih objekata.

Na osnovu slike 2. (Milivojević, 2001; Martinović and Milivojević, 2010) uočava se sledeća situacija korišćenja hidrogeotermalnih resursa:

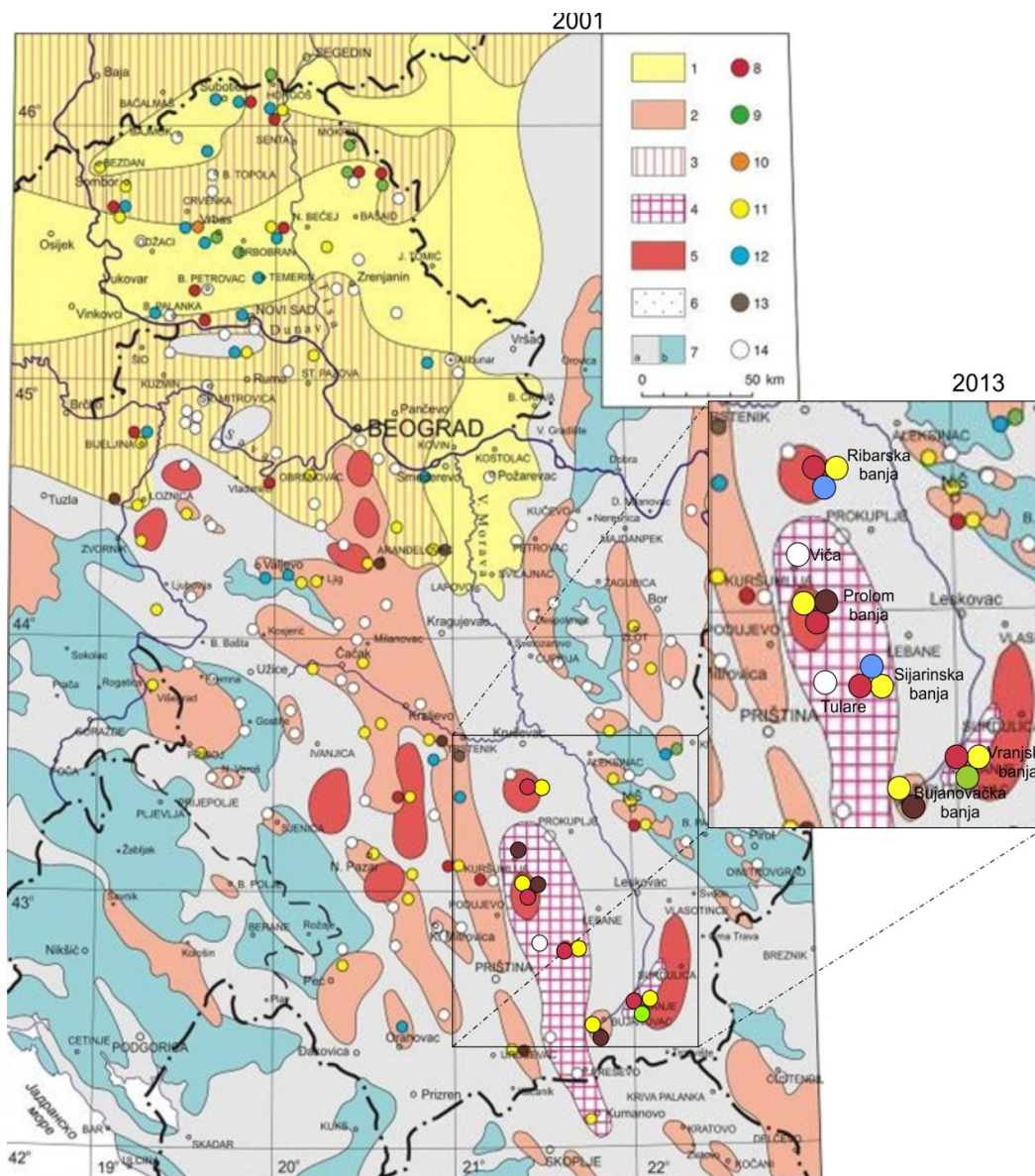
za grejanje je u upotrebi..... 18 objekata
za proizvodnju hrane..... 7 objekata
u industriji..... 1 objekat

u balneoterapiji.....	41 objekat
za rekreaciju.....	20 objekata
za flaširanje.....	9 objekata
ne koristi se.....	89 objekata

Dobijeni podaci ukazuju da struktura korišćenja nije zadovoljavajuća i da se na osnovu karte zaključuje da se čak 48% prikazanih objekata ne koristi. Za potrebe proizvodnje hrane koristi se tek 4% objekata a za industrijske potrebe koristi zanemarljivih 0,6%. Tradicionalno najznačajniji način korišćenja je za potrebe balneoterapije (u zdravstvenim centrima i od strane lokalnog stanovništva), koji obuhvata čak 22% prikazanih objekata. Za rekreaciju i sport koristi se 10% objekata, dok se zahvatanje termomineralnih voda za potrebe flaširanja vrši na 5% prikazanih objekata.

Posmatrajući samo vode sa područja Srpskog kristalastog jezga (slika 2) sa stanjem 2001 i stanjem 2013, uočava se porast korišćenja hidrogeotermalnih resursa za rekreaciju, izradom novog Wellnes centra u Ribarskoj Banji (2011), kao i izradom otvorenih bazena u Sijarinskoj Banji (2005). Punionica vode "Milan Toplica" na području sela Viča zatvorena je 2002. godine.

Na području Srbije najveća instalisana toplotna snaga je za balneološko-rekreativne svrhe (39,8 MWt), zatim za grejanje stambenih objekata (20,9 MWt), za staklenike (18,5 MWt), ribnjake i farme (6,4 MWt), u industrijskim procesima (4,6 MWt), za sušenje u agrikulturi (0,7 MWt), dok je poslednjih nekoliko godina sve češće se primenjuju toplotne pumpe za grejanje i hlađenje prostorija (9,9 MWt). Ukupno instalisani termalni kapaciteti u 2010. godini iznose 100,8 MWt, dok je godišnje korišćenje geotermalne energije u Srbiji 1410 TJ/god sa faktorom korišćenja 0,44 (Martinović and Milivojević, 2010).



Slika 2. Karta geotermalnih resursa Srbije

(Milivojević, 2001; Martinović and Milivojević, 2010; izmenjeno)

Legenda 1. hidrogeotermalna nalazišta u stenama kenozojske starosti; 2. hidrogeotermalna nalazišta u stenama mezozojske starosti; 3. hidrogeotermalna nalazišta u stenama mezozojske starosti ispod stena kenozojske starosti; 4. hidrogeotermalna nalazišta u stenama prepaleozojske starosti; 5. petrogeotermalna nalazišta u granitoidnim stenama tercijarne starosti; 6. hidro-petrogeotermalna nalazišta do dubine 200 m za eksploataciju geotermalne toplote pomoću toplotnih pumpi; 7. područja bez značajnih hidrogeotermalnih nalazišta: a. tereni od stena paleozojske i prepaleozojske starosti, b. karstni tereni;

Korišćenje resursa: 8. za grejanje; 9. u agrikulturi; 10. u industriji; 11. u balneoterapiji; 12. za rekreaciju i sport; 13. za proizvodnju flaširane vode; 14. pojave koje se ne koriste.

3. METODE ISTRAŽIVANJA

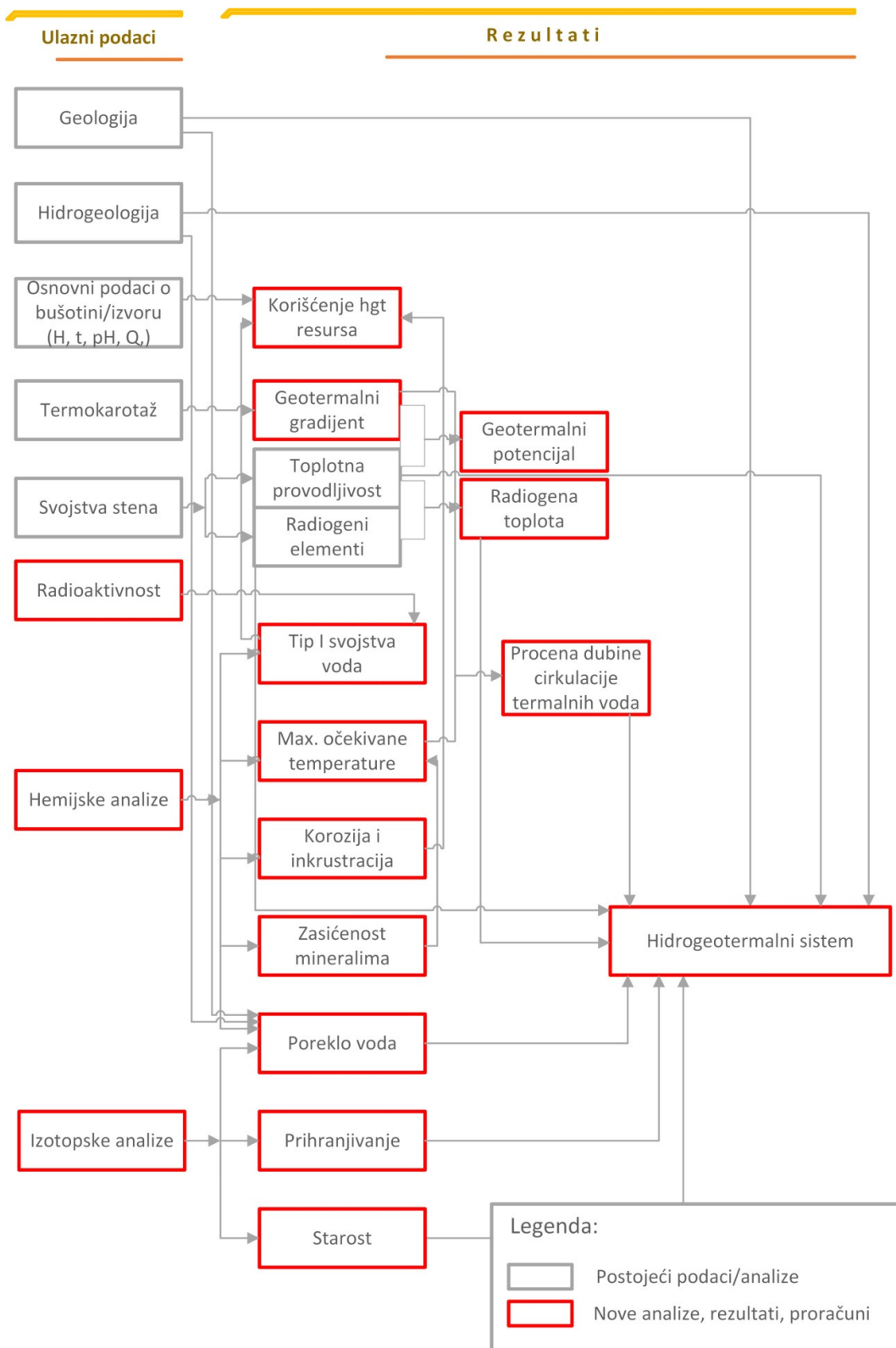
U cilju proučavanja hidrogeotermalnih resursa, tj. njihovih svojstava, tipa voda, geneze, zasićenosti voda mineralima i određivanja maksimalnih očekivanih temperatura, urađene su hemijske analize termalnih voda.

Za određivanje porekla voda, visine prihranjivanja, određivanje starosti voda, urađene su izotopske analize.

Za procenu radioaktivnosti voda izmerene su vrednosti alfa i beta radioaktivnosti, kao i sadržaj radioaktivnih elemenata u vodama.

Na osnovu prikupljenih podataka na terenu (pH vrednosti, izdašnosti bušotina/izvora, temperatura na isticanju) i podataka ranijih istraživanja (podaci o bušenju, karotaž, toplotno-fizička svojstva stena, sadržaj radiogenih elemenata), proračunati su: geotermalni gradijent, radiogena toplota, geotermalni potencijal, inkrustracija i korozija, dubina zaleganja termalnih voda i korišćenje voda.

Na slici 3. uočava se da je najkompleksije definisanje hidrogeotermalnih sistema, koji su rezultat kompleksnih istraživanja i analiza. Takođe na dijagramu crvenom bojom su istaknute nove analize, proračuni i dobijeni rezultati, čime se jasno ističe *doprinis* koji je dat ovom disertacijom.



Slika 3. Dijagram primenjene metodologije istraživanja i dobijenih rezultata

3.1. Hemijske analize voda

Vrednosti elektroprovodljivosti (Ep), pH i temperature, određeni su na terenu pomoću laboratorije Eijkelkamp 1828. Uzorkovanje voda za potrebe izrade laboratorijskih analiza vršeno je po standardima ISO 5667-3, ISO 5667-11. Svaki uzorak vode zahvaćen je sa plastičnim flašicama: dve PFA flašice (250 ml) i jednom PE flašicom (500 ml).

Hemijske analize rađene su u laboratoriji BGR (Federal Institute for Geosciences and Natural Resources) u Berlinu. Analize su obuhvatile 71 parametar, odnosno elektroprovodljivost Ep, pH vrednost, makrokomponente, mikrokomponente i elemente u tragovima. Dvadeset uzoraka voda (iz 18 bušotina i sa 2 izvora) uzeti su sa sledećih objekata:

- Ribarska Banja - bušotine RB-4, RB-5 i CRB-1,
- Prolom Banja - bušotine PB-4 i PB-5 (Prolom voda)
- Sijarinska Banja - bušotina B-4, zatim bušotine Gejzer, Aragonit i Inhalator
- Tulare - duboka bušotina BT-1
- Viča – bušotina B-1
- Vranjska Banja - bušotine VG-2, VG-3, B-1 i izvor Stara kaptaža
- Bujanovačka Banja - bušotine Yu-1 i Yu-2 (Bi voda), A-2, A-3 i izvor Partizanska česma.

Metodom inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES) su određeni Ba, Ca, K, Mg, Mn, Na, PO₄, SiO₂ i Sr. Mikrokomponente i elementi u tragovima su određeni metodom quadrupole inductively coupled emission spectroscopy (ICP-QMS), anjoni jonskom hromatografijom (IC), amonijum jon fotometrijskom metodom. Detaljnije o primenjenim analizama može se naći u publikaciji *Determination of main and trace elements in European bottled mineral water - analytical methods* (Birke et al, 2010). Analitičke metode i granice detekcije za sve merene parametre date su u tabeli 1.

Tabela 1. Primenjene analitičke metode i granice detekcije (laboratorija BGR, Berlin)

Parametar	Jedinica	Analitički metod	Granica detekcije	Parametar	Jedinica	Analitički metod	Granica detekcije
pH	-	terenskom lab.	-	Nd	µg/l	ICP-QMS	0,0002
Ep	µS/cm	terenskom lab.	-	Ni	µg/l	ICP-QMS	0,01
Ag	µg/l	ICP-QMS	0,001	Pb	µg/l	ICP-QMS	0,002
Al	µg/l	ICP-QMS	0,3	Pr	µg/l	ICP-QMS	0,00005
As	µg/l	ICP-QMS	0,01	Rb	µg/l	ICP-QMS	0,001
B	µg/l	ICP-QMS	0,1	Sb	µg/l	ICP-QMS	0,002
Ba	mg/l	ICP-AES	0,001	Sc	µg/l	ICP-QMS	0,01
Be	µg/l	ICP-QMS	0,001	Se	µg/l	ICP-QMS	0,01
Bi	µg/l	ICP-QMS	0,0005	Sm	µg/l	ICP-QMS	0,0002
Ca	mg/l	ICP-AES	0,01	Sn	µg/l	ICP-QMS	0,001
Cd	µg/l	ICP-QMS	0,001	Sr	mg/l	ICP-AES	0,001
Ce	µg/l	ICP-QMS	0,0005	Ta	µg/l	ICP-QMS	0,001
Co	µg/l	ICP-QMS	0,002	Tb	µg/l	ICP-QMS	0,00005
Cr	µg/l	ICP-QMS	0,03	Te	µg/l	ICP-QMS	0,005
Cs	µg/l	ICP-QMS	0,001	Th	µg/l	ICP-QMS	0,0001
Cu	µg/l	ICP-QMS	0,01	Ti	µg/l	ICP-QMS	0,01
Dy	µg/l	ICP-QMS	0,0001	Tl	µg/l	ICP-QMS	0,0005
Er	µg/l	ICP-QMS	0,0001	Tm	µg/l	ICP-QMS	0,00005
Eu	µg/l	ICP-QMS	0,0002	U	µg/l	ICP-QMS	0,0005
Fe	µg/l	ICP-QMS	0,1	V	µg/l	ICP-QMS	0,01
Ga	µg/l	ICP-QMS	0,0005	W	µg/l	ICP-QMS	0,002
Gd	µg/l	ICP-QMS	0,0002	Y	µg/l	ICP-QMS	0,0005
Ge	µg/l	ICP-QMS	0,005	Yb	µg/l	ICP-QMS	0,0002
Hf	µg/l	ICP-QMS	0,0005	Zn	µg/l	ICP-QMS	0,05
Hg	ng/L	AFS	5,00	Zr	µg/l	ICP-QMS	0,001
Ho	µg/l	ICP-QMS	0,0001	Br ⁻	mg/l	IC	0,003
I	µg/l	ICP-QMS	0,2	HCO ₃ ⁻	mg/l	titracija	2
K	mg/l	ICP-AES	0,1	Cl ⁻	mg/l	IC	0,01
La	µg/l	ICP-QMS	0,0005	F ⁻	mg/l	IC	0,003
Li	µg/l	ICP-QMS	0,1	NH ₄ ⁺	mg/l	fotometrijski	0,005
Lu	µg/l	ICP-QMS	0,00005	NO ₂ ⁻	mg/l	IC	0,005
Mg	mg/l	ICP-AES	0,01	NO ₃ ⁻	mg/l	IC	0,01
Mn	mg/l	ICP-AES	0,001	PO ₄ ³⁻	mg/l	ICP-AES	0,02
Mo	µg/l	ICP-QMS	0,001	SO ₄ ²⁻	mg/l	IC	0,01
Na	mg/l	ICP-AES	0,1	SiO ₂	mg/l	ICP-AES	0,05
Nb	µg/l	ICP-QMS	0,001				

U cilju provjere analitičkih podataka proračunat je jonski balans (J.B.). Vrednosti su dobijene primenom standardne formule (Appelo, 1996):

$$J.B.(%) = \frac{\Sigma katjoni - \Sigma anjoni}{\Sigma katjoni + \Sigma anjoni} \cdot 100$$

Gde su katjoni: Ca, Mg, Na i K, a anjoni: HCO₃, CO₃, SO₄, Cl i NO₃ izraženi u mekv/l. Ovi elementi uglavnom čine 95% ukupnog hemijskog sastava vode. Dozvoljena greška jonskog balansa može biti do 5%. Balans veći od 5% ukazuje na netačnost analize ili značajan sadržaj nekih drugih elemenata koji ne učestvuju u jednačini.

Prilikom interpretacije podataka korišćeni su dijagrami: Scholler-a (Schoeller, 1955), trilinearni dijagram (Piper, 1953), Cl-SO₄-HCO₃ trilinearni dijagram (Giggenbach, 1991) i genetski dijagram (D'Amore et al, 1983).

3.2. Određivanje maksimalnih temperatura u rezervoaru

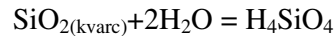
3.2.1. Geotermometri

Geotermometri se koriste za proračun temperature hemijske ravnoteže između vode i stena u kojima se data voda nalazi. Postoje hemijski geotermometri, izotopski i gasni, od kojih su najčešće u upotrebi hemijski. Hemijski geotermometri zasnivaju se na rastvorljivosti silicijum dioksida (SiO₂) u vodi ili na odnosu različitih jona (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) rastvorenih u vodi (D'Amore and Arnorsson, 2000). U zavisnosti od primenjenog geotermometra dobijaju se različite vrednosti temperature, tako da je bitan pravilan izbor odgovarajućeg geotermometra.

Za procenu temperature rezervoara hidrogeotermalnih resursa Srpskog kristalastog jezgra korišćeni su geotermometri zasnovani na vrednosti SiO₂ (kvarc, kalcedon), odnosa Na-K, Na-K-Ca i K-Mg. Korišćene formule za primenjene geotermometre date su u tabeli 2.

SiO₂ geotermometri se zasnivaju na eksperimentalno određenim razlikama u rastvorljivosti faza silicijuma (kvarca, kalcedona, amornog silicijuma) u vodi, u funkciji temperature i pritiska (Karingithi, 2009).

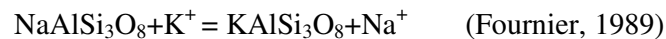
Reakcija rastvaranja je:



Koncentracija silicijuma zavisi od rastvorljivosti kvarca u svim visoko temperaturnim rezervoarima ($>180^\circ\text{C}$), dok u granitnim stenama koncentracija silicijuma zavisi od rastvorljivosti kvarca i pri temperaturama koje su veće od 90°C (Fournier, 1978). Na temperaturama ispod 150°C , kalcedon, češće nego kvarc, kontrološe rastvorljivost silicijuma (Karingithi, 2009). Geotermometri podrazumevaju da je postignuta ravnoteža između vode i minerala (kod silicijumskih geotermometara ravnoteža sa kvarcom i kalcedonom), pa je i ta ravnoteža analizirana u daljem radu.

Katjonski geotermometri se zasnivaju na sadržaju određenih katjona u rastvoru termalne vode. Sadržaj katjona uslovljen je rastvorljivošću minerala, najčešće feldspata, tako da su nosioci ovih katjona: Na-albit, K-mikroclin, Ca-anortit, Mg-hlorit (Fournier, 1989). Najčešće se koriste Na-K i Na-K-Ca geotermometri.

Na-K geotermometar zasniva se na reakciji katjonske izmene između albita i K feldspata:



Na-K geotermometri sporije dostižu datu temperaturu u odnosu na druge geotermometre i pogodni su za duboke rezervoare u kojima se voda dugo zadržava (Fournier, 1989), tako da su pouzdani za visokotemperaturne rezervoare iznad 180°C sa dominantnim hloridnim vodama, dok nisu preporučljivi za rezervoare ispod 100°C .

Karingithi (2009) je definisao uslove u kojima je najbolje koristiti Na-K geotermometre:

- a) ako je temperatura rezervoara $>100^\circ\text{C}$
- b) ako je u vodi nizak sadržaj Ca, pri čemu je neophodno da odnos $\log(\sqrt{Ca} / Na) + 2,06 < 0$,

odnosno po Fournier and Truesdell (1973) $\sqrt{Ca} / Na < 1$

- c) ako je voda pH neutralna, po anjonskom sastavu dominantno hloridna.

Na-K-Ca geotermometar je najpogodniji za vode temperatura iznad 200°C , kao i za vode sa visokim sadržajem Ca (Fournier, 1989).

Tabela 2. Primenjene formule za određivanje temperatura geotermometrima

Tip geotermometra	Formula	Autor
1 SiO ₂ (kvarc) bez gubljenja pare	$t = \frac{1309}{5.19 - \log(\text{SiO}_2)} - 273.15$	Fournier, 1977
2 SiO ₂ (kvarc) maksimalno gubljenje pare	$t = \frac{1522}{5.75 - \log(\text{SiO}_2)} - 273.15$	Fournier, 1977
3 SiO ₂ (kvarc)	$-42.2+0.28831(\text{SiO}_2)-3.6686 \times 10^{-4}(\text{SiO}_2)^2+3.1665 \times 10^{-7}(\text{SiO}_2)^3+77.034\log(\text{SiO}_2)$	Fournier and Potter, 1982
4 SiO ₂ (kvarc)	$-53.5+0.11236(\text{SiO}_2)-0.5559 \times 10^{-4}(\text{SiO}_2)^2+0.1772 \times 10^{-7}(\text{SiO}_2)^3+88.39\log(\text{SiO}_2)$	Fournier and Potter, 1982
5 SiO ₂ (kalcedon)	$t = \frac{1112}{4.91 - \log(\text{SiO}_2)} - 273.15$	Arnórsson et al, 1983
6 SiO ₂ (kalcedon) 0-250	$t = \frac{1032}{4.69 - \log(\text{SiO}_2)} - 273.15$	Fournier, 1977
7 Na-K	$t = \frac{1390}{1.75 + \log(\text{Na} / \text{K})} - 273.15$	Giggenbach, 1988
8 Na-K	$t = \frac{1178}{1.47 + \log(\text{Na} / \text{K})} - 273.15$	Nieva and Nieva, 1987
9 Na-K	$t = \frac{1217}{1.483 + \log(\text{Na} / \text{K})} - 273.15$	Fournier, 1979
10 Na-K	$t = \frac{933}{0.933 + \log(\text{Na} / \text{K})} - 273.15$	Arnórsson et al, 1983
11 Na-K-Ca	$t = \frac{1647}{\log(\text{Na} / \text{K}) + \beta \left[\log(\sqrt{\text{Ca}} / \text{Na}) + 2.06 \right] + 2.47} - 273.15$	Fournier and Truesdell, 1973
12 K-Mg	$t = \frac{4110}{14 - \log(\text{K}^2 / \text{Mg})} - 273.15$	Giggenbach, 1988

K-Mg geotermometar primenjuje se kada Na i Ca nisu u ravnoteži sa mineralima u stenskoj masi rezervoara. Upotreba ovog geotermometra se preporučuje kada su visoki sadržaji K i Mg u vodi. Reakcije koje uključuju Mg se odvijaju relativno brzo na niskim temperaturama i odnos K/\sqrt{Mg} može biti dobar indikator temperature na ravnoteži između vode i stene (Fournier, 1989)

Katjonski geotermometri nisu preporučljivi za upotrebu u kiselim vodama, gde se ne bi postigla ravnoteža sa feldspatima. Nisu preporučljivi za upotrebu ni u vodama sa neobično visokim ili niskim koncentracijama pojedinih alkalnih elemenata (Karingithi, 2009).

3.2.2. Indeks zasićenja SI

Najbolji način za procenu temperature vode u rezervoaru pored geotermometara, može se postići istovremenim razmatranjem stanja ravnoteže između vode i pojedinih hidrotermalnih minerala u funkciji temperature (Reed and Spycher, 1984). U tom slučaju, ako se grupa minerala približava ravnoteži na određenoj temperaturi, ta temperatura najverovatnije odgovara temperaturi rezervoara. U razmatranje se uzimaju minerali koji se pojavljuju na istražnom području ili koji se često javljaju u geotermalnim sistemima. Uvek se razmatra ravnoteža sa kvarcom, kalcedonom, alkalnim feldspatima (albitom i mikroklinom) i kalcitom, dok se slabije uzimaju u razmatranje i anhidrit, fluorit, pirit, epidot i drugi minerali (Mnjokava, 2007). Stanje ravnoteže se određuje pomoću indeksa zasićenja, i na ovaj način se najbolje razdvajaju vode koje su u ravnoteži od voda koje nisu u ravnoteži sa mineralima. Odstupanje od ravnoteže, može biti posledica ili nepotpune reakcije vode sa okolnim stenama ili zbog razblaživanja i mešanja sa okolnom vodom, najčešće sa plićom podzemnom vodom.

Osim za procenu temperature rezervoara, indeks zasićenja se koristi i za procenu korozije i inkrustracije, koje često izazivaju probleme na instalacijama. Vrednost indeksa zasićenja, u odnosu na temperaturu, za svaki mineral daje procenu ravnotežnog stanja fluida.

Pomoću programa WATCH (Arnórsson and Bjarnason, 1993) određena je jonska aktivnost minerala u vodi (Q) i ravnotežna konstanta (K). Na osnovu ovih podataka dobijen je indeks zasićenja (SI – saturation index) po sledećoj jednačini:

$$SI = \log Q - \log K$$

Kad je vrednost $SI > 0$ fluid je zasićen datim mineralom, kad je $SI < 0$, fluid je nezasićen, meša se sa razblaženim vodama i kad je $SI = 0$ ili $SI \approx 0$ fluid je u ravnoteži sa mineralom. SI ukazuje koje minerale rastvara podzemna termalna voda prilikom cirkulacije kroz različite stene.

3.3. Langelier-ov (LSI) i Ryznar-ov (RSI) indeks

U cilju procenu korozivnih i inkrustrativnih svojstava vode koriste se Langelier-ov (LSI) i Ryznar-ov (RSI) indeks stabilnosti. Korozija je fizičko-hemijski proces oksidacije gvožđa koja se odvija pod dejstvom O_2 , CO_2 , vodene pare, koji dovode do uništavanja materijala, u našem slučaju cevi. Inkrustracija predstavlja taloženje naslaga, najčešće $CaCO_3$. Ova svojstva su uočena iz pojedinih bušotina na području istraživanja, pa su ovi proračuni veoma korisni u cilju korišćenja i sagledavanja svojstava vode na instalacije.

Za izračunavanje Langelier-ovog i Ryznar-ovog indeksa stabilnosti koristi se pH vrednost vode, određen na terenu i teoretski pHs, određen na osnovu hemijskih analiza:

$$LSI = pH - pHs;$$

$$RSI = 2 pHs - pH$$

Odnosno Langelier-ova jednačina se može prikazati i kao

$$LSI = pH - pCa^{2+} - pHCO_3^- - K,$$

gde se K očitava sa dijagrama

Za izračunavanje teoretskog pHs koristio se nomogram konstruisan od strane Carrier (1965), dok je moguće izračunavanje i pomoću sledeće formule:

$$pHs = (9,3 + A + B) - (C + D)$$

gde je: $A = (\log(\text{TDS}) - 1)/10$	TDS u mg/l
$B = (-13,12 \log(^{\circ}\text{C} + 273)) + 34.55$	Temperatura u $^{\circ}\text{C}$
$C = (\log(\text{Ca tvrdoća})) - 0.4$	Ca tvrdoća kao CaCO_3 u mg/l
$D = \log(\text{M alkalnost})$	M alkalnost kao CaCO_3 u mg/l

Koristeći metode LSI i RSI, veća se tačnost postiže u predviđanju inkrustracije u odnosu na koroziju (Rafferty, 1999).

Ako je: LSI<0 Voda je nezasićena u pogledu CaCO_3 . Nezasićena voda teži da ukloni postojeći CaCO_3 sloj u cevima i opremi. Nema inkrustracije.

LSI=0 Voda je neutralna, odnosno u ravnoteži sa CaCO_3 .

LSI>0 Voda je zasićena CaCO_3 i može doći do inkrustracije.

Ako je Langelier-ovog indeks zasićenja (Carrier, 1965):

-2,0 < -0,5	Ozbiljna korozija
-0,5 < 0	Dolazi do manje korozije, nema inkrustracije
LSI = 0	Ravnoteža, ali može doći do manjih pojava korozije
0 < 0,5	Može se formirati manja inkrustracija i korozija
0,5 < 2	Formira se inkrustracija ali ne i korozija

Indikacije Ryznar-ovog indeksa stabilnosti su sledeće (Carrier, 1965):

4,0 - 5,0	velika inkrustracija
5,0 - 6,0	umerena inkrustracija
6,0 - 7,0	mala inkrustracija sa korozijom
7,0 - 7,5	nema inkrustracije, značajna korozija
7,5 - 9,0	teška korozija
>9,0	izuzetno teška korozija

Langelier-ov indeks je pouzadniji za procenu korozije, dok Ryznar-ov indeks nije preporučljiv, odnosno nema značajne korelacije između korozije i Ryznar-ovog indeksa (Ellis, 1959; Papić, 1991). Za ove proračune korišćeni su Lenntech-ovi kalkulatori.

3.4. Izotopske analize voda

Izotopske analize $^2\text{H}/^1\text{H}$ i $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ izražene kao $\delta^2\text{H}$ i $\delta^{18}\text{O}$ rađene su na Technical University (TU) in Dresden. Analize su rađene za 19 uzoraka vode, odnosno za iste uzorke za koje su rađene i hemijske analize voda, izuzev za uzorak vode Yu-2 iz Bujanovačke banje.

Za izotopske analize uzorci su uzimani u 120 ml Duran glass bottles. $\delta^2\text{H}$ i $\delta^{18}\text{O}$ su određivani na masenom spektrometru u avgustu 2011 godine, pri čemu je urađena korekcija u aprilu 2012. Vrednost stabilnih izotopa je izražena u promilima, koristeći:

$$\delta (\text{‰}) = [(R_{\text{uzorak}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}}] \cdot 10^3$$

gde R predstavlja odnos između teških i lakih izotopa u uzorku i prema standardu.

Za određivanje $\delta^2\text{H}$ i $\delta^{18}\text{O}$ korišćeni su standardi V-SMOW2 (Vienna Standard Mean Ocean Water) i SLAP2 (Standard Light Antarctic Precipitation).

$$\delta^{18}\text{O} = [(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{uzorak}}) - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{standard}})] / (^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{standard}})$$

Na području Srbije izotopske analize padavina su prilično oskudno rađene. Najdetajnija istraživanja rađena su za surdulički masiv, tako da je lokalna meteorska linija dobijena za surdulički masiv primenjena za celu jugoistočnu Srbiju. Lokalna meteorska linija LML iznosi (Hadžišehović et al, 1993; Hadžišehović et al, 1995):

$$\delta^2\text{H} = 7,3 (\pm 0,2) \delta^{18}\text{O} + 7 (\pm 2)$$

U radu je korišćena i globalna svetska meteorska linija GWML (Craig, 1961) koja iznosi:

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$$

Analize tricijuma (^3H), α i β radioaktivnosti, ^{222}Rn i ^{226}Ra rađene su u akreditovanoj laboratoriji "Laboratorija za ispitivanje radioaktivnosti uzoraka i doze jonizujućeg i nejjonizujućeg zračenja", Prirodno-matematičkog fakulteta (PMF), Univerziteta u Novom Sadu, u maju 2013. godine. Tricijum je određen prema metodi ASTM D 4107-08, sa granicom detekcije 2,1 Bq/l odnosno 17,8 T.U. (tricijumovih jedinica), dok su

alfa i beta radioaktivnosti određene prema metodi ASTM D 7283-06. Radon je određen na instrumentu RAD7, a radijum je određen na gama-spektrometru.

3.5. Radiometrijske analize stena

Sadržaji K, Th i U predstavljaju važan parameter za procenu geotermalne potencijalnosti pojedinih stena. Najznačajniji izotopi za određivanje toplotne energije i radioaktivnog zračenja su izotopi $^{40}_{19}\text{K}$, $^{232}_{90}\text{Th}$, $^{235}_{92}\text{U}$ i $^{238}_{92}\text{U}$, odnosno izotopi kalijuma, torijuma i urana (Rybach, 1986).

Radiometrijske analize na području Srbije rađene su u Radiometrijskoj laboratoriji Geoinstituta osamdesetih i devedesetih godina prošlog veka. Podaci o merenim vrednostima publikovani su u Radovima Geoinstituta (autor: Omaljev V.).

Na osnovu određenih vrednosti K, Th i U izračunata je radiogena toplota stena po formuli Rybach-a (1986):

$$A = 10^{-5} \rho (9,52C_U + 2,56C_{Th} + 3,48C_K)$$

gde je: A ($\mu\text{W}/\text{m}^3$) - radiogena toplota

C_U (ppm) - koncentracije urana

C_{Th} (ppm) - koncentracije torijuma

C_K (težinskim %) - koncentracija kalijuma

ρ (kg/m^3) - gustina stenske mase.

Gustina stena je preuzeta iz Studije potencijalnost teritorije SR Srbije van teritorija SAP (Milivojević i Perić, 1990, fond. dok.).

3.6. Geotermalna potencijalnost

Geotermalni potencijal nekog područja procenjuje se na osnovu vrednosti gustine toplotnog toka (q). On predstavlja *količinu geotermalne toplote koja svakog sekunda kroz površinu od 1 m^2 dolazi iz Zemljine unutrašnjosti do njene površine.*

Gustina toplotnog toka određuje se direktnim merenjima u bušotini (uz odgovarajuću aparaturu) ili računskim putem (Milivojević, 2012). Računskim putem gustinu toplotnog toka moguće je odrediti na osnovu: metode intervala i Bullard-ovom metodom, koja je primenjena u ovom radu.

Bullard-ov metod (Bullard, 1939) podrazumeva linearnu vezu između temperature i termalnog otpora (Ω) sedimenata

$$T(z) = T_0 + q \cdot \Omega(z), \text{ odnosno}$$

$$T(z) = T_0 + q \cdot \sum_{i=1}^N \frac{\Delta z_i}{\lambda_i}$$

gde je: $T(z)$ – temperatura na određenoj dubini z ($^{\circ}\text{C}$)

T_0 – temperatura na površini terena (srednja godišnja temperatura tla 14°C)

q – gustina toplotnog toka ($10^{-3}\text{W}/\text{m}^2$, mW/m^2)

λ_i – toplotna provodljivost stena na datom intervalu (W/mK)

Δz_i – debljina posmatranog intervala (m)

Gustina toplotnog toka, izvedena iz prethodne jednačine jednaka je:

$$q = \frac{T_{(z)} - T_0}{\Delta z_i} \lambda_i, \text{ odnosno } q = \Delta G \cdot \lambda$$

gde je ΔG geotermalni gradijent ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)

λ toplotna provodljivost stena (W/mK)

Geotermalni gradijent (ΔG)

Predstavlja promenu temperature stenskih masa sa dubinom i u prosečno iznosi 2,5 do $3^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$ (Dickson and Fanelli, 2004). Prema tome, na 1000 m može se očekivati temperatura od 30°C . Međutim često su temperature ≥ 30 dobijene i na znatno manjim

dubinama, pa se takva područja geotermalno perspektivna i imaju višu vrednost geotermalnog gradijenta. Za određivanje geotermalnog gradijenta potrebno je raspolagati sa podacima termokarotaža, odnosno pratiti promene temperature sa dubinom.

Toplotna provodljivost stena (λ)

Iako je toplotna provodljivost stena jedan od najbitnijih parametara za procenu geotermalne energije, merenja toplotne provodljivosti na području Srbije nisu vršena kontinualno, pa ni pri izradi geotermalnih bušotina. Razlog je u skupoj opremi i proceduri merenja i uzorkovanja.

Merenja toplotne provodljivosti na području Srbije vršena su za potrebe izrade Studije *Geotermalna potencijalnost teritorije SR Srbije van teritorije SAP* (Milivojević i Perić, 1990, fond. dok.) na aparaturi tipa MTP-3, tačnosti $\pm 8\%$, konstruisanoj od strane Odseka za fiziku Fakulteta za prirodne nauke i tehnologiju u Ljubljani 1982. godine. Dobijene vrednosti prikazane su u tabeli 3, pri čemu je problem što nisu navedene lokacije gde su uzorkovane analizirane stene. Toplotna provodljivost stena izražava se u W/mK.

Tabela 3. Prosečne vrednosti toplotno-fizičkih osobina ispitivanih stena sa teritorije Srbije (Milivojević i Perić, 1990, fond. dok.)

Geološka starost	Vrsta stena	Gustina σ (kg/m ³)	Toplotna provodljivost λ (W/mK)	Specifična toplota C (J/kgK)
Tercijar	Andezit	2638	2,17	845
	Dacit	2638	2,17	845
Paleozoik i Proterozoik	Kvarcit	2800	4,12	-
	Gnajs	2800	2,69	780
	Mermer	2726	3,83	845
	Škriljci	2678	3,21	808
	Granit	2800	2,65	-

3.7. Dubina cirkulacije podzemnih voda

Dubinu cirkulacije podzemnih voda moguće je odrediti pomoću sledeće jednačine:

$$H = \frac{T}{G} \quad (\text{Allen et al, 2006})$$

gde je: H– dubina cirkulacije podzemnih voda, (m)
T– maksimalna očekivana temperatura određena geotermometrom, (°C)
G– geotermalni gradijent, (°C/m)

3.8. Korišćenje geotermalne energije

Na osnovu sledećih jednačina izračunate su snaga i energija koja se dobija korišćenjem geotermalnih bušotina:

Toplotna snaga $P \text{ (MWt)} = Q_{\text{max}} [t_{\text{ul}} - t_{\text{iz}}] \times 0,004184 \text{ (MW} = 10^6 \text{ W)}$

Korišćenje energije $E \text{ (TJ/god)} = Q_{\text{sr}} [t_{\text{ul}} - t_{\text{iz}}] \times 0,1319 \text{ (TJ} = 10^{12} \text{ J)}$

Faktor iskorišćenja $n = [E_{\text{god}} / P] \times 0,03171$

gde je: Q_{max} (l/s)– maksimalni proticaj
 Q_{sr} (l/s) – prosečni godišnji proticaj
 t_{ul} (°C)–ulazna temperatura
 t_{iz} (°C)–izlazna temperatura

4. HIDROGEOTERMALNI RESURSI SRPSKOG KRISTALASTOG JEZGRA

4.1. PROLOM BANJA

4.1.1. Opšte karakteristike Prolom Banje

Prolom Banja se nalazi u jugozapadnom delu Srpskog kristalastog jezgra (slika 4). Najbliži grad je Kuršumlija od koga je udaljena 23 km. Banja se pruža na obroncima Radan planine na 630 metara nadmorske visine (m.n.v.) što je ujedno i banja u Srbiji na najvećoj nadmorskoj visini, a okružuju je planinski vrhovi iznad 1000 m (najviši vrh Šopot 1406 m). Klima je umereno-kontinentalna sa osobinama subalpske. Status prirodnog lečilišta, banja je stekla 1977. godine. Prema podacima Republičkog hidrometeorološkog zavoda (RHMZ), za period od 1954-1991. godine srednja višegodišnja suma padavina na kišomernoj stanici Prolom je 65,85 mm (tabela 4). Najveće prosečne količine padavina se izluče u maju, junu i novembru.



Slika 4. Geografski položaj Prolom banje

Tabela 4. Maksimalne, minimalne i srednje vrednosti mesečnih suma padavina (mm) na kišomernoj stanici Prolom 1954-1991 (RHMZ)

	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec	Prosek
Min	2	10	8	22	2	21	0	0	1	0	7	1	6,16
Max	133	130	157	147	193	329	167	155	190	135	178	129	170,25
Sr	56,5	60	63	74	86,5	78,3	58,7	50,7	53,5	55,2	79,4	74,5	65,85

Najznačajniji vodotok je Prolomska reka, mada na širem području postoje više stalnih i povremenih reka i potoka (Pupavička reka, Žuta bara, Duboki potok, Vlasovska reka...). Povremeni potoci se javljaju nakon obilnijih padavina, kao posledica geološke građe i male vododržljivosti stena. Proticaj Prolomske reke je od 10-20 l/s u sušnom periodu dok u kišnom prelazi preko 300 l/s Stalni vodotoci predstavljaju

lokalni erozioni bazis za pukotinski tip izdani. Značajan je uticaj hidroloških i hidrografskih uslova na podzemne vode, s tim što se pretpostavlja da postoji uticaj i na termalne vode. Međutim, direktan uticaj padavina na izdašnost bušotina nije uočen (Milanović, 2009, fond. dok.).

4.1.2. Geološke karakteristike područja Prolom Banje

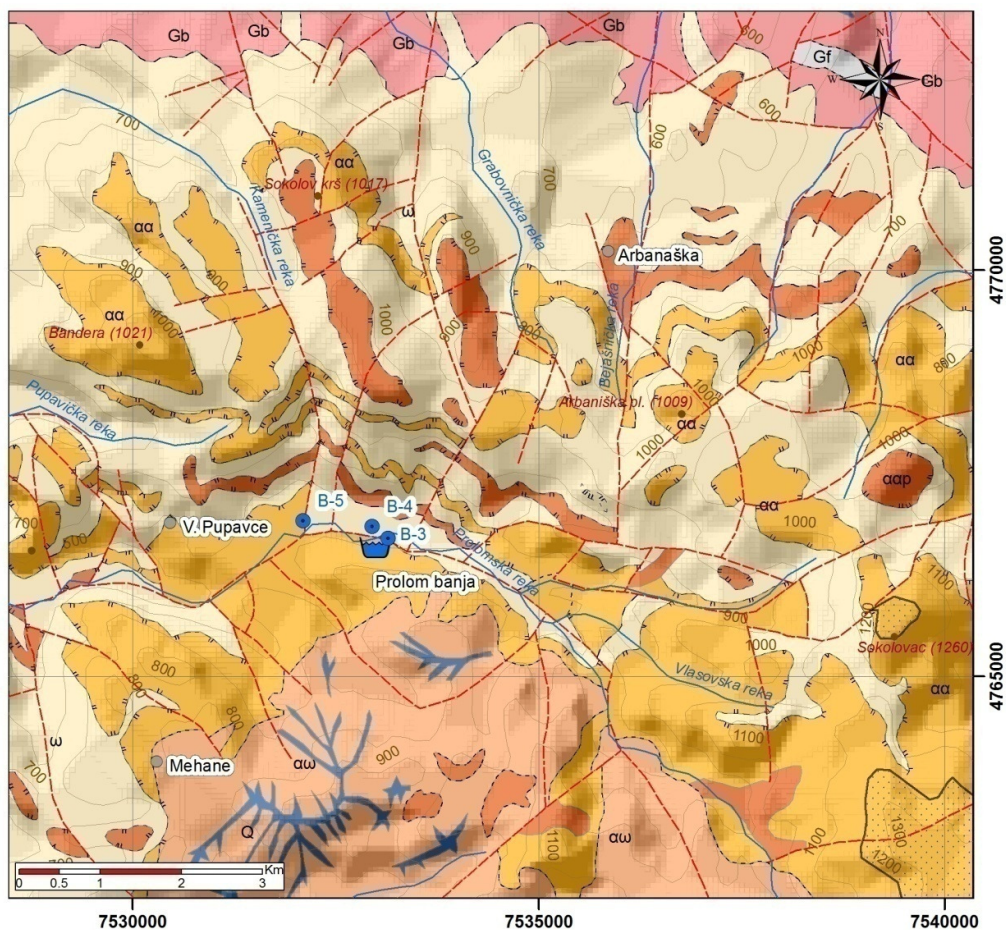
➤ Litostratigrafske jedinice

Najstarije stene na terenu su kristalasti škriljci prekambrijumske starosti koje predstavljaju podinu vulkanskih i vulkanogeno-sedimentnih stena leckog andezitskog masiva. Kristalaste škriljce čine sitnozrni *biotitski gnajsevi (Gb)*, dok se podređeno u proslojcima, slojevima i sočivima javljaju *leptinoliti i mikašisti (Sm)*, *leukognajsevi (Gf)* i *ređe kvarciti (Q)*. Na geološkoj karti (slika 5) ove stene se uočavaju severno od Prolom banje. Geološka građa terena je preuzeta iz Tumača za list Kuršumljia (Malešević i saradnici, 1980).

Ceo kompleks tercijarnih vulkanskih stena se izdvaja kao lecki andezitski masiv, površine oko 700 km². Početak vulkanske aktivnosti dešava se u gornjem oligocenu, što je utvrđeno na osnovu smenjivanja tufova i vulkanskih breča sa sedimentima gornjeg oligocena. Vulkanska aktivnost počinje izlivima amfibolskih andezita, nakon čega nastupa faza snažnog eksplozivnog vulkanizma koji daje ogromne količine piroklastičnog materijala. Nakon toga stvaraju se nove mase andezita, čija se konsolidacija vrši u relativno plitkom nivou, blizu površine terena. Uz nove tektonske pokrete javljaju se novi vulkanski procesi sa novim izlivima i novim količinama piroklastita.

Novointrudovane mase amfibolitskih andezita konsoliduju se u dubljim delovima terena. Poslednja faza vulkanske aktivnosti manifestuje se izlivima i žičanim probojima piroksenskih andezita i andezit-bazalta (Pešut, 1976).

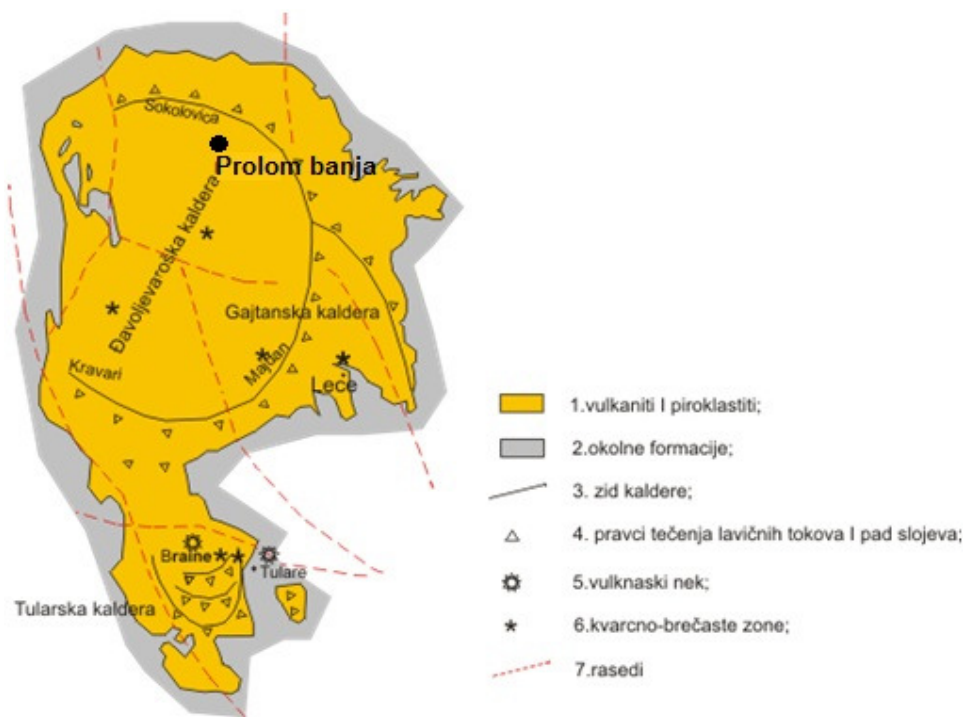
Snažne erupcije piroklastita su ostavile magmatske rezervoare u plitkim delovima zemlje delimično ispražnjene, što je dovelo do formiranja cirkularnih depresija, kaldera (Cvetković, 2004b). U okviru kompleksa izdvajaju se tri kaldere: prolomska, gajtanska i đavoljevaroška (slika 6).



Legenda

- | | | | |
|---------|----------------------------|-----|---|
| --- | Granica, pretpostavljena | ω | Vulkanske breče i tufovi |
| ----- | Granica, fotogeološka | αω | Hidrotermalno promenjeni andeziti |
| ⋯⋯⋯ | Granica izlivnog vulkanita | ααp | Piroksenski andezit |
| - - - - | Rased, pretpostavljen | αα | Amfibolitski andeziti |
| — | <all other values> | Sm | Leptinoliti i mikašisti |
| — | Vodotokovi | Q | Kvarciti |
| ⋯⋯⋯ | Zona prihranjivanja | Gf | Leukognajsevi i leptinoliti |
| | | Gb | Sitnozrni biotitski i dvoliskunski gnajsevi |

Slika 5. Geološka karta šireg područja Prolom Banje
(Malešević i saradnici, 1974; izmenjeno)



Slika 6. Lecki vulkanski kompleks (Malešević i saradnici, 1980; izmenjeno)

Na zastupljenost reaktivnog tipa kaldere, ukazuju kvarcno-brečaste zone, duž kojih je došlo do intenzivnih hidrotermalnih promena stena, najčešće u zoni Leca, Đavolje varoši, Tulara i Kravarskih planina. Ove zone se na terenu manifestuju u vidu rifova i mestimično su otkrivene na grebenima brda. Višefaznost vulkanske aktivnosti potvrđuju i normalno i reversno namagnetisani andeziti kao proizvod najmlađe faze tercijarnog magmatizma (Vukašinović, 2010). Nakon završene vulkanske aktivnosti u području, regionalno izdizanje terena je dostiglo značajan stepen. Intruzijom magme formirana je široka doma, što je uslovalo karakteristično polukružno oblikovanje rečnih dolina Toplice i Tularske reke (Jablanice).

Lecki andezitski masiv izgrađuju pretežno magmatske stene: andeziti, propiliti, daciti, trahiti, piroklastične stene, zatim kvarcno-brečaste zone i sedimentne stene: konglomerati, peščari, laporci i krečnjaci (slika 5).

Andeziti su najzastupljenije stene u masivu sa preko 50% učešća. Koncentrisani su u centralnom delu kompleksa dok ih okružuje široki pojas piroklastičnih tvorevina. Andezitske stene leckog masiva dele se na amfibolske i piroksenske andezite (Pešut,

1976). *Amfibolske andezite* ($\alpha\alpha$) karakterišu krupni fenokristali feldspata i amfibola, dok se mestimično sreću i krupni fenokristali biotita. *Piroksenski andeziti* ($\alpha\alpha\phi$) su manje prisutni, javljaju se u severnom delu masiva, u gornjem toku Prolomske reke i reke Kosanice. Manifestuju se kao mlađe tvorevine u odnosu na amfibolske.

Na osnovu ispitivanja hemijskog sastava varijeteta andezita, hemizam andezitskih stena je vrlo sličan u celom vulkanskom masivu. U oko 150 andezitskih proba određen je sadržaj: SiO₂ oko 60% (sa varijacijama 55 – 60%), Al₂O₃ oko 18%, CaO oko 5,5 %, Na₂O oko 3,5 %, MgO oko 3% i K₂O oko 2 % (Malešević i saradnici, 1980).

Pored "svežih" andezita i kvarc-andezita, u oblasti oko Prolom banje i Mehane pojavljuju se *hidrotermalno izmenjeni andeziti i piroklastiti* ($\alpha\omega$). Alteracija se ogleda u silifikovanju, hloritisanju, sericitisanju, kaolinisanju i drugim promenama. U okviru hidrotermalno promenjenih andezita i piroklastita nalazi se kvarcnobrečasta zona dužine oko 1 km, pružanja JI-SZ. Od nje se upravno granaju tenzione pukotine ispunjene silicijumom. Širina ovih ispunjenih pukotina varira od nekoliko decimetara do nekoliko desetina metara. Sastav silicijumske mase koja ispunjava pukotine kreće se od kompaktne, homogene do brečaste kvarcne mase. Zapažena su i područja izgrađena od šupljikavog ili ispucalog kvarca. Mineralni sastav zone je jednostavan: kvarc, kalcedon, opal, siderit i hematit, odlomci intenzivno hidrotermalno promenjenih K-feldspatskih, silifikovanih stena, sa mestimičnom pojavom Pb-Zn, Cu i Fe sulfida. Sadržaj SiO₂ u ovoj zoni kreće se od 90–97 %, ostatak čini Al₂O₃ i malo K₂O. Oko zone su sve stene intenzivno hidrotermalno promenjene. Karakteristična promena je K-metasomatoza, podređeno silifikacija, a zatim kaolinizacija i sericitizacija (Karamata, 1970).

Daciti, propiliti i trahiti su zastupljeni samo u određenim zonama leckog kompleksa, dok su *piroklastične stene* (ω) predstavljene brečama i tufovima znatno prisutnije.

Kvarcno-brečaste zone su produkti intenzivnih i snažnih tektonskih pokreta. Tektonskim kretanjima stvorene su moćne razlomne strukture od nekoliko stotina metara do nekoliko kilometara. Ovako zdrobljene zone omogućile su cirkulaciju hidrotermalnim rastvorima. Najmlađe tvorevine na terenu su kvartarne starosti, predstavljene aluvijalnim naslagama duž vodnih tokova.

Vulkanogeno-sedimentne stene gornjeg oligocena okrivene su na obodu leckog andezitskog masiva, u jugozapadnom delu. Ove stene leže trangresivno preko kristalastih škriljaca i predstavljene su konglomeratima u smeni sa peščarima, glincima i laporcima. U gornjem delu jedinice se pojavljuju tufovi, tufiti i tufogeni peščari, dok se ponegde javljaju i krečnjaci. Cela jedinica je probijena malim masama amfibolskog andezita uz koje je jače poremećena. Vulkanogeno-sedimentne tvorevine dostižu debljinu do 210 m.

➤ Tektonika

Lecki andezitski masiv se nalazi između dve geotektonske jedinice Srpskog kristalastog jezgra i Vardarske zone, odnosno u prelaznoj zoni koja se naziva i Interna Vardarska zona. Deformacije u podlozi leckog masiva pripadaju variscijskoj orogenezi. Pored antiklinorijuma i sinklinorijuma stvaraju se zone kraljuštanja, dislokacione zone sa nizom razlomnih struktura i mnogobrojni manji razlomi i pukotine. Tokom alpske orogeneze dolazi do regeneracije ovih struktura. Duž postojećih dislokacija dolazi do izliva većih količina andezitske magme sa pratećim piroklastitima. Nakon očvršćavanja andezitskih stena stvaraju se longitudinalne i transferzalne razlomne strukture. Tektonska aktivnost uz privođenje hidrotermalnih rastvora omogućila je stvaranje prostranih zona razlamanja. U labilnim zonama u masivu i podlozi akumuliraju se produkti završnih faza vulkanizma - piroksenski andeziti. Najmlađi tektonski pokreti manifestuju se transferzalnim razlomima i razlomima manjeg obima (Pešut, 1976). Najmarkantiji tektonski oblik na terenu je tupalska dislokacija pravca pružanja SSZ-JJI, a samo stvaranje leckog masiva vezano je za tektonsku aktivnost ove dislokacije. Rasedi upravni na pomenutu dislokaciju razlamaju masiv i dele ga u blokove. Dislokacija pokazuje višefazna kretanja u toku gornjeg paleogena i neogena. Posebno strukturno obeležje čini prisustvo kvarcno brečastih zona, kao proizvod lokalnih pritisaka na dno kaldere, kada je obrazovana brahi-antiforma sa otvorenim sistemom pukotina koje su ispunili silicijumski hidrotermalni rastvori (Malešević i saradnici, 1980).

4.1.3. Hidrogeološke karakteristike terena

Na području Prolom Banje izdvajaju se sledeći tipovi izdani: pukotinski, zbijeni i uslovno bezvodni (Milanović, 2009, fond.dok.).

Pukotinski tip izdani je najznačajniji i u okviru njega se formiraju i hladne i termalne vode. Oblast rasprostranjenja pukotinskog tipa izdani se poklapa sa mlađim izlivima andezita koji nisu zahvaćeni hidrotermalnim promenama. Filtracija vode se odvija kroz sisteme raseda, pukotina i prslina koji se smanjuju sa dubinom. Na osnovu istražnih bušotina ustanovljeno je da se javlja više ispućalih intervala bogatih vodom na različitim dubinama. Kad je visok nivo izdani dobar deo podzemne vode ističe u površinske tokove, dok u periodu minimuma, podzemne vode ističu preko izvora izdašnosti od 0,05 do 1,1 l/s koji su kaptirani za potrebe lokalnog stanovništva. Prolomska reka drenira celo područje Prolom Banje, mada na širem području postoje više stalnih i povremenih reka i potoka, dok se povremeni potoci javljaju nakon obilnijih padavina, kao posledica geološke građe i male vododržljivosti stena). Stalni vodotoci predstavljaju lokalni erozioni bazis za pukotinski tip izdani. Značajan je uticaj hidroloških i hidrografskih uslova na podzemne vode, s tim što se pretpostavlja da je značajan uticaj i na termalne vode.

Hladne vode su prisutne do 100 m, dok se na većim dubinama zahvataju vode povišene temperature. Režim izdani termalnih voda je stabilan.

Zbijeni tip izdani vezuje se za aluvijalne nanose Prolomske reke. Iz zbijenog tipa izdani nisu dobijene značajnije količine podzemnih voda, pa nisu vršena ni detaljnija istraživanja.

Uslovno bezvodne delove terena čine hidrotermalno promenjeni andeziti, vulkanske breče, tufovi i vulkanogeno-sedimentne stene. Prostiranje ovih terena je značajno i po površini terena i po dubini, tako da je produblivanjem bušotine B-4 utvrđeno da su od 200 do 500 m zastupljene stene svrstane u uslovno bezvodne terene. U geotermalnom sistemu ove stene imaju funkciju barijere.

4.1.4. Stanje i kapacitet objekata na području Prolom Banje

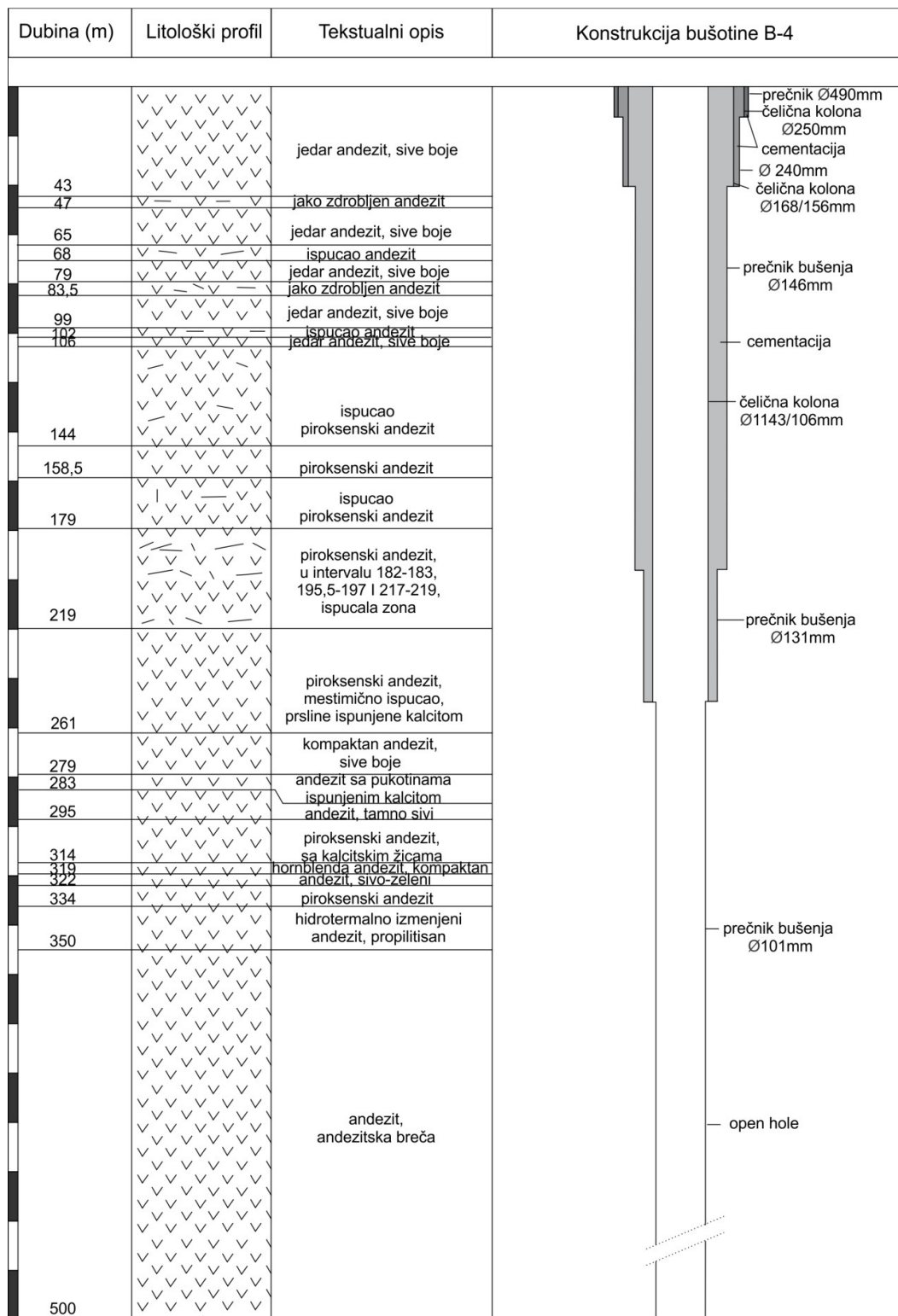
Na području Prolom banje postojao je izvor (Glavni izvor) na kome je isticalo 0,15 l/s vode, temperature 26,4°C. Izvor je kaptiran 1963. godine, kada je podignuto kupatilo sa 3 bazena. Tokom 1981-82. urađene su tri istražne bušotine kroz andezite B-1, B-2 i B-3, ukupne izdašnosti 6 l/s, nakon čega je izvor presušio. U mestu Pupavce (oko 1 km od Prolom Banje) postojao je izvor temperature oko 26°C, izdašnosti 0,2 l/s. Pored izvora, 1986. godine, urađena je bušotina B-5 u cilju dobijanja većih količina vode i viših temperatura (Protić, 1995).

Trenutno se na području Prolom Banje koriste tri bušotine B-3, B-4 i B-5 (slika 5), dok su dve bušotine zatvorene, a prirodni izvori presušili. Bušotina B-1 je zatvorena, zbog problema sa bakteriološkom ispravnošću vode, dok je bušotina B-2 zatvorena zbog postojanja direktne hidrauličke veze sa bušotinom B-4. Stanje i kapacitet voda iz tri bušotine dat je u tabeli 5. Utvrđene rezerve termalnih voda iz tri aktivne bušotine iznose 5,77 l/s (Milanović, 2009, fond. dok.)

Bušotina B-3 je urađena do 160 m kroz andezite, pri čemu je zahvaćeni interval od 129-160 m iz piroksenskih andezita. Temperatura vode je 29,7°C, izdašnost 0,7 l/s.

Bušotina B-4 je prvobitno urađena do 200 m da bi kasnije bila produbljena do 500 m. Nabušeni su andeziti, pri čemu se smenjuju jedri andeziti sa jako zdrobljenim, ispucalim andezitima, dok se od stotog metra javljaju piroksenski andeziti pretežno ispucali sa pukotinama i prslinama. Od 350 m do 500 m nabušeni su andeziti i andezitske breče, pri čemu je presečena kaverna (slika 7). Produbljavanjem je izdašnost povećana za 0,2 l/s tako da je danas izdašnost 0,8 l/s, a temperatura je povećana za 3°C (danas je temperatura bušotine B-4 33°C).

Bušotina B-5 u Pupavcu je izgrađena u blizini pojave prirodnog izvora. Prirodni izvor Pupavac javljao se u samom rasedu. Bušotina B-5 je dubine do 200 m sa 3 zahvaćena intervala od 96-111 m, 126-152 m i 174-184 m iz ispucalih, hidrotermalno izmenjenih andezita. Izdašnost bušotine je oko 4,3 l/s, temperature oko 32°C.



Slika 7. Litološki stub i konstrukcija bušotine B-4 u Prolom Banji (Milanović, 2009, fond. dok; izmenjeno)

Voda iz bušotine B-5 se flašira pod nazivom “Prolom voda”, dok se višak vode cevovodom odvodi u rezervoar u banji, u kome su zahvaćene vode iz bušotina B-3 i B-4. Ove vode se koriste za u balneologiji i za potrebe vodosnabdevanja. Višak voda ističe na banjskoj česmi (slika 8).



Slika 8. Česma u Prolom Banji
(foto: Petrović Pantić, 2011)

Tabela 5. Pregled hidrogeoloških pojava na području Prolom Banje (prema podacima: Protić, 1995, Milanović, 2009, fond. dok.)

Objekti	temperatura t (°C)	kapacitet Q (l/s)	dubina H (m)	vrsta hidrogeoloških pojava	status
B-1				bušotina	zatvorena
B-2				bušotina	zatvorena
B-3	29,7	0,7	160	bušotina	B, V
B-4	33	0,8	500	bušotina	B, V
B-5	30	4,3	200	bušotina	F, B, V

Legenda: B-balneologija; V-vodosnabdevanje; F-flaširanje

4.2. RIBARSKA BANJA

4.2.1 Opšte karakteristike Ribarske Banje

Ribarska Banja nalazi se u centralnom delu Srpskog kristalastog jezgra (slika 9), na 540 m nadmorske visine. Banja se pruža na severoistočnim padinama Velikog Jastrepca, gde su najviši vrhovi Đulica (1491 m.n.v.) i Pogled (1482 m.n.v.). Severoistočno od banje nalazi se aleksinačka kotlina na 350 m.n.v. Najbliži grad je Kruševac, udaljen od banje 34 km. Područje odlikuje umereno-kontinentalna klima sa prelazom ka planinskoj klimi. Za period od 1970-1984. na kišomernoj stanici Jastrebac (podaci RHMZ-a), utvrđena je srednja višegodišnja količina padavina od 89,5 mm, sa maksimalnim količinama padavina u maju, junu i novembru (tabela 6).



Slika 9. Geografski položaj Ribarske Banje

Hidrografska mreža je dobro razvijena sa brojnim potocima i rečicama. Najznačajniji vodotok predstavlja Ribarska reka. Ribarska reka se formira od Banjskog potoka, koji protiče kroz banju, i Goleme reke a nedaleko od banje u Ribarsku reku uliva se i Srdaljska reka. Reke su promenljivog proticaja tokom godine i bujičnog karaktera.

Tabela 6. Maksimalne, minimalne i srednje vrednosti mesečnih suma padavina (mm) na kišomernoj stanici Jastrebac 1970-1984 (RHMZ)

	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec	Prosek
Min	46	25	20	37	28	50	36	37	21	36	7	22	30,4
Max	163	158	195	189	251	196	124	183	152	120	296	266	191,1
Sr	93	72	91	93	110	110	81	81	72	69	104	98	89,5

4.2.2 Geološke karakteristike područja Ribarske Banje

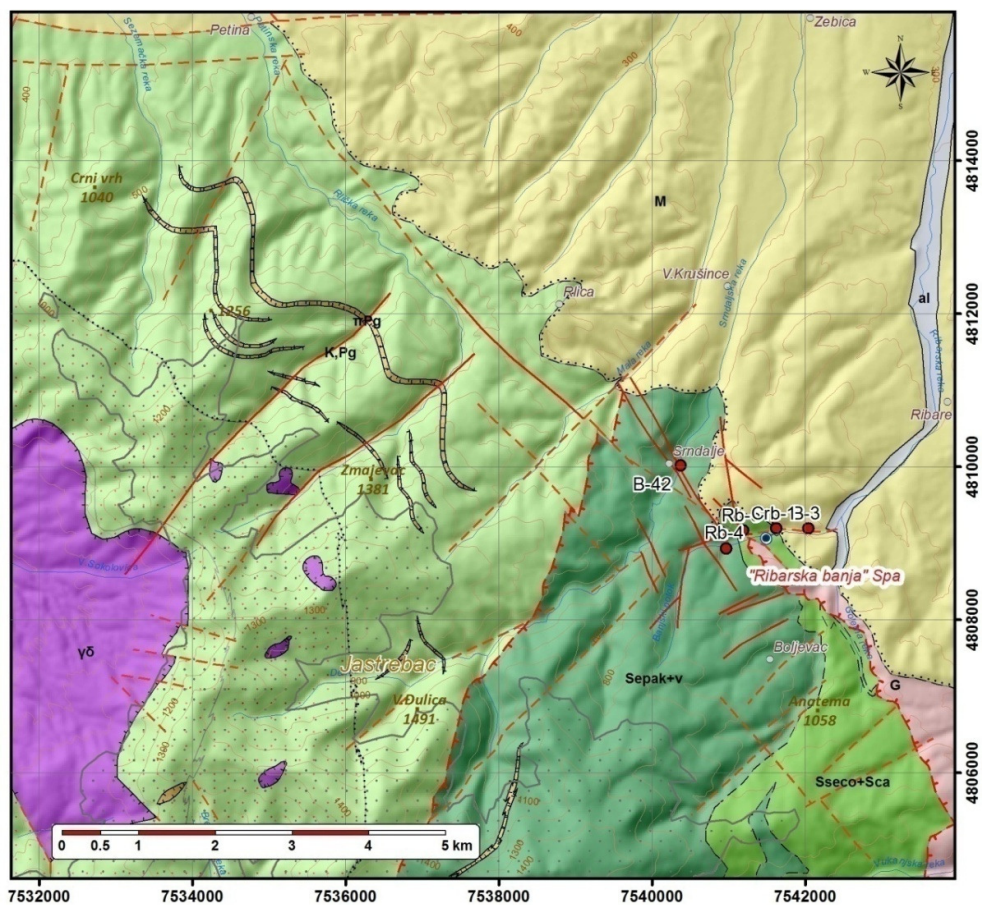
➤ Istorija stvaranja terena

Istorijski razvoj geologije terena zabeležen je u Elaboratu o geotermским istraživanjima na području Ribarske Banje (Milovanović, 1978, fond. dok.).

„Pre perioda krede na sadašnjem području Jastrepcā postojalo je relativno usko međukontinentalno more okeanske dubine. U dnu mora u međukontinentalnom tlu, utisnuti su gabrovi kao intruzivni ekvivalenti bazalnog sloja zemljine kore. U vodenoj sredini preko gabrova taloženi su laporovito-glinoviti sedimenti sa neizmeničnim vulkanskim izlivima bazične lave, tako je nastajala serija hloritskih škriljaca i spilita. Preko njih po prestanku submarinske vulkanske aktivnosti, taloženi su sedimenti od kojih su nastajali sericitsko-hloritski škriljci sa proslojcima mermera. Preko ovih su kasnije, u već tektonski nemirnoj sredini nataloženi debeli sedimenti fliša od kojih su postali sadašnji metapeščari i sericitski škriljci. Krajem perioda krede i u paleogenu došlo je do faze intenzivnih tektonskih pokreta i pojačane magmatske aktivnosti kada su pokrenute magmatske mase utisnute kroz gabro i sedimentni kompleks iznad njega. Utisnuta je masa granitodiorita čiji je apikalni deo otkriven na Ravaništu. Tada je sedimentni flišoliki kompleks pretrpeo visok stepen regionalnog metamorfizma i pretvoren u različite varijetete škriljaca. Istovremeno ili kasnije izvršeno je i glavno modeliranje konstrukcije terena, kada je jakim radom geodinamičkih sila došlo do razlamanja stenskih masa, guranja i navlačenja velikih blokova jednih preko drugih, odnosno starijih preko mlađih.“

➤ Litostratigrafske jedinice

Geološku građu terena (slika 10) karakteriše prisustvo dve krupne litostratigrafske celine koje su u inverznom položaju i tektonskom kontaktu. U donjem delu su gornjokredne i kredno-paleogene niskometamorfne stene, preko kojih su navučeni kristalasti škriljci visokog stepena metamorfizma. U kredno-paleogeni metamorfni kompleks utisnut je paleogeni granitoid Jastrepcā (Rakić i saradnici, 1976; Spahić, 2006, fond. dok.; Marović et al, 2007).



Legenda

- | | |
|------------------------------------|---|
| — Granica, utvrđena | al, Aluvijum |
| - - - Granica, pretpostavljena | M, Peščari, konglomerati, gline i tufovi |
| Granica, postepena | M, Gline, peskovi i šljunkovi |
| - - - - - Transgresivna granica | πPg, Granodiorit-porfiriti |
| - - - - - Granica magmatskog tela | γδ, Granodiorit |
| — Rased, utvrđen | K,Pg, Peščari, konglomerati, filiti i gline |
| - - - Rased, pretpostavljen | K-Pg, Kontaktno-metamorfne stene |
| - - - - - Navlaka, pretpostavljena | Sscco+Sca, Sericitski, albit-sericitski i sericit-hloritski škriljci |
| — Reke | Sepak+v, Aktinolitski, albit-hloritski i epidot-aktinolitski škriljci |
| ☐ Zona prihranjivanja | G, Gnajsevi |

Slika 10. Geološka karta šire okoline Ribarske Banje (Rakić i saradnici, 1969; Krstić i saradnici, 1974, Spahić, 2006, fond. dok.; izmenjeno)

Kristalastu osnovu čine dva krupna kompleksa stena: gnajsevi i zeleni škriljci.

Gnajsevi (G) su otkriveni u jednom iskidanom i nepravilnom nizu pružanja SZ-JI počev od sela Srndalja pružajući se dalje ka jugu. U tektonskom kontaktu su sa podinskim zelenim škriljcima, a preko njih leže miocenski klastiti, pliokvartarne tvorevine i deluvijalna (deluvijalno-proluvijalna) raspadina kvartarne starosti. Zastupljeni su trakasti, ređe masivni varijeteti gnajseva. Mikroskopska istraživanja su pokazala da je reč o paragnajsevima obrazovanim na temperaturi od oko 500°C (Spahić, 2006, fond. dok.).

„*Zeleni škriljci*“ koji se odnose na nisko do srednje metamorfisanu vulkanogeno-sedimentnu formaciju sa jako istaknutom promenom petrografskih članova, imaju značajno rasprostranjenje u području Ribarske Banje. Zeleni škriljci se mogu grupisati u tri celine; donji, srednji i gornji paket. Donji i srednji paket pomenutih škriljaca su u invernsnom položaju prema gornjem paketu.

Donji paket izgrađen je *epidot-aktinolit*skih, *epidot-hlorit*skih i *hlorit*skih *škriljaca (Sepak)* i *metagabrova (v)*. Ova jedinica je verovatno nastala metamorfizmom gabroidnih stena i tvorevina spilit-keratofirske asocijacije uz intenzivnu karbonitizaciju i serpentinizaciju. Boje su svetlo sivozelene do tamno zelene. Metagabrovi grade brojne sočivaste zone zapadno, severozapadno i jugozapadno od Ribarske Banje. Sivozelene su do tamnozelene boje.

Srednji paket izgrađuju *sericit*ski, *kvarc-sericit*ski, *sericit-hlorit*ski i *kvarc-muskovit*ski *škriljci (Sseco)*, *kalkšisti* i *mermeri (Sca)*. Stene ove formacije javljaju se severno od Banjskog potoka u pravcu Srndalja, a starost im je određena nalaskom brojnih palinomorfi, kao gornjokredna. U okviru srednjeg paketa javljaju se kalkšisti i mermeri (Sca) u vidu tektonski dislociranih i transportovanih pojaseva zajedno sa različitim tipovima sericit>skih škriljaca.

Najviši nivo „zelenih škriljaca“ (gornji paket), tzv. član Đulice (Spahić, 2006 fond. dok.), otkriven je zapadno od Ribarske Banje gde je predstavljen *filitima*, *metamorfisanim peščarima*, *metaalevrolitima (K-Pg)*, kao i nemetamorfisanim stenama (*konglomerati* i *peščari K-Pg*). Ove tvorevine su konstatovane istražnim bušenjem u Ribarskoj Banji. U bušotinama RB-4 i RB-5 pored filita i filito-argilošista

na nekoliko mesta konstatovani su metapeščari, metaalevroliti, pa čak i konglomerati i peščari (u RB-4 između 725 i 750 m i RB-5 između 709 i 741 m) koji takođe pripadaju ovom paketu. Iz filita su određene brojne palinomorfe koje ukazuju na njihovu gornjokrednu starost. Deo paketa neposrednu uz granodiorit Jastrepca *kontaktno je metamorfisan (K-Pg)*.

Granitoid Velikog Jastrepca ($\gamma\delta$) nalazi se zapadno od Ribarske Banje. U morfostrukturnom pogledu izdignut je između spuštenih područja topličke neogene depresije na jugu i kruševačkog basena na severu. Nastao je utiskivanjem granodioritskog plutona u gornjokredne i paleogene sedimente koji su pritom periklinalno zasvođeni. Predstavlja u velikoj meri homogeno magmatsko telo koje je mestimično ispresecano žicama aplita, pegmatita, granodioritporfira i latita. *Žični pratioci granodioritske intruzije (πPg)* se zapažaju u metamorfnom pojasu oko samog intruziva, naročito u njenom istočnom delu.

Tvorevine sedimentnog pokrova predstavljene su miocenskim naslagama Kruševačkog neogenog basena i najmlađim *aluvijalnim naslagama (al)*.

Miocenske naslage (M) zastupljene su žučkastim, slabo vezanim peščarima, peskovima, peskovitim glinama i konglomeratima. Otkrivene su u jednom dubokom zaseku bezimenog potoka severoistočno od Ribarske Banje, a konstatovane su i u bušotinama RB-2 (od 4-25 m) i RB-3 (od 18-130 m). Leže transgresivno preko metamorfnih stena, a prekrivene su relativno debelim proluvijalnim tvorevinama pliokvartara.

Kvartarne naslage u području Ribarske Banje predstavljene su deluvijalno-proluvijalnim, deluvijalnim, proluvijalnim i aluvijalnim nanosima.

➤ **Tektonika**

Na osnovu brojnih informacija o osnovnim elementima sklopa (folijacije, pukotine, rasedi) čijom je obradom omogućeno sagledavanje tektonskih odnosa, danas se jasno mogu prepoznati tri strukturno homogene celine: donja, srednja i gornja (Đoković i Marović, 2003, fond. dok.; Marović et al, 2007)

Donji strukturni sprat izgrađen je od gornjo-krednih i kredno-paleogenih metamorfisanih stena u koje je utisnut paleogeni granitoid. Ove stene predstavljaju: epidot-aktinolitski, epidot-hloritski škriljci i metagabrovi, sericitski, kvarc-sericitski, sericit-hloritski škriljci, kalkšisti i mermeri.

Srednji strukturni tip izgrađen je od proterozojskih gnajseva. Donji i srednji strukturni sprat su u inverznoj poziciji.

Gornji strukturni sprat izgrađuju neogeni i kvartarni sedimenti. Sudeći po susednim terenima, van istražnog prostora, može se pretpostaviti da neogene i pliokvartarne tvorevine blago tonu ka severoistoku i sever-severoistoku.

Rasedni sklop je analiziran generalno za čitavo područje, jer je utvrđeno da ove strukture presecaju sve strukturne spratove. Statističkom obradom pružanja raseda izdvojena su dva dobro izražena sistema pružanja SZ-JI i ISI-ZJZ (Đoković i Marović, 2003, fond. dok).

Prvi sistem raseda pružanja SZ-JI markira u najvećoj meri dislokacionu zonu Vukanja. Reč je o intermitentnoj zoni razlamanja (prvo reversnoj, a onda gravitacionoj) formiranoj u kontaktnoj zoni gnajseva i migmatitskih gnajseva (koji su van istražnog prostora), koju prate i drugi slični rasedi pre svega oni u kontaktnoj zoni gnajseva i „zelenih škriljaca“. Kontaktna zona je označena markantnim pojasom milonitizacije posebno u gnajsevima (Đoković i Marović, 2003, fond. dok). Vukanjski rased ograničava blok Velikog Jastepca sa njegove istočne i severoistočne strane.

Preferirani pravac pružanja raseda ISI-ZJZ najvećim delom je posledica merenja u domenu Banjskog raseda. To je složena dislokaciona zona koja je trasirana mestimično i sa dva i tri raseda i pojasom drobljenja širine više metara. Duž ove zone nalaze se mikrolokacije bušotina sa termalnom vodom. Pozicije raseda su dosta dobro potvrđene i geofizičkim ispitivanjima. Rezultati ovih ispitivanja pokazuju da rasedne površi iz pomenute zone razlamanja strmo padaju prema sever-severozapadu (70-80°). Rasedna zona je nabušena u bušotinama CRB-1 i RB-2. Za ovu zonu se vezuje i isticanje termalnih voda (Špadijer i saradnici 2005, fond. dok.; Živanović i saradnici, 2010).

➤ **Tektonski sklop užeg područja Ribarske Banje**

Tokom 2002. godine urađena je Studija strukturnog sklopa Ribarske Banje, od strane stručnjaka Rudarsko-geološkog fakulteta i DP „Geozavoda“ (Trivić, 2002, fond. dok.). Studija je obuhvatila područje od 16 km².

Na terenu su vrlo jasno izraženi najmlađi rasedi pružanja SZ-JI. Ove rupture prate tektonizirane zone koje karakterišu sistemi ruptura na metarskim rastojanjima, na širini do 50 m i sa rasednim brečama do 1 m. Breče su uglavnom zapunjene materijalom iz okolnih stena povezanih laporovito-glinovitim komponentom. U neposrednoj blizini banje zapaža se rasedna zona širine 10-15 m, lokalno i do 40 m, pravca S-J. Zonu karakterišu breče do 0,5 m, dok u pojedinim zonama uočava se procurivanje vode. Ovi rasedi se seku sa rasedima pravca pružanja I-Z, što je uočljivo u Banjskom potoku. Najstariji sistem raseda pravca ISI-ZJZ najbolje su razvijeni na prostoru Banjskog potoka, Boljevačke reke i Goleme reke.

4.2.3 Geofizička istraživanja

Na području Ribarske Banje primenjene su geofizičke metode u cilju određivanja najperspektivnijih zona u kojima se mogu očekivati značajnije količine termalnih voda.

Geofizička ispitivanja (Milojević, 2004, fond. dok.) obuhvatila su ispitivanje Bugeovih anomalija sile zemljine teže (g), terestička ispitivanja geomagnetnih anomalija vertikalne komponente (Z), totalnog vektora zemljinog magnetnog polja (ZMP), određivanje aeromagnetnih anomalija totalnog vektora zemljinog magnetnog polja (T) i geoelektrična istraživanja.

Najveće vrednosti negativnih Bugeovih anomalija utvrđene su na području granitoida Velikog Jastrepa. Negativne vrednosti zabeležene su i na potezu od Petine do Ribarske Banje, kao posledica deponovanje tektonski razlomljenog granitoida u rovu ili verovatnije posledica neotkrivenih apofiza koje predstavljaju deo granitoida Velikog Jastrepa. Na ovo ukazuju i manje mase granitoida prikazane na OGK list Kruševac.

Izradom *geomagnetne karte*, najveće vrednosti anomalija pozitivnog znaka vertikalne komponente magnetnog polja, intenziteta preko 100 nT, uočene su na potezu Petina-Ribarska Banja. Pretpostavka je da su ove anomalije posledica zapunjavanja tektonskog rova u toku svoje evolucije delovima magnetičnih stena ili postojanja visoko magnetičnog intruziva na velikoj dubini u domenu registrovanog tektonskog rova. Ovaj intruziv je sastavljen od bazičnih i ultrabazičnih stena, moguće gabra, čiji se manji delovi pružaju u vidu apofiza u domenu Lomnica – Petina i Ribarska Banja.

Aeromagnetna istraživanja (Vukašinić, 2010) ukazuju na postojanje tri pozitivne anomalije na širem području Ribarske banje. Najveća anomalija pravca pružanja SZ-JI zabeležena je u zoni Lomnica-Petina-Ribarska Banja. Uzročnik anomalije je bazična ili ultrabazična stena, serpentiniti ili gabra, koji se nalaze na dubinama preko 2 km ispod Petine. Druga anomalija, lučno povijena ka Ribarskoj Banji konstatovana i na prostoru južno i jugoistočno od granodiorita Velikog Jastrepa. Treća anomalija je konstatovana na području Kulinske banje, istočno od Ribarske banje i ukazuje takođe na postojanje dubokog magnetičnog bazičnog ili ultrabazičnog tela. Podaci aeromagnetnih istraživanja ukazuju da se termalne vode Ribarske banje greju pod uticajem dva intruziva. Dominantni intruziv zaleže duž trase Petina-Lomnica-Ribarska Banja, dok regionalni rased Petina-Ribarska Banja predstavlja put kojim termalne vode iz ovog pravca dospevaju do Ribarske banje. Drugi intruziv koji se nalazi južno ili jugoistočno od granitoida Velikog Jastrepa je lučnog oblika ka Ribarskoj Banji gde u samoj banji, seče strukturu Petina – Ribarska Banja donoseći deo termalnih voda Ribarske banje (Milojević, 2004, fond. dok.). Treća anomalija je najverovatnije prouzrokovala povišenu temperaturu podzemnih voda (19,5°C) na području Kuline.

Na osnovu primenjenih geofizičkih metoda, Milojević (2004, fond. dok.) iznosi dve koncepcije porekla termalnih voda:

- I. Termalne vode Ribarske Banje povišenu temperaturu dobijaju od intruziva Velikog Jastrepa. Apofize intruziva zaležu pod azimutom od 45° u pravcu SI, a tople vode se prenose duž sistema raseda.
- II. Termalne vode Ribarske Banje greju se pod uticajem intruziva čija se najveća masa nalazi u domenu (Petina-Lomnica), a koji se, sužavajući se, prostire do

Ribarske Banje. Regionalni rased Petina-Ribarska Banja predstavlja put kojim termalne vode dospevaju u domen Ribarske Banje.

Geoelektrične metode obuhvatile su primenu geoelektičnog kartiranja i geoelektičnog sondiranja. Geoelektično kartiranje primenjeno je su u cilju identifikovanja raseda i rasednih zona, pravca njihovog pružanja i pada na području banje, dok je geoelektično sondiranje Specifične Električne Otpornosti (SEO) primenjeno u cilju određivanja debljina sedimentnog pokrivača i stvarnog geološkog sklopa terena.

Na osnovu datih istraživanja utvrđeno je postojanje više rasednih struktura paralelnih Banjskom potoku, od kojih je najznačajniji rased azimuta pružanja 80° - 260° , sa padnim uglom od 75°C do dubine od 75 m, i od 90°C posle 75 m koji je najbliži uz Banjski potok.

4.2.4 Hidrogeološke karakteristike terena

Na istražnom prostoru se izdvajaju zbijeni i pukotinski tip izdani, dok se uočavaju i uslovno bezvodni delovi terena.

Zbijeni tip izdani formiran je u rastresitim peskovito-šljukovitim naslagama Banjskog potoka sa krupnim blokovima od škriljaca i granitoida, debljine manje od 3,0 m. Nivo podzemnih voda je u direktnoj hidrauličkoj vezi sa površinskim vodama. Mala površina rasprostranjenja i mala debljina aluvijalnih naslaga ne omogućava akumuliranje značajnijih rezervi podzemnih voda u okviru ove izdani.

Pukotinska izdan formirana je u stenama gornjokredno-paleogenog metamorfisanog kompleksa i u granitoidima Jastrepcu. Litološki sastav i intenzitet ispucalosti stenskih kompleksa omogućuje da se generalno u okviru pukotinske izdani izdvoje tri podtipa izdani: pukotinska izdan u granitoidnim stenama, pukotinska izdan u gornjem paketu slabo metamorfisanih i nemetamorfisanih stena klastičnog karaktera i pukotinska izdan u donjem i srednjem paketu metamorfisanih stena gornjekredno-paleogene starosti.

- *Pukotinska izdan u granitoidima Jastrepcu.* O hidrogeološkim svojstvima granitoidnih stena Jastrepcu nema podataka. Analogijom sa sličnim granitoidnim

masivima, može se pretpostaviti da je izdan formirana uglavnom u plićim nivoima masiva, a da se sa dubinom smanjuje pukotinska poroznost, a samim tim i vodonosnost ovih stena. U konkretnom slučaju, granitoidne stene predstavljaju podinsku barijeru podzemnim vodama iz gornjeg paketa kredno-paleogenog delimično metamorfisanog kompleksa.

- *Pukotinska izdan u gornjem paketu slabo metamorfisanih i nemetamorfisanih stena klastičnog karaktera (filiti, metamorfisani peščari, metaalevroliti, konglomerati, peščari K-Pg)* odlikuje se znatno boljim hidrogeološkim svojstvima. Izdan se prihranjuje infiltracijom površinskih voda i voda nastalih od atmosferskih taloga u obodnim delovima jastrebačkog granitoida (slika 10). Sistemom raseda i većih otvorenih pukotina deo ovih voda cirkuliše ka Ribarskoj Banji, usput se zagrevajući. Isticanje podzemnih voda u delovima izdani iznad lokalnog erozionog bazisa vezano je za izvore manje izdašnosti, obično manje od 0,1 l/s. Deo izdani ispod lokalnog erozionog bazisa u prirodnim uslovima drenirao se u dolini Banjskog potoka preko termalnih izvora temperature do 38°C koji su funkcionisali do izrade bušotina. Danas se isticanje voda ove izdani vrši preko bušotina sa termalnom vodom.

- *Pukotinska izdan u stenama donjeg i srednjeg kredno-paleogenog kompleksa (Sseco, Sca)* ima značajno rasprostranjenje u širem području Ribarske banje i u samoj banji. Na osnovu litološkog sastava, stepena ispucalosti i metamorfizma, stene donjeg i srednjeg paketa generalno se odlikuju slabijim hidrogeološkim svojstvima u odnosu na gornji paket delimično metamorfisanih i nemetamorfisanih klastičnih stena. Mestimično se u ovom paketu javljaju manje izdani i to u mermerima i kalkšistima. No generalno gledajući, u odnosu na podzemne vode u pukotinskoj izdani gornjeg paketa, kompleks donjeg i srednjeg paketa predstavlja barijeru uzlaznom kretanju podzemnih voda, obično povišenih temperatura. Duž rasednih zona u dolini Banjskog potoka, dolazilo je do isticanja manjih količina termalnih voda na površinu terena.

Uslovno bezvodni delovi terena predstavljeni su prekambrijumskim gnajsevima i miocenskim sedimentima, istočno i severoistočno od Ribarske Banje. Gnajsevi mogu biti intenzivno ispucali i raspadnuti u pripovršinskim zonama, a u njima lokalno mogu biti formirane izdani siromašne podzemnim vodama. Iz ovih izdani mestimično ističu izvori izdašnosti manje od 0,01 l/s. Tokom dužih sušnih perioda izvori često

presušuju. Generalno, prema hidrogeološkim svojstvima ovaj kompleks stena predstavlja barijeru kretanju izdanskih voda iz pukotinskih ili aluvijalnih izdani, pa se može svrstati u bezvodne, slabo vodopropusne terene. Kad su u pitanju miocenske naslage, istražnim bušenjem u neposrednom području Ribarske banje, konstatovano je da su one dosta glinovite i bezvodne. Istočno od istražnog područja u miocenskom kompleksu formirani su arterski vodonosni horizonti.

4.2.5 Stanje i kapacitet objekata na području Ribarske Banje

Osam prirodnih izvora lekovitih svojstava obeležili su početak razvoja Ribarske Banje. Izvori su bili raspoređeni na različitim nadmorskim visinama duž Banjske reke. Izdašnosti izvora je bila od 0,05 do 1,5 l/s, temperature od 38°C (Glavni izvor je bio najveće izdašnosti, isticao je na najvišoj n.v.), do 16°C (izvor na najnižoj n.v.), koji je služio i za piće (Protić, 1995). Od 1969. počinju intenzivnija geološka, geofizička i hidrogeološka istraživanja područja od strane Geozavoda i Rudarsko-geološkog fakulteta, u cilju povećavanja kapaciteta izvorišta Ribarske Banje i pronalaženja toplijih voda. U periodu od 1967-1987. godine izbušene su tri istražne bušotine Rb-1, Rb-2, Rb-3, 42 plitke bušotine od 20-100 m, zatim tri eksploatacione bušotine CRB-1 (163 m), Rb-4 (852 m) i Rb-5 (1543 m).

Trideset i šest bušotina izbušeno je u cilju određivanja geotermalnih i toplotno-fizičkih parametara, pri čemu su 25 dubine do 20 m, 4 do 40 m, 4 do 70 m i 3 bušotine do 100 m (Milovanović, 1978, fond. dok.). Dve bušotine imaju hidrogeološku funkciju tako da je bušotina u Boljevcu uključena u sistem vodosnabdevanja banje, a iz bušotine u Srdalju B-43 dobijena je voda povišene temperature.

Početak sedamdesetih, izbušena je eksploataciona bušotina **CRB-1** do 163 m, pri čemu je presečena rasedna zona u intervalu 53-145 m. Početna izdašnost bunara na samoizlivu iznosila je 15 l/s, temperature 41°C. Eksploatacijom voda iz CRB-1, prirodni izvori su presušili. Na osnovu hidrodinamičkih istraživanja od 2003-2009 (Živanović i saradnici, 2010) temperatura CRB-1 je 38,5°C, kapaciteta na samoizlivu 9,5 l/s.

Bušotina **RB-4** izbušena je 1981. godine do 852 m, sa četiri vodonosnih intervala od 580-832 m, temperature od 35 do 58,6°C u najdubljem intervalu, odnosno izlazne temperature 41,5°C, pri kapacitetu od 3,3 l/s).

Bušotina RB-1 je proširena i produbljena do 1545 m i danas je to bušotina **RB-5** (slika 13). Zahvaćeno je više vodonosnih intervala ispod 600 m. Najviša temperatura od 72°C zabeležena je na najnižem produktivnom intervalu od 1178 m. Maksimalni kapacitet bušotine je 9,2 l/s, dok je prosečan kapacitet 5,8 l/s, srednje temperature 54°C (Živanović i saradnici, 2010). Vode iz bušotine RB-4 (slika 11) i RB-5 (slika 12) su u međusobnom hidrauličkom kontaktu.

Bušotina **RB-2** se nalazi u neposrednoj blizini CBR-1, ima funkciju osmatračkog objekta.

Bušotina **RB-3** nalazi u širem području banje, izbušena je do 278 m, pri čemu je dobijeno 3,5 l/s vode, temperature 26°C.

Danas se u banji vode koriste četiri bušotine za potrebe rehabilitacionog centra, za bazene, grejanje i kao sanitarna voda, a od 2011. otvoren je i novi Wellness Spa centar (tabela 7). Ukupno procenjene rezerve Ribarske Banje su 27,5 l/s (Živanović i saradnici, 2010).



Slika 11. Bušotina RB-4
(foto: Petrović Pantić, 2011)

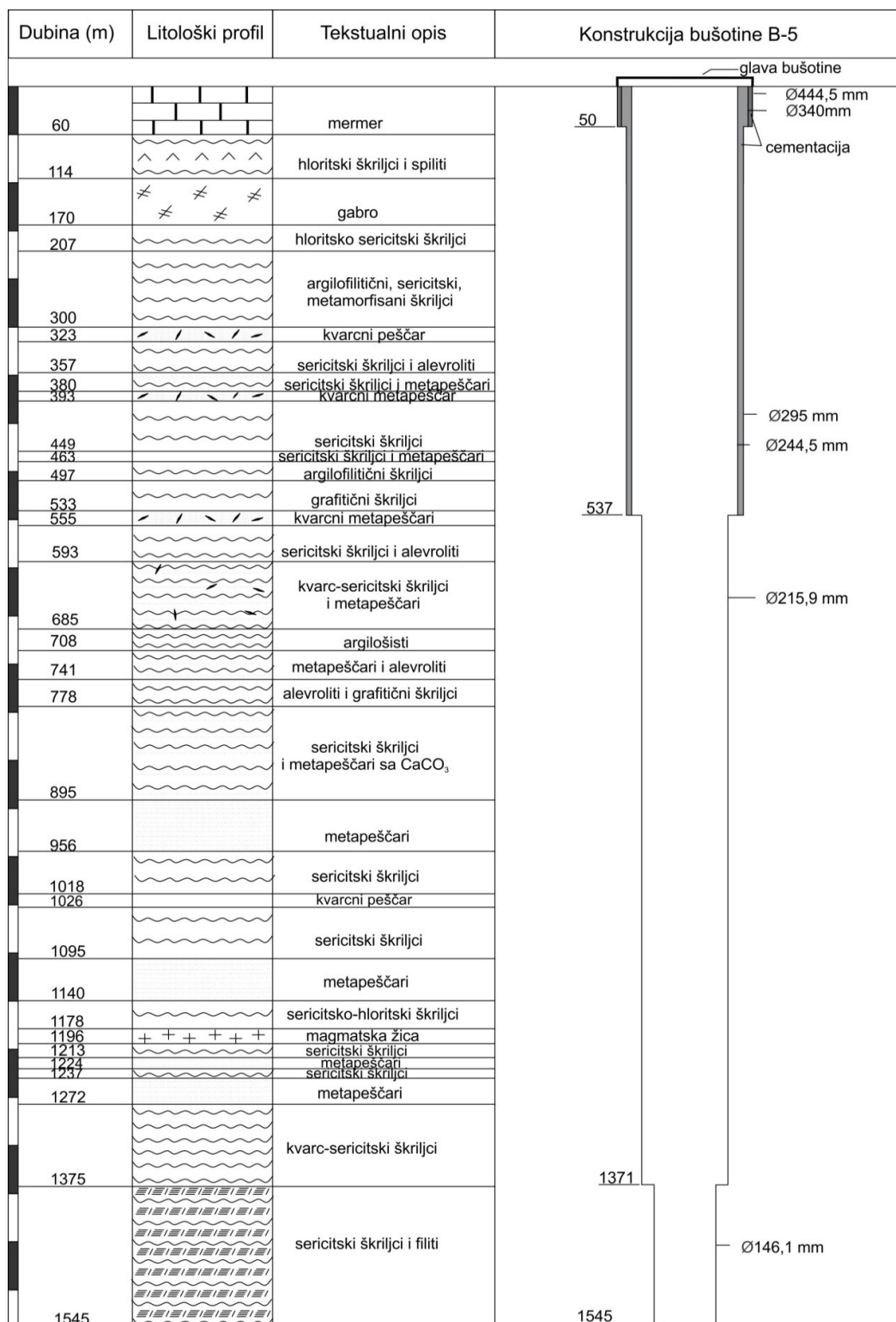


Slika 12. Bušotina RB-5
(foto: Petrović Pantić, 2011)

Tabela 7. Pregled hidrogeoloških pojava na području Ribarske Banje (prema podacima: Milovanović, 2001, fond. dok; Živanović i saradnici, 2010)

Objekti	temperatura t (°C)	kapacitet Q (l/s)	pritisak p (bar)	dubina H (m)	vrsta hidrogeoloških pojava	status
Prirodni izvori	16-38	2			izvor	presušili
Rb-1	21	2	0,45	100	bušotina	danas RB-5
Rb-2	32	9	2,75	125	bušotina	osmatračka
Rb-3	26	5,5	3,2	278	bušotina	R
CRB-1	38,7	9,5	2,8	163	bušotina	B
Rb-4	41,5	3,3	5,35	852	bušotina	R
Rb-5	54	9,2	5,85	1543	bušotina	B, G, S

Legenda: R-rekreacija; B-balneologija; G-direktno grejanje objekata, S –sanitarna topla voda



Slika 13. Litološki stub i konstrukcija bušotine B-5 u Ribarskoj Banji (Milovanović, 2001, fond. dok.; izmenjeno)

4.3. SIJARINSKA BANJA

4.3.1 Opšte karakteristike Sijarinske Banje

Sijarinska Banja se nalazi na jugu Srbije (slika 14), opština Medveđa, na 52 km jugozapadno od Leskovca. Smeštena je na oko 420 m.n.v. u klisurastoj dolini Banjske reke. Banja se nalazi na obroncima planine Goljak, u podnožju visova Kale (750 m.n.v), Guri Bungaja (745 m.n.v), Tupalskog Visa (913 m.n.v) i Gurigata (630 m.n.v).

Klima je subalpska, sa toplim letima i blagim zimama. Srednje višegodišnja temperatura vazduha je 9,8°C.

Prosečna višegodišnja količina padavina zabeležena na kišomernoj stanici u Leskovcu je 49,8 mm (na osnovu podataka RHMZ-a). Najveće količine padavina izluče se u junu mesecu (tabela 8).

Kroz banju protiče Banjska reka, koja je desna pritoka Jablanice. Banjska reka odlikuje se bujičnim karakterom.



Slika 14. Geografski položaj Sijarinske Banje

Tabela 8. Maksimalne, minimalne i srednje vrednosti mesečnih suma padavina (mm) na kišomernoj stanici Leskovac u periodu od 1961 do 2010 (RHMZ)

	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec	Prosek
Min	0	6,2	7	13,1	16,1	8,4	1,2	0	1	0,1	3,9	0	4,75
Max	112,3	91,3	122	92,5	144,3	178,5	126	140,4	186	121,2	156	108,7	131,6
Sr	39,1	42,7	46,3	52,2	60,2	68,7	46,2	42	50,7	40,1	60	49,9	49,84

4.3.2 Geološke karakteristike područja Sijarinske Banje

➤ Litostratigrafske jedinice

Širu okolinu Sijarinske Banje izgrađuju gnajsevi, vulkanogene i vulkanogeno-sedimentne stene. Litostratigrafske jedinice su izdvojene za šire područje Sijarinske Banje, prema geološkoj karti datoj na slici 15. Opis litostratigrafskih jedinica je uglavnom preuzet iz Tumača OGK 1:100.000 list Leskovac (Vukanović i saradnici, 1973).

Kristalasti škriljci čine donji kompleks Srpskog kristalastog jezgra. Dugo se smatralo da pripadaju prekambrijumu (Vukanović i saradnici, 1973), međutim po novijim istraživanjima svrstavaju se u gornji proterozoik (Kalenić i saradnici, 1974; Popović, 1993). Zbog teškoće određivanja količine feldspata u steni, teško mogu da se razdvoje gnajsevi od mikašista i leptinolita. U donjem kompleksu kristalastih škriljaca izdvajaju se liskunske stene, *sitnozrni biotitski gnajsevi*, *leptinoliti i mikašisti (Gs)*, koji su najrasprostranjeniji na terenu, zatim *sitnozrni biotitski gnajsevi (Gb)*, *amfiboliti (A)*, i *kvarciti (Q)* u vidu tankih, izduženih sočiva i proslojaka.

Škriljci su mestimično hidrotermalno izmenjeni i limonitisani usled raspadanja piritiskih žica, koje su utisnute u škriljce u vreme tercijarnog vulkanizma.

Tercijarne tvorevine predstavljene su andezitima i njihovim piroklastitima, gornje-oligocenskim sedimentima i neogenim naslagama.

Gornje oligocenski sedimenti (Ol₃) su najbolje razvijeni oko andezitske mase na Tupalskom Visu. Sastoje se od sedimentnih i vulkanogenih stena kao i piroklastita, peščara, tufogenih peščara, laporovitih sedimenata, krečnjaka, rožnaca i konglomerata. Debljina sedimenata je oko 45 m.

Tercijarni vulkanogeni kompleks sačinjavaju andeziti, daciti, dacito-andeziti i njihovi tufovi. *Andezitske stene (α)* sporadično se javljaju od leckog andezitskog masiva ka jugu, prema Tupalskom Visu i Sijarinskoj Banji. Na Tupalskom Visu andeziti grade veliko telo utisnuto duž tupalske dislokacije. Zapadno od ove mase su mala andezitska tela rasuta po kompleksu kristalastih škriljaca u vidu tanjih silova, dajkova i retko

štokova. Debljina silova i dajkova retko prelazi 5—10 m, a najčešća su tela debljine od 0,5—1 m.

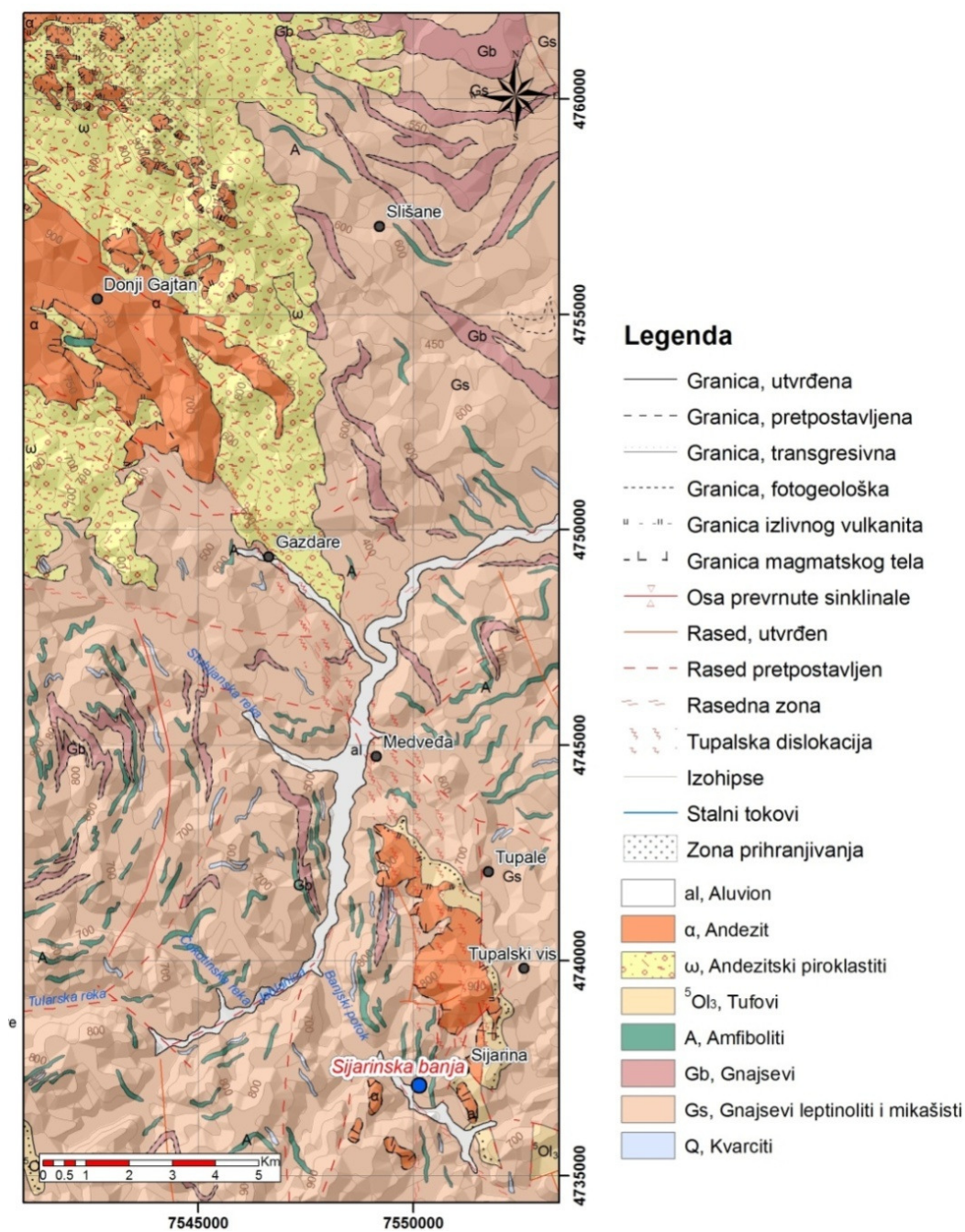
Andezite čine fenokristali feldspata, biotita i amfibola koji leže u masi od kvarca, sericita, limonita, karbonata i jarozita. Andeziti su zahvaćeni hlorotizacijom, limonitizacijom (naročito sulfida), karbonitizacijom, argilizacijom, malahitisanjem i jarozitisanjem (Popović, 1993). Dacit se od andezita razlikuje po sadržaju kvarca.

Piroklastiti (ω) grade osnovu zida kaldere. Predstavljene su vulkanskim bombama i tufovima različite granulacije. Najzastupljeniji su po obroncima lecke kaldere.

Hidrotermalno promenjeni andeziti i njihovi piroklastiti. Vulkanske stene u jezgru gajtanske kaldere i na području zapadno od tupalske mase zahvaćene su intenzivnim hidrotermalnim procesima: silifikacijom, kaolinizacijom i piritizacijom. Silifikacija je najizrazitiji oblik hidrotermalnih promena. Na širem području Sijarinske Banje intenzivna silifikacija indicira rudne pojave. Uz silifikaciju javlja se i piritizacija. Kaolinizacija je posledica delovanja hidrotermalnih rastvora kiselog i neutralnog karaktera, javlja se oko prslina i pukotina. Na širem području banje uočena je i karbonizacija i sericitizacija sa karakterističnim mineralima kalcitom i sericitom. Limonitizacija vodi poreklo od piritita i pratilac je hidrotermalnih izmena (Stevanović, 1994). Termalne vode cirkulišu duž ruptura (pukotina i raseda), koje su verovatno jednim delom nastale usled spuštanja jezgra kaldere, a drugim delom obnovljenim kretanjem tupalske dislokacije. Cirkulišući duž ovih ruptura, termalne vode su prodirale duž mikropukotina u okolne stene menjajući ih, dok su u samim rupturama odlagale velike količine SiO_2 . S obzirom na pojavu breča u kvarcnim zonama, koje su takođe obogaćene silicijumom, zaključuje se da je cirkulacija termalnih voda obnovljena u nekoliko mahova. U kvarcnim brečama se javljaju i galenit, sfalerit, srebro i zlato u zoni Leca, kao i u Sviračkim potocima u blizini Sijarinske Banje.

U samoj banji postoje naslage *mermernog oniksa* koji se eksploatiše. Naslage mermernog oniksa se nalaze na levoj obali Banjske reke uz same pojave termomineralnih voda. Oniks se izlučuje iz termalnog izvora, pri čemu voda iznosi CaCO_3 na površinu terena taložeći ga u obliku aragonita. Pruža se na oko 600 m², zapremine 120 000 m³. Podinu čine kristalasti škriljci, dok je manji jugozapadni deo

ležišta na dacito-andezitima. Uz reku Jablanicu, kao i Tularsku i Banjsku reku taložen je *aluvijalni rečni nanos (al)*.



Slika 15. Geološka karta šireg područja Sijarinske Banje
(Dimitrijević i saradnici, 1964; izmenjeno)

➤ Tektonika

Najznačajnija dislokacija na datom terenu je tupalska, koja se prostire jugoistočno od leckog vulkanskog kompleksa i predstavlja duboki razlom koji deli dve strukturne jedinice sa različitom simetrijom sklopa: Srpsko kristalasto jezgro (istočno) i Vardarsku zonu (zapadno) (Vukanović i saradnici, 1973), odnosno Srpsko kristalasto jezgro i Vardarsku zonu.

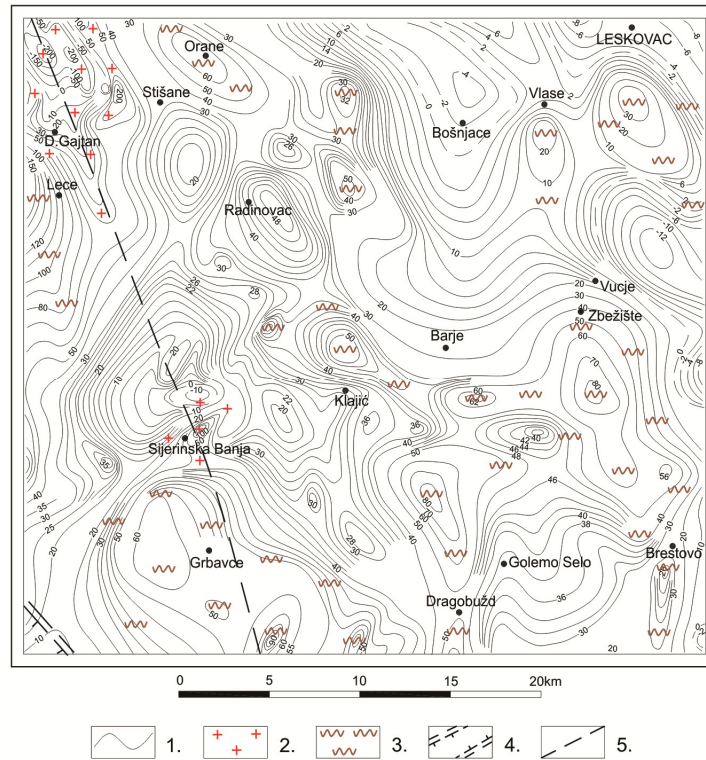
Na kraju paleogena dolazi do pojačane aktivnosti longitudinalnih zona, kad su tupalska i veternička zona pretrpele pretežno negativna vertikalna kretanja. Kretanja po tupalskoj dislokaciji su bila intemitentna. Najznačajnija kretanja odvijala su se u tercijaru. Kretanja u paleogenu su otvorila put leckim vulkanitima, pa zatim mlađa kretanja koja su se dešavala mnogo puta pred orudnjenje, za vreme orudnjavanja i posle njega. Ova pomeranja su širila zone drobljenja u andezitskom masivu, gde su poslednje faze ostavile mnogobrojne rasede sa subhorizontalnim strijama (Pešut, 1976).

Površinske manifestacije tupalske dislokacije su različite u zavisnosti od karaktera stena. U škriljcima je izražena široka zona kataklaze i dijaftoreze, dok se u vulkanitima Leca zapaža dobro definisana zona kvarcnih breča (Vukanović i saradnici, 1973).

4.3.3 Geofizička istraživanja

Aeromagnetnim ispitivanjima (Vukašinović, 2010) uočeno je da su pojave termalnih voda u domenu magnetskih anomalija, odnosno geoloških struktura koje se ispoljavaju na anomalnom magnetnom polju. Pomenute strukture su najčešće predstavljene razlomima i/ili tercijarnim magmatitima koji se odlikuju višim magnetnim susceptibilitetom. U okviru regionalnih aeromagnetnih ispitivanja na području lista Leskovac (slika 16), tercijarni vulkaniti izazvali su anomalno polje sa ekstremnim vrednostima ΔT intenziteta -200 nT na širem prostoru Lece-Gajtan i promene ΔT na potezu Tupale-Sijarinska Banja (Vukašinović, 2010). Intenzivna negativna anomalija Lece-Gajtan ukazuje na vulkansku oblast na datom prostoru. Negativne anomalije su

vezane za pojavu andezita, pa su osim u okviru leckog andezitskog masiva prisutne i na Tupalskom Visu.



Slika 16. Pregledna aeromagnetsko-strukturalna karta lista Leskovac
(Vukašinović, 2010)

Legenda: 1. izoanomale ΔT intenziteta; 2. i 3.- verovatni uzročnici magnetskih anomalija; 2. tercijarni magmatiti i 3. kristalaste stene; 4. severoistočna (aproksimativna) granica dubinskog razloma; 5. značajne dislokacije relativno nižeg reda

Na osnovu geofizičkih ispitivanja, Mladenović (1982, fond.dok.) je definisao intruzive Leca (nekadašnje magmatsko ognjište) kao tri velika intruziva uglavnom vezana za obodne delove andezitskog masiva i niz manjih intruziva indiciranih u pravcu jugoistoka, duž tupalske dislokacije.

4.3.4 Hidrogeološke karakteristike terena

Na području Sijarinske Banje izdvajaju se zbijeni tip izdani, pukotinski tip izdani, karstno-pukotinski tip izdani i uslovno bezvodni delovi terena (Stanković i Zlokolica, 1993, fond.dok.).

Zbijeni tip izdani razvijen je u okviru aluvijalnih naslaga Banjske reke i Jablanice. Vode dobijene iz ove izdani koriste se za vodosnabdevanje banje i okolnih naselja. Izdašnost aluvijalnih sedimenata, izgrađenih od peskova, šljunkova i glina, je 30 do 40 l/s.

Pukotinski tip izdani formiran je u okviru andezita, koji su prisutni u plićim delovima terena, dok se ispod njih prostiru kristalasti škriljci. Iz ovih stena kaptirane su termalne vode iz većine bušotina na području banje. Izdašnosti izvora je uglavnom do 0,1 l/s retko dostižu i do 1 l/s.

Karstno-pukotinski tip izdani predstavljen je oligocenskim sedimentima, konglomeratima, peščarima, laporcima, glincima i tufovima. Ovaj tip izdani nema veći hidrogeološki značaj.

Najveći deo terena izgrađuju kristalasti škriljci koji se prema hidrogeološkim svojstvima svrstavaju u "uslovno bezvodne terene" (Šarin, 1988). Glavne količine termomineralnih voda Sijarinske Banje (utvrđenih 22 l/s i indikovanih još 60 l/s) zahvaćene su bušotinom B-4 koja je u potpunosti izvedena u kristalastim škriljcima. Osnovni kriterijum za izdvajanje škriljaca u "bezvodne terene" je činjenica da stenska masa pod uticajem atmosferskih prilika formira tanak sloj rastresitog pokrivača sa velikim sadržajem glinovite komponente, koja zapunjava pukotine (Stanković i Zlokolica, 1993, fond. dok., Petrović Pantić i Zlokolica-Mandić, 2012b) što za posledicu ima formiranje povremenih izvora i izvora male izdašnosti, što je slučaj i sa prirodnim pojavama isticanja u Sijarinskoj Banji. Njihova vodonosnost u dubljim delovima terena zavise, prvenstveno, od mineraloških i petroloških svojstava i stepena tektonske oštećenosti (Pantić i Zlokolica-Mandić, 2012b). Na osnovu hidrodinamičkog testa bušotine B-4 (16-18.10.1990) proračunat je koeficijent transmisibilnosti od $T = 1,83 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ pri sniženju od 58,13 m što uveliko prevazilazi uobičajne vrednosti za pukotinski tip poroznosti (Stanković i Zlokolica, 1993, fond. dok.). Podzemne vode se

akumuliraju u pukotinskim i rasednim sistemima formiranim u okviru kristalastih škrljaca. U plićim delovima terena prisutan je veći broj pukotina manjih dimenzija koje su često zapunjene aragonitom. Sa porastom dubine, gustina pukotina se smanjuje, ali su nabušene pukotine većih dimenzija, što je omogućilo veći priliv voda.

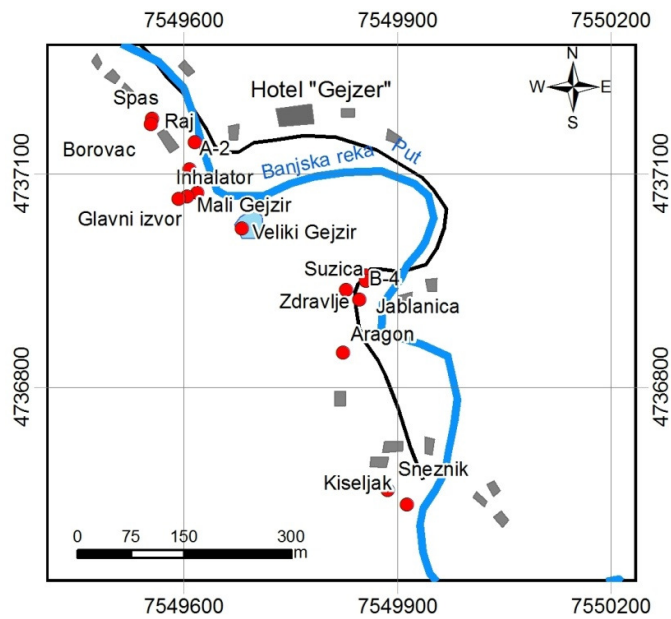
4.3.5 Stanje i kapacitet objekata na području Sijarinske Banje

Kaptirani izvori pod nazivima "Rimski rov", "Rimski bunar", "Rimski bazen" svedoče da su termomineralni izvori Sijarinske banje korišćeni u vreme Rimljana i Sasa, dok je ova banja bila veoma popularna za vreme vladavine Turaka. Obimnija hidrogeološka istraživanja vršena su u drugoj polovini 20. veka (Protić, 1995), tako da su postojeći izvori kaptirani, izrađene su plitke bušotine do 100 m, i jedna duboka bušotina do 1232 m. Prema prikupljenim podacima sa terena (tokom 2011. godine) Sijarinska Banja raspolaže se 17 hidrogeoloških pojava (slika 17) raspoređenih u okviru Donje i Gornje Banje (tabela 9). Vode Sijarinske Banje se koriste u balneoterapiji, za rekreaciju (bazeni) i za grejanje hotela "Gejzer" u okviru kog se nalazi Zavod za specijalizovanu rehabilitaciju "Sijarinska Banja". Utvrđene rezerve termomineralnih voda Sijarinske Banje iznose 95,75 l/s (Zlokolica i Ilić, 1994, fond. dok.). Podaci o vodnim pojavama preuzeti su iz *Aneksa Elaborata o eksploatacionim rezervama termomineralnih voda izvora Sijarinske Banje* (Zlokolica i Ilić, 1994, fond. dok.).

U "Donjoj Banji" postoje sledeće pojave termomineralnih voda: Raj, Spas, Borovac, Veliki Gejzer, Mali Gejzer, Inhalator, bušotina A-2, B-1.

Izvor "**Raj**" se nalazi na desnoj obali reke Banjske reke. Kaptiran je 1936. godine u vidu česme, rekaptazom je povećana količina vode od 0,01 l/s. Dubina sonde je 7,8 m, 3 m kroz bigroviti krečnjak sa ilovačom i do 4,8 m kroz škrljce. Na 1,7 m pojavila se voda temperature 22°C, da bi na 2,7 m temperatura bila 26°C. Na isticanju je izmerena temperatura od 24°C.

Izvor "**Spas**" nalazi se u na levoj obali reke. Česma je podignuta 1936. godine a rekaptazom 1955. godine dobijeno je 0,01 l/s. Izdašnost varira u zavisnosti od padavina i godišnjeg doba.



Slika 17. Mikrolokacija hidrogeoloških pojava na području Sijarinske Banje



Slika 18. Gejzer u Sijarinskoj Banji

(foto: Petrović Pantić, 2011)

Izvor "**Borovac**" se nalazi na 3 metra udaljenosti od izvora "Spas". Tokom oktobra 1954. bušenjem je dobijeno 0,03 l/s vode na dubini od 9,3 metra. Kapacitet izvora je 0,3 l/s, temperature 42°C.

"**Glavni izvor**" snabdeva kupatilo 1. Izdašnost je oko 0,2 l/s, temperatura oko 65°C. Voda otiče otvorenim kanalom do bazena u kupatilu.

Prilikom istraživanja 1954. godine na dubini od 8,5 m pojavila se voda koja je izbijala pod pritiskom na visinu od oko 8 m (kasnije procenjen na 4 m), pa se ova pojava nazvala "**Gejzer**" ili "**Veliki Gejzer**" (slika 18). Temperatura vode je oko 71°C, izdašnosti od 2,9 l/s. Sonda je nabušila andezite sa prslinama i pukotinama ispunjene aragonitom i piritom.

"**Mali Gejzer**" je izvor tople vode, koja izbija u obliku vodoskoka na svakih 12-15 minuta. Nastao je bušenjem sonde kao eksperiment u pogledu veze sa "Glavnim izvorom". Prilikom bušenja pojavila se termomineralna voda na dvanaestom metru pri čemu je ustanovljen mali uticaj na "Glavni izvor". Pulsiranje nastaje pod dejstvom gasa CO₂, pri čemu se voda neprestano diže dok ne dođe do pražnjenja gasa kada nastupa efuzija koja sa sobom izbacuje i veliku količinu vode. Zatim nivo vode pada ispod vrha cevi i tako ritmično dolazi do izbacivanja vode.

"**Inhalator**" se nalazi na najvišoj koti od svih termomineralnih izvora. Bušotina je urađena kroz andezite sa impregnacijama pirita. Bušenjem na dubini od 9,5 metara izbila je topla voda od 69°C u količini 6,8 l/s, dok su utvrđene rezerve 0,55 l/s, temperature 65°C.

Bušotina **A-2** (1981) urađena je pored kupatila u Donjoj Banji. Bušotina je urađena do 102 m dubine kroz andezite sa pojavama pirita i kvarca. Temperatura voda je 65°C, kapacitet 0,15 l/s.

Bušotina **B-1** ili "**Hisar**" (1974) urađena je do dubine od 80 m u samoj zgradi hotela "Gejzer". Kapacitet bušotine je 0,02 l/s, temperature od 24 do 29°C.

Izvan uže zone banje urađena je istražna bušotina **B-2** do 100 m kroz kristalaste škriljce, a na dubini od 80-90 m nabušeni su andeziti. U ovoj bušotini nije registrovana pojava vode, već samo geotermalna toplotna energija. Termokarotažom je utvrđeno da

temperatura naglo raste tako da na dubini od 30,2 m je registovano 44°C, a na dubini od 85 m 65°C.

U "Gornjoj Banji" termomineralne pojave su: Jablanica, Zdravlje, Suzica, Snežnik, tri izvora u Blatištu, Kiseljak, Aragon i bušotina "B-4".

Vode sa jednog izvora i sonde bušene kroz andezite do 11,54 m, zbirno su kaptirane pod nazivom "**Jablanica**". Izvor se nalazi uz istočni obod severnog dela mermernog oniksa. Koristi se za piće.

Izvor "**Zdravlje**" kaptiran je 1952. godine. Nalazi se blizu izvora Jablanica na istočnom obodu severnog dela mermernog oniksa. Koristi se za piće.

Na kaptaži "**Suzica**" ističe voda iz sonde koja je rađena kroz andezite, pa sve do škriljaca na 25,3 m. Voda se koristi za ispiranje očiju.

Tri izvora u "**Blatištu**" snabdevaju toplom vodom dva bazena i blatište. Izdašnost ova tri izvora je 0,02-0,04 l/s.

Na izvoru "**Kiseljak**", ugljikisela voda izvire iz nanosa, pri čemu je izvor kaptiran malom primitivnom bunarskom kaptažom. Koristi se za piće.

Na levoj obali Banjske reke nalazi se bušotina pod nazivom "**Snežnik**". Bušotina je rađena kroz peščare i konglomerate do 10 m, zatim kroz zonu kvarca i kvarca sa piritom do 12 m i dalje do 16,4 m kroz kompaktni andezit. U zoni od 11,14 do 11,54 m došlo je do pojave gasova koji su nivo vode podigli sa 7,2 m na površinu terena. Temperatura vode je 20°C, izdašnost 0,01 l/s.

Bunar **A-1 ili Aragon** je izbušen kroz andezite do dubine od 40 m, od 3,5 do 4 m javljaju se prosljoci mermernog oniksa. Andeziti su od 12-30 m hidrotermalno izmenjeni sa žicama i impregnacijama pirita. Oko bušotine je urađen bazen u koji ističu vode, a iz koga je crpljenjem u trajanju od 72 h dobijena količina na samoizlivu od 1,5 l/s, temperatura 65°C. Vode iz ove bušotine snabdevaju vodom obližnja blatna kupatila i banjske kade u hotelu "Gejzer".

Bušotina **B-4** (slika 19) urađena je kroz biotitsko-muskovitske i sericitske gnajseve i amfibolske škriljce do dubine od 1232 m. Amfibolski škriljci se pojavljaju u

proslojcima do 292 m. Konstrukcija bušotine i litološki profil dati su na slici 20. Na osnovu geofizičkih istraživanja (Obrenović, 1990, fond. dok.) utvrđeni su minimumi električne otpornosti i minimumi na gama-gama dijagramu na osnovu kojih se zaključuje da je reč o sulfidnoj mineralizaciji. To je uočeno na 4 intervala od 760 do 870 m. Povišena vrednost električne otpornosti, naročito na 1030 m ukazuju na zonu silifikacije. Devijacija bušotine je ka severozapadu.



Slika 19. Bušotina B-4 u Sijarinskoj Banji
(foto: Petrović Pantić, 2011)

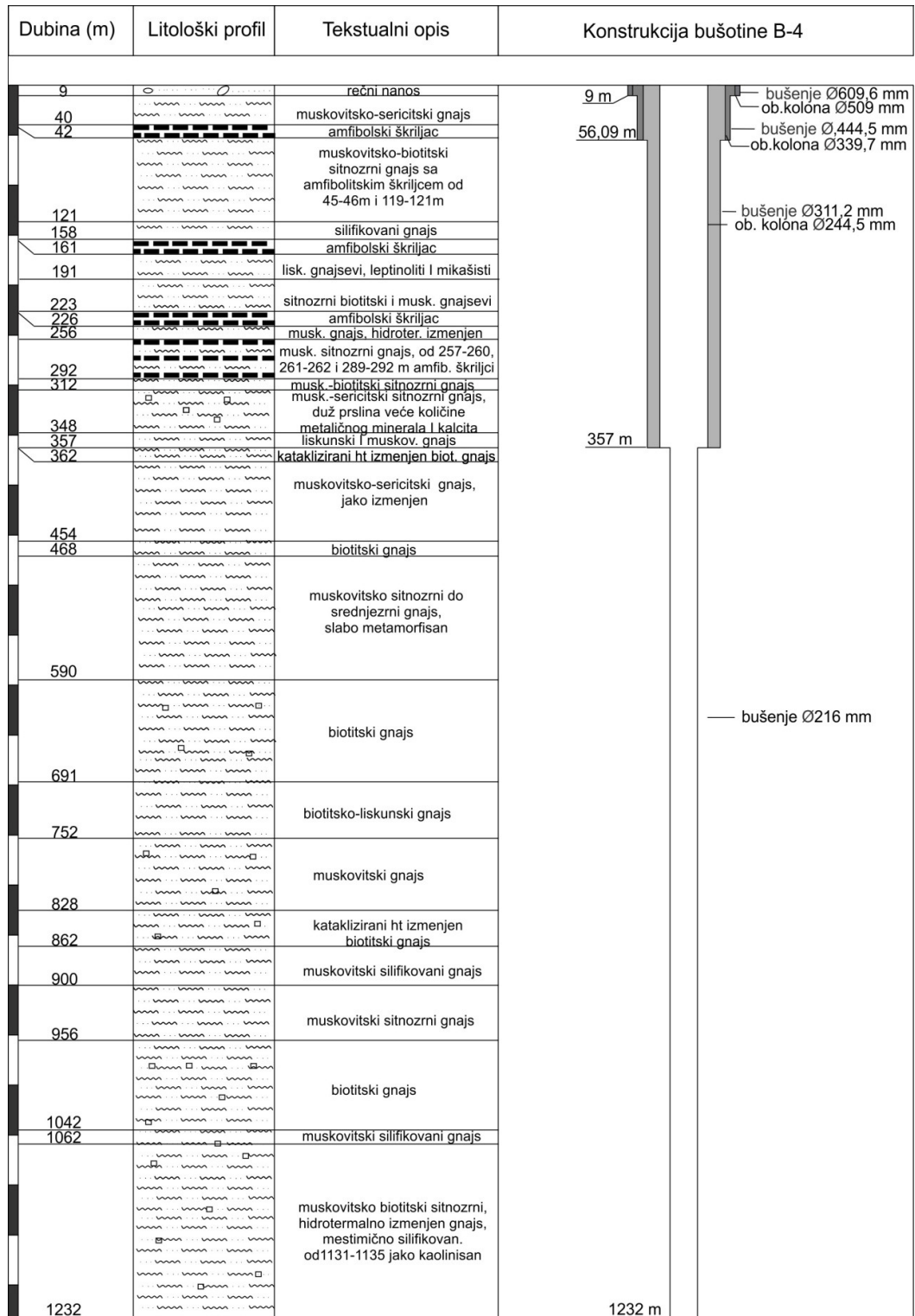
Na 360 m dubine presečena je produktivna pukotinska zona iz koje je dobijena erupcija termalne vode sa 60 l/s i izlaznom temperaturom 77,8°C, što je ujedno i najveća količina i najviša registrovana temperatura vode u bušotini. Interval je izolovan, jer je erupcija vode sa visokom temperaturom sprečavala nastavak bušenja do projektovane dubine. Sa dubina 355-370 m, 825-835 m, 1045-1055m i 1085-1095 m dobijeno je 30 l/s vode, temperature oko 75°C pod pritiskom. U istoj bušotini ustanovljen je odnos gasa CO₂ i vode $Q_{\text{vode}}:Q_{\text{gasa}}=1:4,4$. Nakon završetka bušenja, bušotina je zatvorena i to tako da deo vode (5,5 l/s) preko pomoćnog ventila otiče u hotel. Na ovom odvodu je pritisak 2,4 bara,

dok je na glavi bušotine 7,4 bara. Ukupno utvrđene rezerve bušotine B-4 iznose 90 l/s, s tim da je 60 l/s iz pukotinske zone na 360 m koja je izolovana, dok su rezerve iz ostalih izvora 5,75 l/s.

Prema novijim podacima (Milanović i saradnici, 2012) izdašnost bušotine B-4 je 33 l/s, temperatura 72°C. Nakon 19 godina došlo je do povećanja izdašnosti od 3 l/s i smanjenja temperature za 3°C, kao posledica dugotrajne eksploatacije. Usled dugotrajnog crpljenja dolazi do povećanog priliva voda iz pukotina, pri čemu su povučene i hladnije vode koje utiču na smanjenje temperature na bušotini.

Na području sela **Tulare**, 15 km udaljenog od Sijarinske Banje, postoji više pojava ugljokiselih mineralnih voda. Izvori se pojavljuju na kontaktu andezita i proterozojskih kristalastih škriljaca (Protić, 1995). Iz bušotina **BT-1** dobijena je temperatura vode od 26°C. Bušotina je duboka 300 m, rađena kroz jako silifikovane piritisane i hidrotermalno izmenjene stene. Andezit se javlja od 0-27 m, zatim od 148-197 m, dok se od 114,5 -148 pa od 197 do 300 m pretežno javlja gnajns, na manjim dubinama sa proslojcima andezita.

Dvadeset kilometara zapadno od Prokuplja nalazi se selo **Viča**, sa pojavama ugljokiselih voda temperature do 23°C. Geološku građu terena čine kristalasti škriljci prekambrijumske starosti (gnajsevi, leptinoliti, mikašisti sa sočivima mermera i kvarcita), fliš gornje krede i sedimenti neogena i kvartara (Protić, 1995). Bušotina **B-1**, duboka 107 m, rađena je kroz gnajseve dok su na dubini od 94-107 m zahvaćeni mermeri. Temperatura vode je oko 23°C. Ugljokisela voda iz Viče flaširala se pod nazivom "Milan Toplica".



Slika 20. Litološki stub i konstrukcija bušotine B-4 u Sijarinskoj Banji (Zlokolica i Ilić, 1994, fond. dok.; izmenjeno)

Tabela 9. Pregled hidrogeoloških pojava na području Sijarinske Banje (prema podacima sa terena, 2011; Zlokolica i Ilić, 1994, fond.dok)

	Objekti	temperatura (°C)	kapacitet Q (l/s)	dubina H (m)	vrsta hidrogeoloških pojava	korišćenje	
Donja banja	1	Raj	22-26	0,1	7,8	izvor	V
	2	Spas	30-33	0,03		izvor	V
	3	Borovac	42	0,3		izvor	V
	4	Glavni izvor	59-66	0,2		izvor	B
	5	Gejzer	71	2,9	8,5	bušotina	B, R
	6	Mali Gejzer			12	bušotina	R
	7	Inhalator	65	0,55	9,5	bušotina	B
	8	A-2	65	0,15	102	bušotina	B
	9	Hisar	24-29	0,02	80	bušotina	-
Gornja banja	10	Jablanica	34-37	0,1	11,5	bušotina	V
	11	Zdravlje	23-29	0,01		izvor	V
	12	Suzica	25	0,01	25,3	bušotina	B
	13	Blatište		0,02-0,04		izvor	B
	14	Kiseljak	14			izvor	V
	15	Snežnik	20	0,01	16,4	bušotina	V
	16	Aragon	65	1,5	40	bušotina	B
17	B-4	76	30	1232	bušotina	B, G	
Tulare	BT-1	26		300	bušotina	presušio 2012	
Viča	B-1	23		107	bušotina	V	

Legenda: V- izvori za piće, B-balneologija; R-rekreacija i turizam; G-grejanje

4.4. VRANJSKA BANJA

4.4.1 Opšte karakteristike Vranjske Banje

Vranjska Banja (slika 21) nalazi se 12 km severoistočno od grada Vranja, u dolini Banjske reke, na 380 do 400 m.n.v. Banja se pruža na severoistočnom obodu vranjske kotline. Najviši vrh je Besna kobila (1923 m.n.v.) koji se nalazi istočno od banje. Klima je umereno-kontinentalna sa srednjom temperaturom vazduha od 10,8°C. Prema podacima RHMZ-a, padavine su osmatrane na kišomernim stanicama Vlasina, 1190 m.n.v. i Vranje, 458 m.n.v. (tabela 10). Srednje višegodišnje sume padavina su od 69,1 (Vlasina) do 52,3 mm (Vranje), kao rezultat visinske razlike, dok se najveće količine izluče u junu mesecu.



Slika 21. Geografski položaj Vranjske Banje

Kroz banju protiče Banjska reka, duga 20 km, koja se uliva u Južnu Moravu. Proticaj Banjske reke je od 40 do 16000 l/s, sa pluviometrijskim i bujičnim karakterom toka (Zlokolica i saradnici, 1994, fond.dok.).

Tabela 10. Maksimalne, minimalne i srednje vrednosti mesečnih suma padavina (mm) na kišomernoj stanici Vlasina i na kišomernoj stanici Vranje 1961-1991 (RHMZ)

Vlasina	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec	Prosek
Min	11	10	13	18	19	31	17	13	3	0	17,5	0	12,7
Max	138	174	170	146	192	263	191,4	109	148	115	157	131	161,2
Sr	62	63,5	61,1	75,1	92,5	102,5	73,1	51,6	55	50,1	74,1	69,4	69,1
Vranje	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec	Prosek
Min	3,4	8	12	14	13	12	2	9	3	0	7	1	7
Max	100	91	121	90	129	153	124	114	204	120	155	108	125,7
Sr	40,5	43,8	46,4	54,5	65,3	71,3	52,9	38,4	49,2	48,3	60,4	56,7	52,3

4.4.2 Geološke karakteristike područja Vranjske Banje

➤ Litostratigrafske jedinice

Najstarije stene na širem području Vranjske Banje su proterozojske starosti (gnajsevi, kristalasti škriljci i metamorfisani bazični vulkaniti) u koje su utisnute paleozojske, mezozojske i kredno-paleogene granitoidne stene (Babović i saradnici, 1977)..

Stene *proterozojske starosti* su predstavljene gnajsevima, leptinolitima, mikašistima, amfibolitima, amfibolitskim škriljcima, kvarcitima i magmatitima. Ove stene predstavljaju donji metamorfni kompleks, dok se iznad njih pružaju stene gornjeg metamorfnog kompleksa izgrađenog od kristalastih škriljaca (biotit-muskovitski gnajsevi, leptinoliti, mikašisti, amfibolitski škriljci i kvarciti) rifejsko-kambrijumske starosti. U okviru serije Vranjske Banje javljaju se gnajsevi, mikašisti, leptinoliti, amfiboliti i kvarciti (slika 22).

Dvoliskunski gnajsevi (Gb) u seriji Vranjske Banje preovlađuju nad ostalim litološkim članovima. Stene su sivomrke, izgrađene od biotita, kvarca, plagioklasa, mikroklina i muskovita kao bitnih sastojaka. Smanjivanjem sadržaja feldspata dvoliskunski gnajsevi prelaze u leptinolite i mikašiste. Okcasti gnajsevi debljine do nekoliko desetina metara u literaturi se često sreću i pod imenom embrešisti.

Leptinoliti i mikašisti (Sm) se nalaze kao proslojci ili sočiva različitih dimenzija u sitnozrnim gnajsevima. Odlikuju se lepidoblastičnom strukturom zbog velikog prisustva liskuna, dok su siromašni feldspatima. Sastoje se od kvarca, muskovita, biotita i promenljive količine albita.

Amfiboliti (A) se javljaju kao sočiva u gnajsevima, leptinolitima i mikašistima. Nastali su od vulkanogeno-sedimentne serije i plitkih bazičnih intruziva. Sastoje se od amfibola i plagioklasa.

Kvarciti (Q) se takođe javljaju u izduženim sočivima.

U navedene metamorfne komplekse utisnuti su granitoidni masivi Čukljenika, Bujanovca i Surdulice. *Surdulički granodiorit ($\gamma\delta$)* se prostire na oko 220 km². Celo područje se naziva surdulički granodioritski masiv i odlikuje se planinskim tipom reljefa sa visinama od 1000 do 2000 m. Granične površine ovog batolita padaju pod

škriljce što ukazuje na njegovo širenje u dubinu. Granodiorit je sačinjen od kvarca, plagioklasa, ortoklasa, biotita i amfibola sa akcesornim mineralima apatitom, sfenom, magnetitom, ortitom i metaličnim mineralima. U okviru surduličkog granitoida pegmatiti nisu zapaženi, dok se apliti javljaju mestimično u tankim žicama sredinom masiva. Intruziv je ispresecan brojnim dajkovima eruptiva. Starost granodiorita je od 36,3 miliona godina (hornblenda-biotitski granodiorit -Vasković, 1998; fond. dok. Vasković i Tasić, 2000) do 28,4 mil. godina (žične frakcije hornblenda biotitskih i biotitskih granodioritporfirita - Ćebić, 1990, fond. dok.; Vasković i Tasić, 2000).

Paleogen je predstavljen sedimentima *gornjeg eocena (E)*. Na slici 22 eocen se uočava u zapadnom severo-zapadno od banje i predstavljen je turbiditskom jedinicom, plitkovodnim klastitima i horizontima sa podvodnim kliženjem. Debljina turbiditske jedinice iznosi do 120 m, predstavljena laporcima, alevrolitima, pešćarima. Sedimenti plitkovodne sedimentacije predstavljeni su konglomeratima, pešćarima i glincima. Horizont sa podvodnim kliženjem se odlikuje paketima koji sadrže uklopke stena sopstvene serije sa deformacijama koje odgovaraju podvodnom kliženju i predstavljaju laporcima, glincima i pešćarima.

Tercijarne efuzivne stene

Na širem području Vranjske Banje javljaju se izlivi dacita, andezita i kvarclatita. Glavni sastojci ovih stena su andezin, biotit i hornblenda, dok tip vulkanita određuje količina kvarca i sanidina.

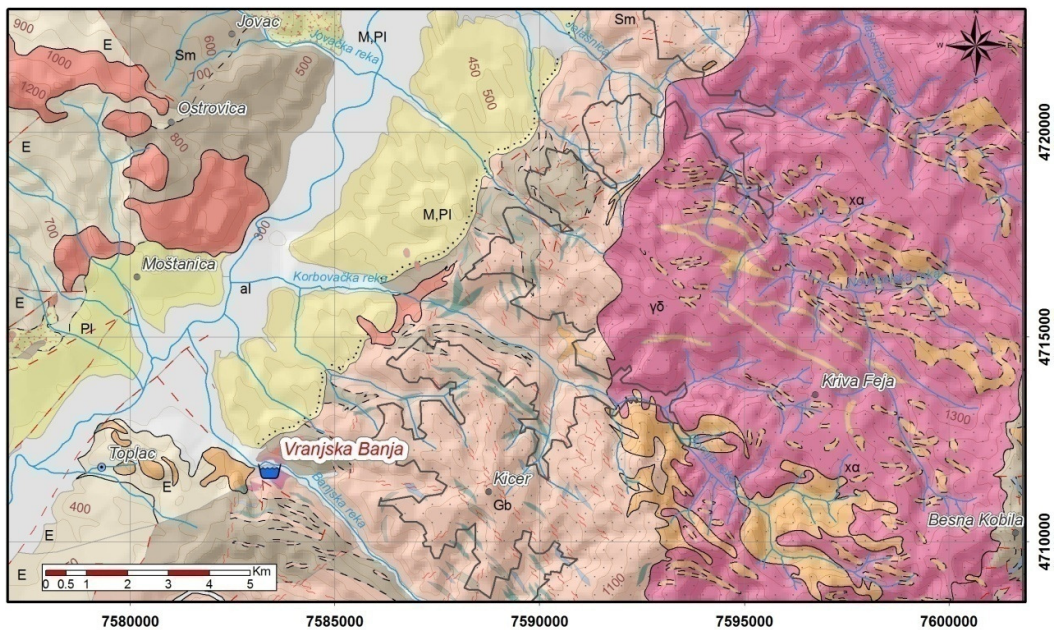
Dacito-andeziti (αq). Daciti se javljaju kao proboji debljine nekoliko desetina metara na vulkanskim nekovima Grotu, Obliku, prema Ostrovici, kod Moštanice i Vranjske Banje. Sastoje se od hornblende, plagioklasa, biotita, kvarca, piroksena, apatita i metaličnih minerala. *Andeziti (α)* uglavnom predstavljaju plitke intruzije i posledica su erupcija u blizini Vranjske Banje. Javljaju se u bazi eocenske serije u vidu lavičnih slivova na lokalnosti Katalenac. Izgrađeni su od andezita sa varijacijama koje se kreću ka dacitima.

Kvarclatiti (xα) su najrasprostranjeniji, naročito u okviru surduličkog masiva, gde su utisnuti po razlomnim zonama. Vulkanska aktivnost je uočena od eocena do pliocena,

pri čemu je počela utiskivanjem granodiorita, a kasnije su utisnute efuzivne stene. Starost kvarclatita je između 31,8 i 28,6 mil. godina (Vasković i Tasić, 1990).

Piroklastični sedimenti (ωαα) pružaju se severno od Vranjske Banje, dok se manje mase nalaze i severo-istočno od banje. Izgrađeni su od odlomaka vulkanskih stena različite veličine kao i od pepela koji služi kao vezivni materijal. Predstavljani su tufovima, aglomeratima, vulkanskim brečama, peščarima rede i tufitima.

Sedimenti miopliocena (M,PI) predstavljani su glinama, sivozelenkastim laporocima, peščarima, konglomeratima i sivim peskovima. Prisutni su na desnoj strani Južne Morave, i predstavljaju deo vranjskog tektonskog rova.



Legenda

Zona prihranjivanja	al, Aluvion	E, Konglomerati peščari tufovi
Granica, utvrđena	Pl, Peskovi gline laporci	γδ, Granodiorit
Granica, pretpostavljena	M,PI, Peščari i konglomerati	Q, Kvarcit
Granica, transgresivna	ωαα, Piroklastit	A, Amfiboliti
Rased, utvrđen	χα, Kvarclatiti	Sm, Leptinoliti i mikasisti
Rased, pretpostavljen	αα, Dacito andeziti	Gb, Gnajs
Rasedna zona		
Stalni tok		

Slika 22. Geološka karta šireg područja Vranjske Banje

(Terzin i saradnici, 1976; Babović i Cvetković, 1968, izmenjeno)

Pliocen (Pl) je predstavljen sivim peskovima, mrkim i bentonitskim glinama i sivozelenkastim laporcima debljine preko 220 m. Zastupljen u severnom delu vranjskog tektonskog rova, na levoj strani od Južne Morave.

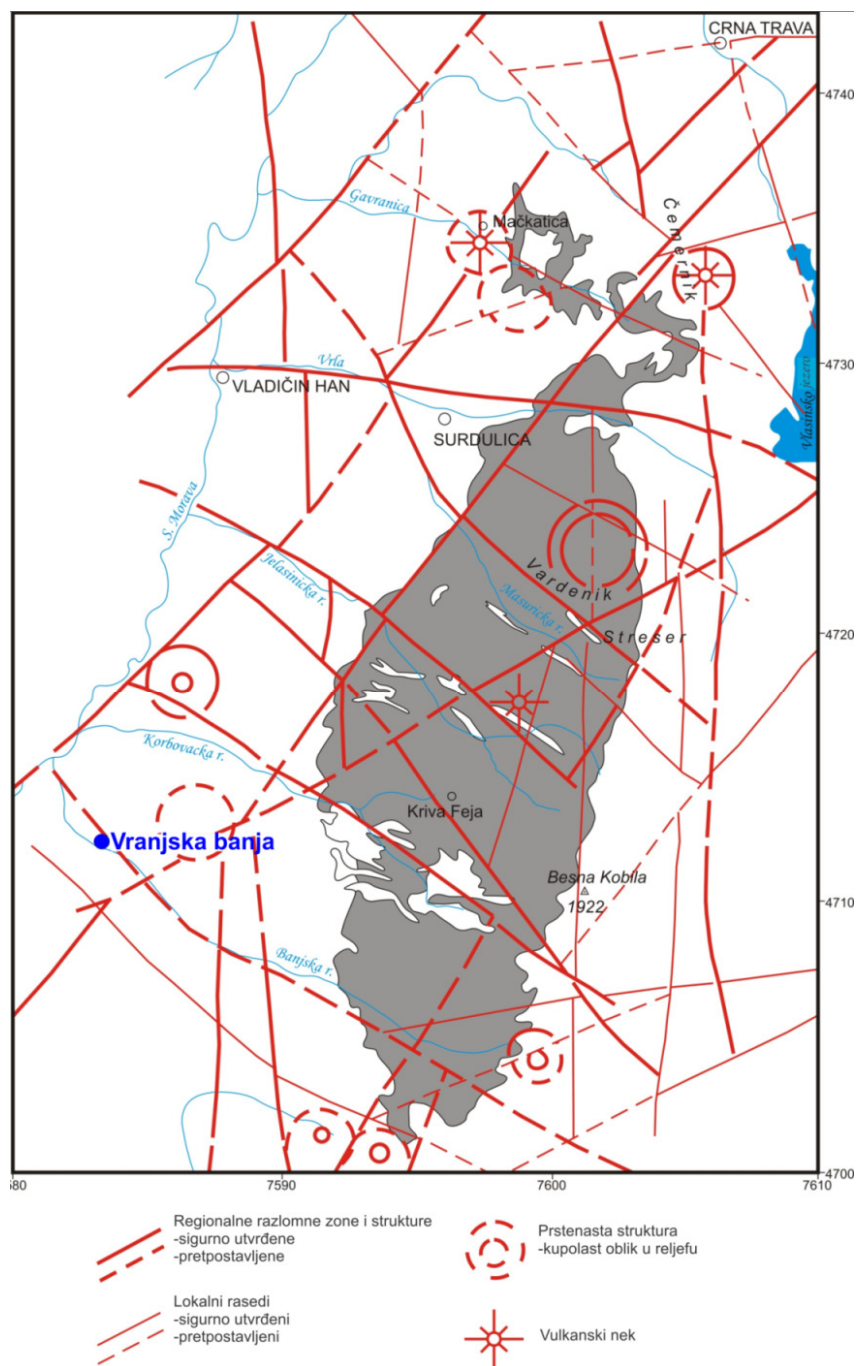
Kvartar je najrazvijen u vidu *aluvijalnih sedimenata (al)*, i u manjoj meri terasnih, deluvijalnih i barskih. Aluvijum je razvijen uz doline reka, najviše uz dolinu Južne Morave.

➤ **Tektonika**

U makrostrukturnom pogledu, mogu se izdvojiti: istočni obod vranjskog rova, monoklinala Koćure i surdulički granitoidni masiv i područje vulkanske aktivnosti Grota i Oblika (Zlokolica i saradnici, 1994, fond. dok.; Martinović i Magazinović, 2010).

Na širem području Vranjske Banje tektonski pokreti su praćeni magmatskom aktivnošću, naročito tercijarnim vulkanizmom. Pojave intruzivnih i vulkanskih stena kontrolisane su rupturnim sklopom terena (Stanić i saradnici, 1996). Sistemi ruptura orijentacije ZSZ-IJI (slika 23), pružaju se do nekoliko desetina kilometara i uglavnom kontrolišu tokove reka. Rupture orijentacije JZ-SI nemaju bitan uticaj na formiranje hidrografske mreže, već su to starije i manje aktivne rupture (Vasković i Tasić, 2000). Rekonstrukcijom vulkanskih oblika utvrđena je prstenasta struktura prečnika 6 km sa karakteristikama vulkanske kaldere. U okviru ove kaldere utvrđeno je nekoliko vulkanskih nekova, Grot, Ravnjak, Oštra čuka, Oblik i Ostrovica (Stanić i saradnici, 1996).

Sa istočne strane vranjskog rova rasedi se pružaju pravcem I-Z. Rasedna zona pod nazivom Katalenec, pravca pružaja S-J, je u sistemu obodnih raseda vranjskog rova od koga se odvaja u pravcu severoistoka i završava u Vranjskoj banji. Ovoj rasednoj zoni je pripisivana uloga glavnog drena termalnih voda. Geofizičkim istraživanjima pretpostavlja se postojanje rasedne zone duž Banjske reke (Zlokolica i saradnici, 1994, fond. dok.; Martinović i Magazinović, 2010). Tokom tercijara formiran je rased, paralelan Južnoj Moravi, koji se može pratiti od Bujanovca preko Vranjske Banje i Surdulice i dalje ka severoistoku. Duž ovog raseda došlo je do intenzivnog pucanja i



Slika 23. Regionalni neotektonski rupturni sklop
(Tasić i Vasković, 2000; Martinović i Magazinović, 2010)

drobljenja u granitima, granodioritima, andezitima i škrljncima kad su stvorene brojne pukotine duž kojih su vezani eruptivni proboji i pojave termalnih voda u Vranjskoj Banji. Osim toga formirane rasedne strukture služile su i kao kanali za hidrotermalne rastvore koji su vršili intenzivnu silifikaciju i kaolinizaciju stena (Zlokolica i saradnici, 1994, fond. dok.).

Zone utiskivanja dacita i andezita imaju pravac pružanja SZ-JI. U metamorfitima Vranjske Banje pukotine su veoma česte, pravca pružanja SI-JZ. Pukotine smicanja su stisnute ili zapunjene zdrobljenim, limotisanim materijalom sa zevom do 20 cm. Tenzione pukotine su nepravilnih površi, zapunjene zemljastim materijalom ili kvarcom (Vasković i Tasić, 2000).

Na osnovu neotektonske karte vranjskog rova, blok u zaleđu Vranjske Banje (južno i jugozapadno od banje) i prostor surduličkog masiva i istočnog oboda vranjskog rova se relativno izdižu, dok centralni deo vranjskog rova relativno tone (Zlokolica i saradnici, 1994, fond. dok.).

4.4.3 Hidrogeološke karakteristike terena

Na području Vranjske Banje izdvajaju se zbijeni i pukotinski tip izdani kao i teško raščlanjivi delovi terena koji se izdvajaju kao hidrogeološki kompleksi (Zlokolica i saradnici, 1994, fond. dok.).

Zbijeni (intergranularni) tip izdani formiran je u okviru kvartarnih sedimenata Južne Morave. Ovaj tip izdani odlikuje se dobrim filtracionim karakteristikama što omogućava eksploataciju vode u cilju vodosnabdevanja grada Vranja.

Pukotinski tip izdani formiran je u okviru vulkanogeno-sedimentnog kompleksa, flišolikih sedimenata i granodiorita Surdulice. Paleogeni tufovi i molase imaju slabe filtracione karakteristike i čine bočnu barijeru vodama iz obodnih delova vranjskog rova. Vulkanogeni kompleks dacita, kvarclatita, andezita i njihovih tufova čine sredinu povoljniju za formiranje pukotinskog tipa izdani, dobrih filtracionih karakteristika. Međutim, zbog ograničenosti rasprostiranja u planu, istočno od moravskog rova, nije moguće formiranje većeg ležišta podzemnih voda, već je ono, najverovatnije povezano

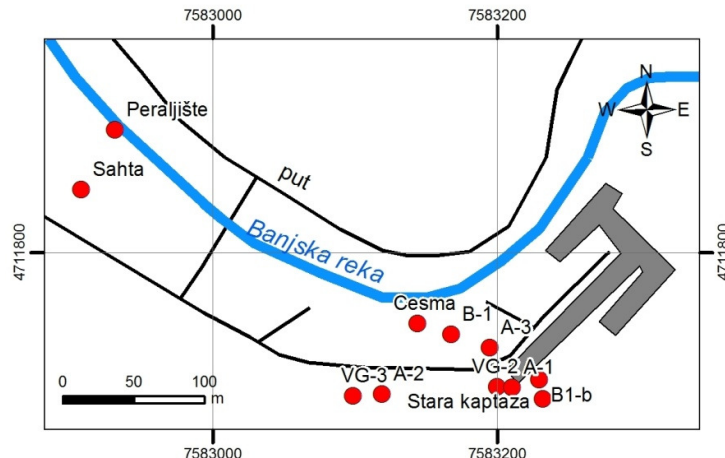
sa izdanskim vodama okolnih stena. Pukotinski tip izdani formiran je i u okviru surduličkog granodiorita, pri čemu sa porastom dubine intenzitet ispucalosti opada.

Hidrogeološki kompleks izdvojen je u okviru paleozojskih škriljaca istočnog oboda vranjskog rova i monoklinale Koćura. Smenjivanje gnajseva, sa mikašistima, leptinolitima i amfibolskim škriljcima i njihova intenzivna tektonska oštećenost, omogućavaju formiranje zona različitih vodoprovodnosti. Velika zastupljenost ovih stena na površini i njihova debljina uslovljavaju znatno rasprostranjenje ovog kompleksa, bez jasno definisane jugoistočne granice. U okviru hidrogeološkog kompleksa formirane su termalne vode Vranjske Banje, izdašnosti oko 60 l/s.

4.4.4 Stanje i kapacitet objekata na području Vranjske Banje

Termalni izvori su korišćeni još u rimsko i vizantijsko vreme, dok su prvi objekti u banji podignuti sredinom 19. veka.

Prirodni izvori kaptirani su vodozahvatnim šahtama i kanalima, dok su u banji urađene pliće bušotine do 120 m i dve duboke bušotine do 1470 m (Zlokolica i saradnici, 1994, fond. dok.; Martinović i Magazinović, 2010). Prikaz izvora i bušotina u banji dat je na slici 24. Danas se termalne vode Vranjske Banje koriste za balneološke potrebe, toplifikaciju pojedinih objekata u banji, za staklenike i živinarsku farmu (tabela 11).



Slika 24. Mikrolokacija hidrogeoloških objekata u Vranjskoj Banji

Prirodna mesta isticanja:

Stara kaptaza je najviši izvor na terenu. Voda se koristi za potrebe Stacionara, pri čemu se pre korišćenja rashlađuje. Temperatura izvora osciluje od 70 do 90°C, dok je proticaj izvora do 2 l/s.

Šahta br. 5 predstavlja kolektor prirodnih termalnih izvora koje su zahvaćene drenažnom mrežom i odvedene u zajednički kanal. Temperatura vode je od oko 85°C, izdašnost od oko 50 l/s.

Periljište predstavlja izvod iz sabirnog kanala koji vodi ka šahti. Zapreminskom metodom određeni su proticaji od 0,37 do 0,86 l/s, temperature od 44 do 65°C.

Veštački objekti:

Prva duboka bušotina dubine 2020 m urađena je pored železničke stanice u Vranju 1980. god. Do 1240 m dobijeno je 0,25 l/s na samoizliv, temperature 27-33°C. Do 2000 m dostignuta je temperatura do 86,4°C bez samoizliva, zbog čega se odustalo od istraživanja na lokalitetu Vranja.

U parku u banji urađene su bušotine B-1 i B-1a. Bušotina **B-1** (dubine 120 m) ističe u količini od 2 l/s, temperature 83°C preko česme koja je napravljena pored bušotine. Bušotina je urađena kroz kroz piritisane biotitske škriljce, a od 30 m su mestimično piritisani granodioriti. Iz bušotine **B-1a** (dubine 30 m) dobijeno je 2 l/s termalne vode, temperature 93°C.

Pored Stare kaptaze urađena je bušotina **B-1b**, dubine 24 m kroz granodiorite i biotitske škriljce. Voda je zahvaćena iz ispucalih granodiorita. Na samoizliv je dobijeno 1,5-2,5 l/s, temperature 89-94°C. Iz bušotine **B-2** (udaljenoj 1 km od banje) utvrđen geotermiski gradijent 0,174 °C/m odnosno porast temperature sa 15 °C (na dubini 15 m) do 26 °C na ortu. Dubina bušotine je 44 m. Pored bušotine B-1 urađena je i bušotina **B-2a** do 300 m dubine, gde je dobijena temperatura vode od 31°C bez samoizliva.

Kasnije su urađeni eksploatacioni bunari A-1, A-2 i A-3. Bunar **A-1** dubine 26 m urađen je kroz silifikovani granodiorit, pri čemu je na samoizliv dobijeno 3,5-4,0 l/s vode, temperature 93°C. Bušotina **A-2** dubine 44 m, nalazi se neposredno pored

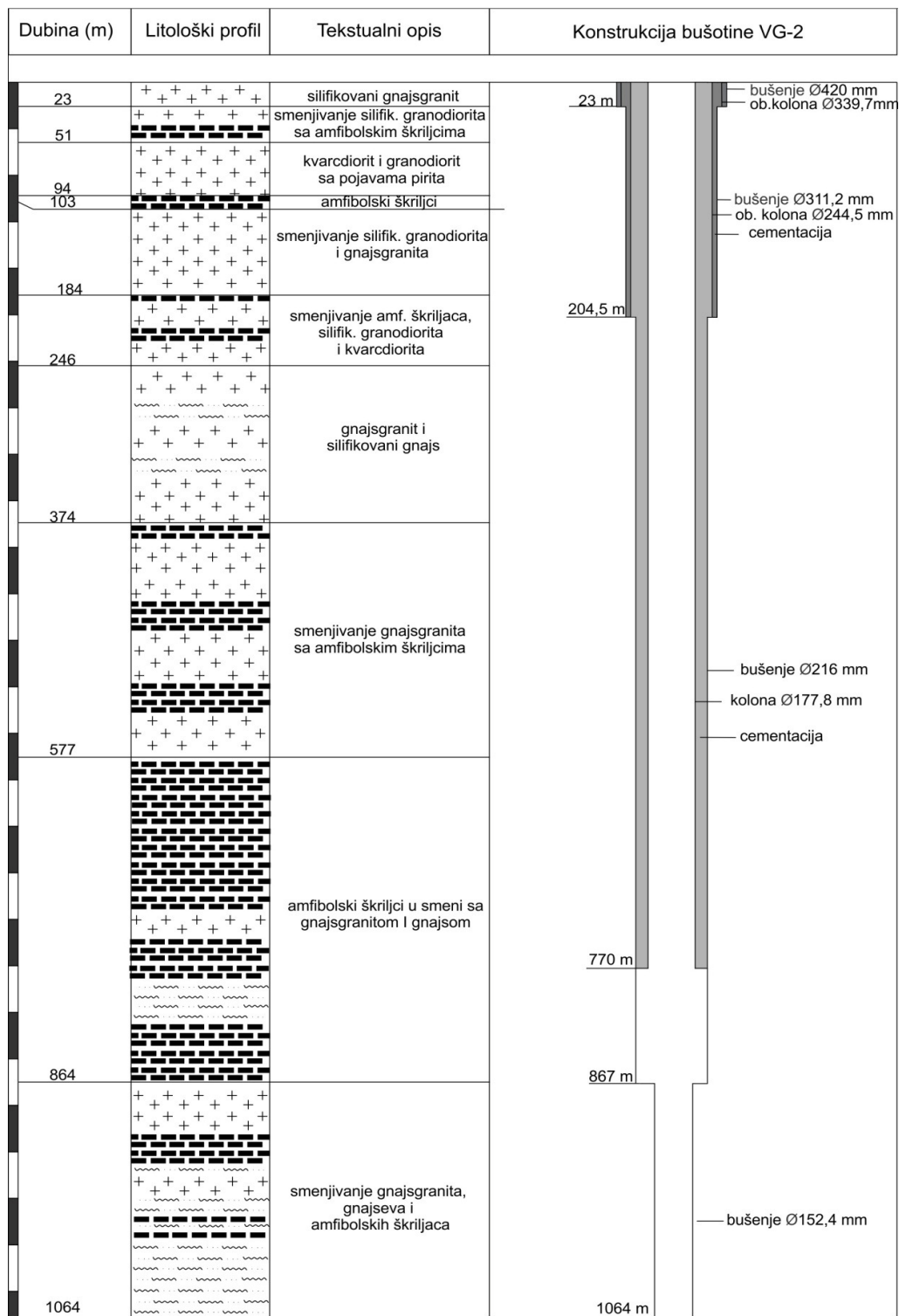
bušotine VG-3. Iz ove bušotine dobijeno je 1 l/s vode temperature 84°C iz granodiorita sa pojavama pirita u plićim slojevima i amfibolskog škriljca. Bunar A-3, urađen je do 26 m kroz hidrotermalno izmenjen škriljac i gnajsganit, na 3 m ispod kote terena se nalazio nivo vode, temperature 91°C.

U okviru istraživanja geotermalne potencijalnosti Vranjske Banje urađene su dve duboke bušotine VG-2 do 1063 m i kosa bušotina VG-3 dubine do 1604 m, odnosno po vertikalnoj osi do 1470 m.

U bušotini **VG-2** smenjuju se granodiorit, škriljci i gnajsevi (slika 25). Do 570 m dominiraju granodioriti koji su manje zastupljeni idući ka većim dubinama. Bušotina je cementirana do 770 m da bi se sprečio uticaj plićih intervala. U toj zoni registrovano je više vodonosnih intervala sa više od 50 l/s vode, temperature od 70 do 96°C. Najproduktivniji interval zahvaćen je od 864 do 890 m iz gnajsganita, temperature do 126°C. Ukupne zahvaćene količine vode iznose 26 l/s, temperature na samoizlivu iznosi 111°C, dok je pritisak na glavi bušotine 9,5 bara. Rezerve termalnih voda iz bušotine VG-2 su 26,5 l/s pri temperaturi od 102°C.

Na 120 m zapadno od bušotine VG-2 nalazi se bušotina **VG-3** (slika 26). VG-3 je kosa bušotina od dubine 45 m na dalje, sa azimutom od 120°, tako da vertikalna dubina iznosi 1470 m, za ukupnu dužinu bušenja 1604 m. U bušotini se smenjuju škriljci i gnajsevi dok su granodioriti prisuti do 145 m u smeni sa gnajsevima i škriljcima. Termokarotažom je ustanovljena temperatura od 124°C iz poroznog gnajsa na dubini od 1500-1575 m, dok je na samoizlivu dobijeno 21 l/s vode temperature 100°C. Pritisak na glavi bušotine je 8,5 bara. Rezerve termalnih voda iz bušotine VG-3 su 23,5 l/s pri temperaturi od 105°C.

Rezerve dubokih bušotina VG-2 i VG-3 iznose 50 l/s, dok rezerve Šahte 5, Periljišta, bušotine B-1b, česme i Stare kaptaze iznose 50 l/s tako da su ukupne rezerve Vranjske Banje 100 l/s (Zlokolica i saradnici, 1994, fond. dok.).



Slika 25. Litološki stub i konstrukcija bušotine VG-2 u Vranjskoj Banji (Zlokolica i saradnici, 1994, fond. dok., izmenjeno)



Slika 26. Bušotina VG-3 (foto: Petrović Pantić, 2011)

Tabela 11. Pregled hidrogeoloških pojava na području Vranjske Banje (prema podacima sa terena, 2011; i podacima: Zlokolica i saradnici, 1994, fond. dok.; Martinović i Magazinović, 2010)

Objekat	temperatura t (°C)	kapacitet Q (l/s)	dubina H (m)	vrsta hidrogeoloških pojava	status
Stara kaptaža	82	do 2		izvor	B
Peraljište	44-65	0,37 do 0,86		izvod iz kanala	-
Šahta br. 5	76-89	46-56		šahta	G, S, A
B-1	83	1,4	120	bušotina	B, V
B-1a	93		30	bušotina	-
B-1b	89-94	1,5-2,5	26	bušotina	-
B-2	84	1	44	bušotina	-
B-2a	31		300	bušotina	-
A-1	93	3,5-4,0	26	bušotina	B
A-2	84	1	44	bušotina	šahta 5
A-3	91	2,1	26	bušotina	šahta 5
VG-2	102	26,5	1064	bušotina	G,B
VG-3	105	23,5	1470 (kosa 1603)	bušotina	G, B

B-balneologija, S-staklenici, A-agrikultura, V-vodu koristi lokalno stanovništvo, G-grejanje

4.5. BUJANOVAČKA BANJA

4.5.1 Opšte karakteristike Bujanovačke Banje

Bujanovačka Banja je najjužnija banja Srpskog kristalastog jezgra (slika 27). Nalazi se pored međunarodnog puta E-75 (Beograd – Skoplje – Atina), na udaljenosti 2,5 km od Bujanovca, i 13 km od Vranja. Banja se nalazi u okviru bujanovačke kotline (400 m.n.v.) koja se na istoku i severoistoku nastavlja na vranjsku kotlinu, na jugu kotline se pruža Rujan planina (969 m.n.v.), na jugozapadu Skopska Crna Gora, na severu i severozapadu Krstilovica (1154 m.n.v.). Kotlinu drenira Južna Morava, koja se kod Bujanovca formira od Binačke Morave i Moravice sa nizom manjih i većih pritoka. Tokovi su bujičnog karaktera. Područje odlikuje umereno-kontinentalna klima, sa uticajem mediteranske klime.



Slika 27. Geografski položaj Bujanovačke banje

Prema podacima RHMZ-a, prosečna višegodišnja suma padavina (od 1946 do 1991) iznosi 49,1 mm (tabela 12).

Tabela 12. Maksimalne, minimalne i srednje vrednosti mesečnih suma padavina (mm) na kišomernoj stanici Bujanovac u periodu od 1946 do 1991 (RHMZ)

	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec	Prosek
Min	0	0	1	6	21	11	0	3	0	0	6	0	4
Max	124	122	140	104	144	245	124	133	220	146	162	142	150,5
Sr	44	5,6	44,5	48,8	68,1	68,6	48,3	38,8	44,8	54,1	66,1	57,6	49,1

4.5.2 Geološke karakteristike područja Bujanovačke Banje

➤ Litostratigrafske jedinice

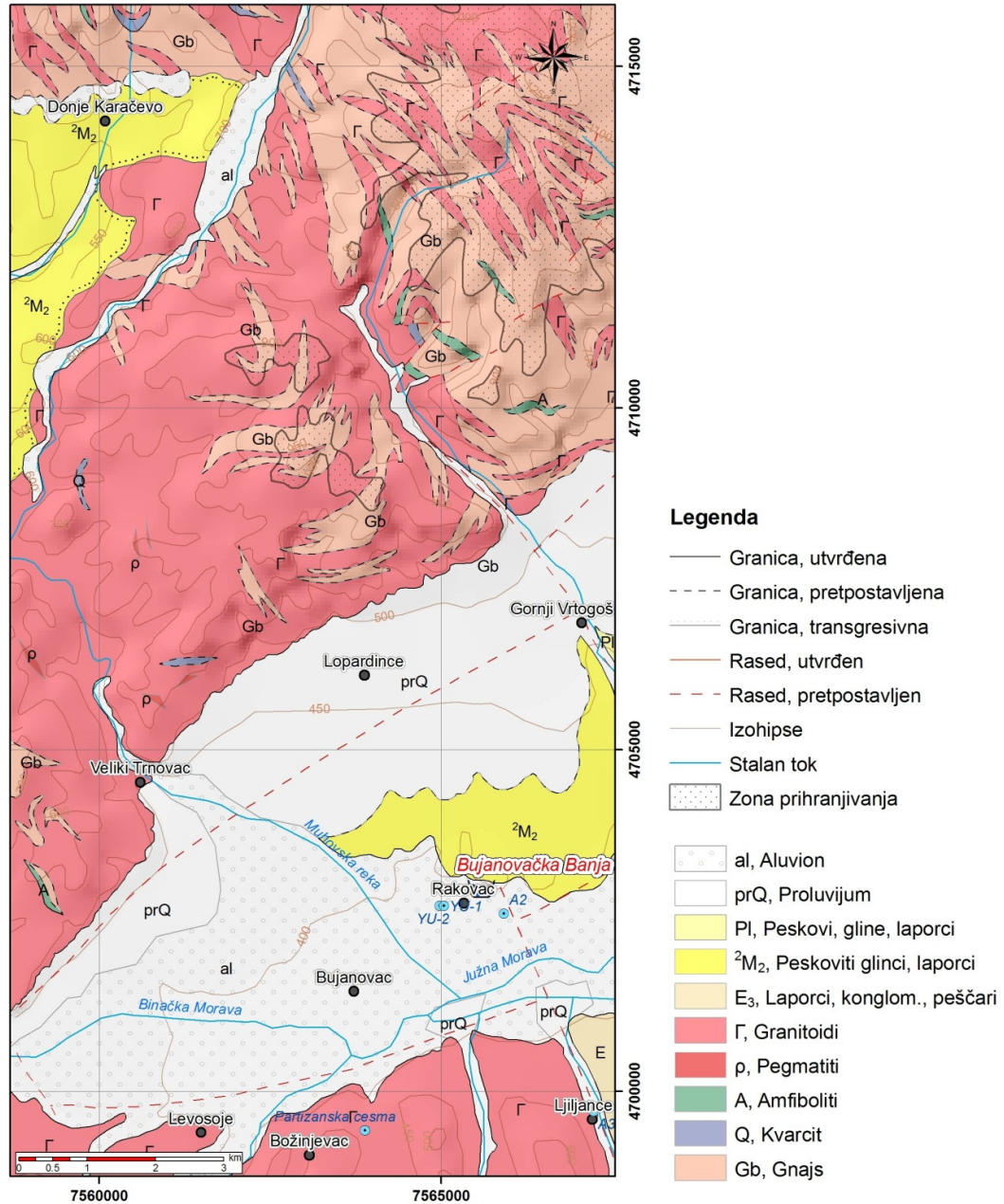
Najstarije stene na području istraživanja su kristalasti škriljci rifej-kambrijumske starosti. U okviru donjeg kompleksa Srpskog kristalastog jezgra kristalasti škriljci su predstavljeni *sitnozrnim biotitskim i biotit-muskovitskim gnajsevima (Gb)*, *amfibolskim stenama (A)* i *kvarcitima (Q)*. Utiskivanjem bujanovačkog intruziva za vreme variscijske orogeneze ove stene su pretrpele rekristalizaciju, migmatizaciju i granitizaciju pod uslovima amfibolske facije (Vukanović i saradnici, 1977). Geološka građa Bujanovačke Banje prikazana je na slici 28.

Bujanovački granitoid (Γ) se pruža na oko 660 km² pravcem SSI-JJZ. Sastoji se od centralnog granitskog tela opasanog oreolom u kome se intenzivno mešaju slivovi granita i škriljaca. Intrudovan je u dve faze. U prvoj, glavnoj fazi, utisnuto je centralno granitsko telo koje predstavlja glavninu masiva. Ovi graniti uz plagioklas skoro uvek sadrže mikroklin. U drugoj fazi utisnuti su žični graniti u obliku silova ili dajkova. Ne sadrže mikroklin i imaju više biotita od granitoida prve faze. Granitoid je variscijske starosti, star 234 mil. god. (Dimitrijević, 1958). U samoj banji graniti su nabušeni na oko 200 m, u selu Ljiljance do granita se došlo na 18 m, u selu Levosoje graniti su registrovani već na 10 m.

Pegmatiti (ρ) su rasejani u donjem kompleksu Srpskog kristalastog jezgra i bujanovačkim granitoidima u formi žica i sočiva dužine do 100 m.

U toku paleogena, odnosno eocena formirane su naslage *laporaca, alevrolita, konglomerata, peščara i glina (E₃)* preko granita i škriljaca. U zoni banje razvijen je "grusni horizont" eocena predstavljen peskovima i šljunkovima različite granulacije sa komadima i blokovima granita i škriljaca (E₃). Na osnovu istražnih bušotina na širem području banje, utvrđena je prostiranje granitnog grusa od 150 do 250 m dubine.

Miocenski sedimenti su predstavljeni peskovitim glincima, laporcima (²M₂) debljine preko 150 m u centralnom delu Bujanovačke kotline.



Slika 28. Geološka građa šireg područja Bujanovačke Banje
(Terzin i saradnici, 1976, izmenjeno)

Završna serija tercijarnog sedimentacionog ciklusa u zoni od Bujanovca ka Vranju i dalje predstavljena je *pliocenskim glinama, laporcima, peskovima i slabo vezanim peščarima (Pl)* debljine preko 200 m.

Novijim istraživanjima (Cvetković et al, 2004a), na širem području Bujanovačke banje južno i jugoistočno, uočeni su *flogopit-trahibazalti* pliocenske, miocenske, i oligocenske starosti.

Kvartarne tvorevine su razvijene u vidu aluvijalnih (*al*) i proluvijalnih (*prQ*) naslaga u zoni Bujanovačke Banje, dok su na širem području prisutne i deluvijalne i terasne naslage.

➤ Tektonika

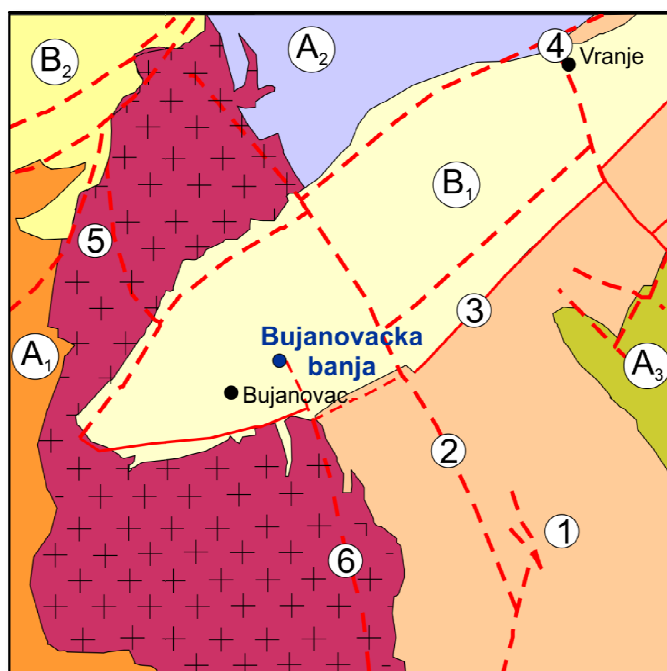
U pogledu tektonike, na širem području Bujanovca izdvajaju se dva tektonska bloka (Vukanović i saradnici, 1977): (A) Srpsko kristalasto jezgro i (B) Neogeni rovovi i potoline (slika 29). U okviru Srpskog kristalastog jezgra izdvaja se (A_1) zapadno područje, (A_2) područje Kitke, i (A_3) monoklinala Koćure.

Za vreme kaledonske i variscijske orogeneze na ovom području dolazi do nabiranja kristalastih škriljaca i utiskivanja bujanovačkog granitnog masiva u okviru ovih škriljaca. Tokom eocena i oligocena dolazilo je do diferencijalnih vertikalnih kretanja kontrolisanih aktivnošću longitudinalnih raseda. Početkom neogena dolazi do nove faze izdizanja Srpskog kristalastog jezgra i njenog komadanja na poprečne blokove, pri čemu granične površi predstavljaju transverzalni i dijagonalni rasedi, čime su formirani neogeni rovovi i potoline (B), odnosno južnomoravski ili vranjski rov (B_1). Bujanovačka Banja se nalazi u jugozapadnom obodu vranjskog rova, ali je zbog blizine bujanovačkog granitoida uočena drugačija sedimentacija u zapadnom i južnom delu. Razlike se ogledaju u znatnoj debljini bazalne serije i nižem stepenu njene litogeneze, kao i debljini i karakteru tercijarnih sedimenata. Tokom eocena, gornjeg miocena i pliocena, centralni i severni delovi vranjskog rova i njegovog oboda, bili su zahvaćeni vulkanskom aktivnošću (Vranjska Banja, Grot i Oblik) i utiskivanjem dacito-andezitske magme, pa su formirane molasno-tufne naslage debljine preko 2000 metara, što nije slučaj sa jugozapadnim delom rova (Tasić, 2006, fond. dok.).

Zajednički strukturno-tektonski elementi bujanovačkog i vranjskog basena su obodni rasedi vranjskog rova pravca pružanja SI-JZ. Posmatrajući ove rasede na nivou sedimentacionih prostora, hidrogeoloških uslova, pa i savremenog reljefa, jasno se

izdvajaju dve zasebne kotline. Kotline su međusobno povezane rasedima pravca pružanja SZ-JI, čije je prisustvo utvrđeno geofizičkim istraživanjima i istražnim bušenjem (Tasić, 2006, fond. dok.).

Krajem donjeg miocena dolazi do tonjenja uz obnavljanje dejstva longitudinalnih i stvaranje novih transferzalnih i longitudinalnih raseda. Krajem pliocena i tokom kvartara dolazi do kretanja duž ruptura u kristalastom i granitoidnom fundamentu i ova kretanja su uslovia blokovsku građu vranjskog rova. Jedan od blokova je i bujanovački blok. Rasedi duž istočnog i zapadnog oboda vranjskog rova još uvek su aktivni. Finalni stadijumi ove aktivnosti zapažaju se po pojavama mineralnih i termomineralnih voda po obodu Vranjskog rova i obnovljenim longitudinalnim dislokacijama, tako da se termalne vode Bujanovačke Banje javljaju duž Ljiljanske dislokacije.

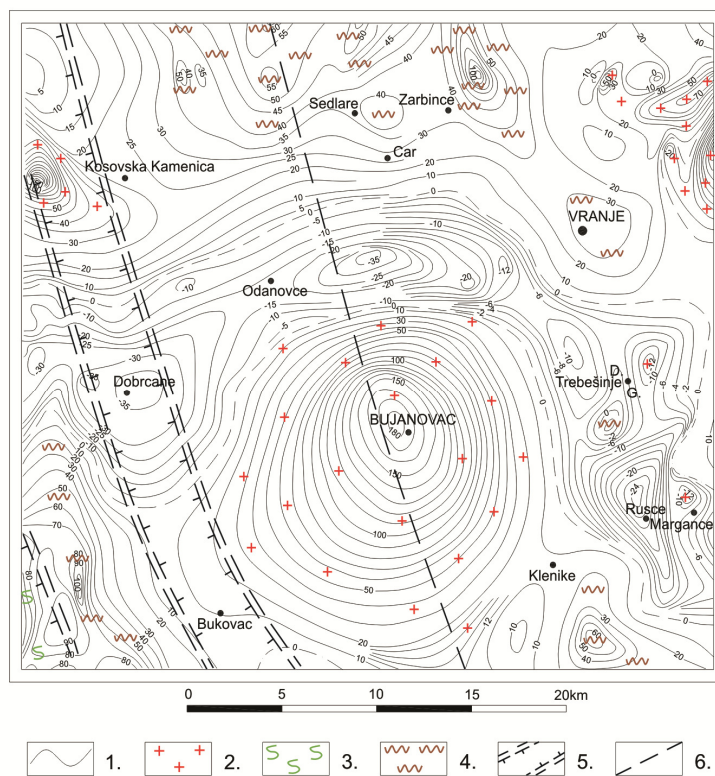


Slika 29. Pregledna tektonska karta šireg područja Bujanovačke Banje (Vukanović i saradnici, 1977; izmenjeno)

Legenda: A-Srpsko kristalasto jezgro; A1-zapadni pojas; A2-područje Kitke; A3-monoklinala Kočure; B-neogeni rovovi i potoline; B1-vranjski rov; B2-krivorečka potolina 1-basen Pčinje; 2-vrtogoško-klenički rased; 3-obodni rasedi vranjskog rova; 4-veterničko-lukovski rased; 5-Tupalska dislokacija; 6-rased Ljiljanske reke

4.5.3 Geofizička istraživanja

Elektromagnetnim sondiranjem uočeno je postojanje magnetne anomalije u području banje, koja ukazuje na postojanje mladog intruziva na dubini od oko 500 m ispod tercijarnih sedimenata u centralnom i istočnom delu kotline (Burazer, 1993, fond. dok.). Međutim, istražnom bušotinom BH-7 koja zaleže do 500 m nije se došlo do intruziva (Tasić, 2006, fond. dok.). Na osnovu aeromagnetnih ispitivanja (Vukašinović, 2010) pozitivne anomalije se nalaze u delu terena koji izgrađuju proterozojske stene, paleozojski graniti i tercijarni sedimenti (slika 30), što ukazuje da je teren u domenu anomalije potencijalo rudno i geotermalno perspektivan. Anomalija je izazvana prekrivenim uzročnikom, najverovatnije tercijarnim granitoidnim intruzivom. Nije isključeno da granitski silovi i dajkovi, utvrđeni geološkim kartiranjem u paleozojskim granitima, predstavljaju ekvivalente tercijarnog intruziva.



Slika 30. Pregledna aeromagnetno-strukturalna karta lista Vranje (Vukašinović, 2010)

Legenda: 1. izoanomale ΔT intenziteta; 2.,3. i 4.- verovatni uzročnici magnetskih anomalija: 2. tercijarni magmatiti, 3. baziti i 4. kristalaste stene; 5. dubinski razlomi; 6. značajnije dislokacije relativno nižeg reda

4.5.4 Hidrogeološke karakteristike terena

U zavisnosti od geološkog sastava i hidrogeoloških karakteristika terena, na području Bujanovačke Banje izdvajaju su se zbijeni i pukotinski tip izdani, hidrogeološki kompleks i uslovno bezvodni delovi terena (Stanković, 1988, fond. dok.; Jovanović, 2008, fond. dok.).

Zbijeni tip izdani sa slobodnim nivoom formiran je u okviru aluvijalnih i proluvijalnih naslaga. Aluvion je predstavljen peskovima i šljunkovima Binačke i Južne Morave, debljine oko 40 m. Ovaj tip izdani prihranjuje se infiltracijom atmosferskih padavina i površinskih tokova, a prazni preko kopanih bunara koji se koriste za vodosnabdevanje domaćinstava. U okviru aluvijalnih naslaga Južne Morave u selu Rakovac formirana je sekundarna izdan termomineralnih voda koja se prihranjuje isticanjem duž raseda iz podine tercijara, izgrađene od granita.

Zbijeni tip izdani sa nivoom pod pritiskom formiran je u okviru peskova različite granulacije neogene i paleogene starosti. Prihranjivanje se vrši infiltracijom voda od padavina i površinskih tokova po obodu neogenih naslaga, isticanjem iz drugih izdani formiranih u obimu tercijarnih sedimenata, kao i izdani formiranih u obimu stena po obodu tercijarnih sedimenata i u njihovoj podini, duž sistema raseda i pukotina. Pražnjenje se vrši uglavnom pretakanjem u druge vodonosne slojeve, preko većeg broja izvora u potocima i dolinama izdašnosti od 0,1 - 1 l/s kao i preko izvedenih objekata.

Zbijeni tip izdani sa nivoom pod pritiskom formiran je i u obimu *granitnog grusa eocenske starosti*, koji usled prisustva konglomerata i breča sa odlomcima granita može imati karakter intergranularno-pukotinske poroznosti, i predstavlja sekundarnu vodonosnu sredinu mineralnih i termomineralnih voda Bujanovačke kotline. Prihranjivanje se vrši infiltracijom voda od padavina po obodu bujanovačkog granitoidnog masiva gde ovi sedimenti izbijaju na površinu terena. Istražnim bušenjem je utvrđeno da se izdan formirana u ovom kompleksu prihranjuje i dotokom vode iz granita koji se nalaze u podini tercijara, pa se može reći da pukotinska izdan formirana u granitima i izdan koja je formirana u eocenskim sedimentima čine jednu složenu izdan. Pražnjenje izdani vrši se preko izvora u dolinama potoka i dolinama. Izdašnost

ovih izvora je od 0,1 do 1 l/s. Pražnjenje izdani formirane u obimu tercijarnih sedimenata vrši se i preko istražno-eksploatacionih bunara i istražnih bušotina urađenih za potrebe "Hebe" i banjskog centra "Vrelo".

Pukotinski tip izdani formiran je u okviru ispucalih, izrasedanih, tektonski oštećenih i raspadnutih delova terena izgrađenih od škriljaca i granita. Pukotine u paleozojskim škriljcima su zapunjene, tako da se u obimu ovih stena formiraju pukotinske izdani lokalnog rasprostranjenja. Prihranjivanje pukotinskog tipa izdani u škriljcima vrši se infiltracijom voda od padavina i površinskih tokova duž sistema pukotina i raseda, a pražnjenje je preko izvora male izdašnosti, uglavnom manje od 0,1 l/s. Ovaj tip izdani prazni se preko bušotina BH-2, BH-3 i BH-4 u južnom obodu basena.

Graniti na području Bujanovca odlikuju se znatnom ispucalošću i u obimu ovih stena formiran je pukotinski tip izdani, s tim da su privilegovani pravci kretanja i značajnije akumulacije podzemne vode vezani za rasedne zone i sisteme pukotina u neposrednoj blizini ovih zona. Graniti predstavljaju primarnu vodonosnu sredinu mineralnih i termomineralnih voda na ovom području. Prihranjivanje pukotinskog tipa izdani formiranog u granitima vrši se infiltracijom voda od atmosferskih padavina na otkrivenom delu granita bujanovačkog masiva. Izdani formirana u obimu granitoidnih stena prazni se preko izvora male izdašnosti, najčešće do $Q = 1$ l/s i pretakanjem u tercijarni kompleks koji čini povlatu granitima.

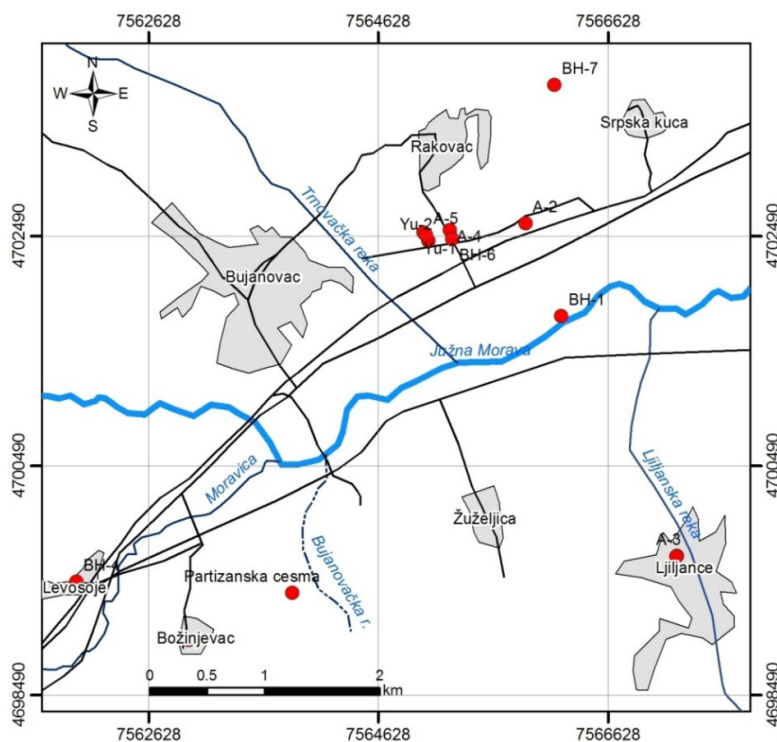
Hidrogeološki kompleks formiran je u obimu stena neogene i paleogene starosti, odnosno, u sedimentnim tvorevinama miopliocena i eocena. U obimu hidrogeološkog kompleksa dolazi do smenjivanja peskovitih sedimenata u obimu kojih je formiran zbijeni tip izdani sa nivoom pod pritiskom sa slojevima glinaca i laporaca koji predstavljaju uslovno bezvodne delove terena. Bušotine Yu-1 i Yu-2 formirane su u okviru hidrogeološkog kompleksa

Uslovno bezvodni delovi terena predstavljeni su paleozojskim škriljcima, kao i laporovitim i glinovitim sedimentima neogene i paleogene starosti.

4.5.5 Stanje i kapacitet objekata na području Bujanovačke Banje

Na širem području Bujanovačke Banje postojalo je više prirodnih pojava isticanja termalnih i mineralnih voda. Termalni izvori javljali su se u okviru dve rasedne zone: Levosoje-Božinjevac-Ljiljance i Lopardince-Rakovac-Ljiljance (slika 28). U periodu od 1970-1976. sa područja Bujanovačke Banje flaširala se mineralna voda “Kristal”, zahvaćena na dubini od 15 m iz peskovitog šljunka, aluviona Binačke Morave. U selu Rakovac postojali su ugljikiseli izvori Vrelo i Vrelce, temperature 32°C. Voda je isticala u kanal gde se formiralo blato, od kog su ljudi pravili blatne obloge i u kom su se kupali. Zbog lekovitih svojstava blata i vode u Rakovcu je izgrađen banjiski kompleks “Centar za prevenciju lečenja i rehabilitaciju invalidnosti - Vrelo”, fabrika vode “Heba”, a kasnije i fabrika vode “Bivoda”.

Prikaz najznačajnijih pojave termalnih i mineralnih voda na području Bujanovačke Banje dat je na slici 31, dok su podaci o temperaturi, izdašnosti, dubini i statusu bušotina dati u tabeli 13.



Slika 31. Mikrolokacija hidrogeoloških pojava na širem području Bujanovačke Banje

Partizanska česma se nalazi severoistočno od Božinjevca na levoj dolinskoj strani Bujanovačke reke. Česma (slika 32) predstavlja kaptirani izvor koji ističe iz pukotina u okviru granita. Izdašnost izvora je od 0,2 l/s, temperatura 13,5°C.



Slika 32. Partizanska česma (foto: Petrović Pantić, 2011)

Bušotina B-2 je jedna od najstarijih na ovom području. Urađena je 1966. godine do 32 m u Rakovcu. Na dubini od 12 m iz aluvijalnih naslaga pojavila voda pod pritiskom temperature 40°C. Bušotina je završena na 32 m, pri čemu je dobijeno 0,5 l/s mineralne vode, temperature 41°C.

Bušotina A-1 je urađena do 160 m dubine u Rakovcu. Podzemna voda se pojavljivala iz aluviona, kao i slojeva peskova tercijarne starosti, dok su najveće količine dobijene iz bazalne serije tercijarnih sedimenata, granitnog grusa (pesak sa komadima granita i škriljaca) na 138 m. Bušotina je na početku rada davala oko 10-12 l/s vode, da bi nakon 5 godina izdašnost bunara bila 7 l/s, stabilne temperature od 41,5°C. Praćenjem režima izdašnosti na bušotini A-1 uočeno je da se postepeno smanjuje izdašnost kao posledica stabilizacije samoizliva i starenja bunara (korozije). Bušotina je vremenom propala ali se formirao levak oko bušotine prečnika 5 m sa pojavom termomineralne vode i gasa u aluvijalnim naslagama do 15 m dubine.

Pijezometar P-2 je imao za cilj kaptiranje vode i gasa u blizini bušotine A-1. Pijezometar je urađen do 12,8 m, gde je došlo do priliva vode i gasa, ali se u blizini A-1 nastavilo klobučanje pa se pristupilo izradi drenaže od drenažnih perforiranih cevi. Drenažne cevi su povezane sa pijezometrom i dalje se plastičnim crevom voda odvodi u kanal na 70 m udaljenosti. U kanal se izliva 0,5 l/s čiste mineralne vode, dok se jedan deo infiltrira u aluvijalnim peskovitim šljunkovima.

Pijezometar P-1 je urađen oko 100 metara od bušotine A-1. Dubina pijezometra je 290 m, pri čemu je voda zahvaćena iz granitnog grusa od 135 do 157 m. Na samoizliv je dobijeno 0,23 l/s vode, temperature 34,5 °C.

Bušotina A-1 i pijezometri P-1 i P-2 su zatvoreni i nisu u upotrebi.

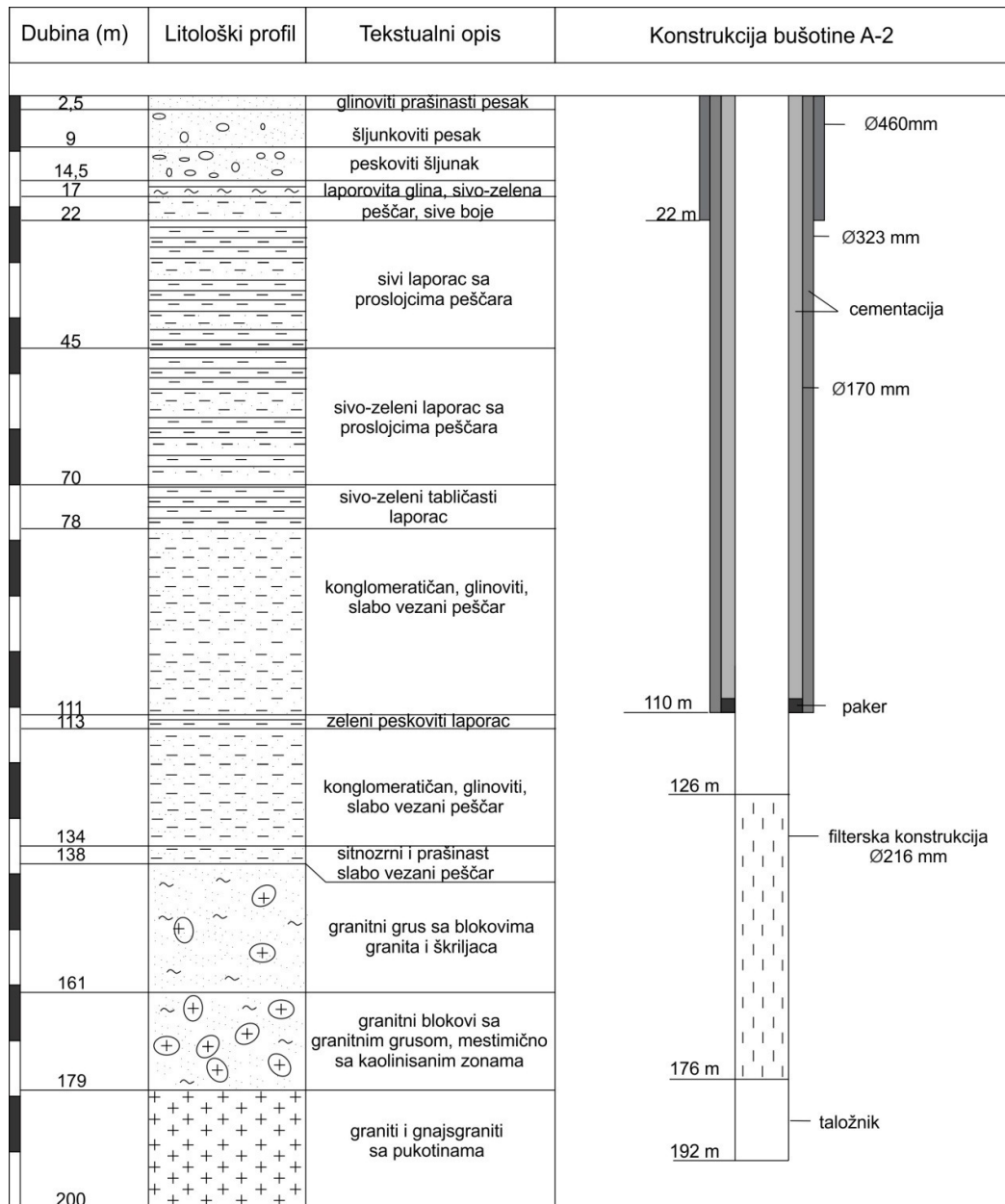
Eksplatacioni bunar A-2 urađen je na području Rakovca 1975. godine, radi zamene bušotine A-1 i zbog povoljnih rezultata dobijenih pijezometrom P-1. Bušotina je ušla u granitni grus na 130 m pa do 180 m (slika 35) gde je zahvaćena termomineralna voda temperature 43°C, izdašnosti 6 l/s (Stanković, 1988, fond. dok.), dok je kasnijim osmatranjima utvrđena izdašnost od 7,3 l/s, temperature 46,5°C (Jovanović, 2008, fond. dok.). Ukupna dubina bušotine je 200 m. Deo voda iz ovog bunara se koristi u balneološke svrhe u okviru zdravstvenog centra “Vrelo”, a deo za potrebe fabrike mineralne vode “Heba”.

U periodu od 1980-1984. izrađeno je sedam strukturno-pijezometrijskih bušotina od koji su BH-5 i BH-6 u okviru fabrike “Heba”, a ostali su u zoni Rakovac-Ljiljance i Ljiljance-Božinjevac-Levosojce.

Pijezometar BH-1 urađen je u cilju utvrđivanja položaja bazalnog dela tercijara, odnosno vodonosnog sloja sa termomineralnim vodama. Vodonosni sloj je utvrđen na samo 2 m od 141 do 143 m, predstavljen peskovitim šljunkom sa oblucima, dok se do 160 m nalazi ispućali granit. Dobijeno je 0,06 l/s vode, temperature 23,6°C.

Pijezometar BH-2 nalazi se u centru Ljiljanca, na ukrštanju raseda Lopardince-Rakovac-Ljiljance sa rasedom Levosoje-Božinjevac-Ljiljance. Pijezometar je urađen kroz izmenjene, kaolinisane i ispućale granite do 110 m, a priliv vode je registrovan od 14 do 16 m iz granitnog grusa, na 24-om metru iz izmenjenog kaolinisanog granita i na 52-om i 61-om metru iz pukotina i kaverna u granitima. Sa povećanjem dubine veći

je priliv mineralne vode, a ukupno je na samoizliv dobijeno 0,26 l/s vode temperature 16,5°C, pri čemu je izdašnost postepeno opadala. Ovaj objekat koristi stanovništvo.



Slika 33. Litološki stub i konstrukcija bušotine A-2 u Bujanovačkoj Banji (Stanković, 1988, fond. dok., izmenjeno)

Bušotina A-3 (slika 34) nalazi se neposredno pored bušotine BH-2 u Ljiljancu. Bunar je urađen do 162 m kroz granite i granitoidne stene koje su hidrotermalno dosta izmenjene i ispucale, pa se termomineralne vode javljaju u više zona. Na samoizliv je dobijeno 0,4 l/s vode temperature 21°C (Stanković, 1988, fond. dok.), dok je izdašnost postepeno opadala na oko 0,1 l/s (Jovanović, 2008, fond. dok.) kao posledica starenja bunara.



Slika 34. Bušotina A-3 u Ljiljancu (foto: Petrović Pantić, 2011)

Pijezometar BH-3 nalazi se u Božinjvcu, a rađen je u cilju definisanja južnog obodnog dela nalazišta termomineralnih voda “Heba”. Bušotina je urađena do 62,5 m, pri čemu su prilivi vode utvrđeni na 7-8 m iz granitnog grusa, na 11 metru iz amfibolskih škrljaca, i između 18-19 m i 21-62,5 m iz granita i gnajs-granita. Na samoizliv je dobijeno 0,6 l/s vode temperature 15,2°C (Stanković, 1988, fond. dok.), odnosno 0,25 l/s, temperature 14-14,8°C (Jovanović, 2008, fond. dok.).

Pijezometar BH-4 nalazi se u dvorištu bivše punionice vode “Kristal” u selu Levosoje. Dubina pijezometra je 136 m, i jedina je bušotina sa negativnim pijezometarskim nivoom. Nivo vode nakon ugradnje pijezometarske konstrukcije iznosi 0,8 m od kote terena.

U dvorištu fabrike “Heba” urađene su bušotine BH-5 i BH-6 u cilju utvrđivanja prostornog položaja vodonosnog sloja sa mineralnom i termalnom vodom.

Pijezometar BH-5 urađen je do 260 m dubine. Litološki sastav bušotine čini aluvion do 20 m, zatim izolatorski sloj do 146 m predstavljen serijom sivih tabličastih laporaca sa slojevima i proslojcima peščara, ispod kojih se nalaze laporci sa neizmeničnim smenjivanjem kvarcnih peskova i manjim slojevima kavernoznih i brečastih tufova do 202 m. Od 202 do 256 m prostire se bazalna serija tercijalnih naslaga, odnosno peskovito-šljunkoviti konglomerati sa glinenim vezivom i granitnim grusom sa slabim vodonosnim svojstima, a ispod ove serije se pruža liskunsko-hloritski gnajsganit. Filterska konstrukcija ugrađena je od 146 do 260 m u sedam intervala. Ukupno dobijena količina vode je oko 0,042 l/s, temperature 24,4°C.

Pijezometar BH-6 urađen je ispred fabrike “Heba” do 300 m dubine. Bušotina je urađena do 281 m kroz tercijarne sedimente, od 281-290 m je zahvaćen granitni grus, da bi se od 290 m ušlo u gnajsganite. Utvrđene su dve vodonosne zone, prva od 145-256 iz tercijalnih sitnozrnih peskova i peščara i od 281-295 m iz granitnog grusa. Ukupna količina vode na samoizlivu iznosi 0,106 l/s, temperature 26°C, dok je termokarotažom izmerena temperatura od 45,86°C na 296 m. Tokom 2006. godine urađena je revitalizacija pijezometra, pri čemu je izvršeno tamponiranje do 100 m. Na osnovu hemijske analize voda, voda može da se koristi samo u balneološke svrhe.

Na 30 m od pijezometra BH-6 urađen je **bunar A-4** do 310 m dubine. Do 288 m se nalaze tercijarne naslage, a ispod se pružaju graniti. Manji priliv vode je registrovan od 154 m i dublje iz slabo vezanih peskova i peščara, dok su veće količine voda dobijene iz bazalnog dela tercijalara i granitoida. Temperatura vode je 36°C, $Q=0,33$ l/s. Ovaj bunar je 2001. uključen u proces proizvodnje u okviru fabrike Heba, a 2006. je rađena revitalizacija u cilju smanjenja količine fluora u vodi. Nakon revitalizacije dobijeno je 3,5 l/s vode temperature 31°C, pri čemu se sadržaj fluora smanjio od 4-4,5 mg/l na 1,35 mg/l (Jovanović, 2008, fond.dok; Krunić et al, 2013).

Bunar A-5 poznat i kao “prof. Mihajlo Simić” je urađen do 391 m, pri čemu se u litološkom profilu do 10 m nalaze aluvijalni peskovi i šljunkovi, zatim do 179,7 m su neogeni laporci i glinci sa peskovima, a do 391 m je granitni grus i kompaktni graniti.

Temperatura vode je 44°C, izdašnost 1,4 l/s. Bunar je urađen 2002. godine u cilju dobijanja novih količina termomineralne vode.

Pijezometar BH-7 rađen je na 2 km severoistočno od banje u cilju utvrđivanja uslova formiranja i zahvatanja većih količina ugljikiselih voda. Dubina bušotine je 555,2 m, tako da je do 491 m probušen kompleks neogene laporovito-peščarske serije, a potom se ušlo u liskunovito-biotitske granite. Voda se pojavila na 475 m dubine, ali su najznačajnije količine voda dobijene iz granita na 503-527,7 m. Temperatura vode je stabilna i iznosi 42,5°C, dok se izdašnost smanjivala od 3 l/s do 1,1 l/s. Voda iz istražne bušotine BH-7 je cevovodom dovedena do Zdravstvenog centra gde se flašira u pogonu A.D. "Lenex-Vrelo" pod nazivom "Prohor". Zbog neizolovanosti cevovoda temperatura vode se smanjivala od 42 do 22°C na isticanju. Izolacijom cevovoda bi se obezbedila stabilna temperatura (Đajić i saradnici, 2007) i omogućila dodatna količina vode za potrebe centra.

U Rakovcu je izgrađena fabrika za flaširanje voda od strane preduzeća Yumko pod nazivom "Bivoda", gde se danas eksploatišu malomineralizovane vode iz bunara B-1 i B-2 i ugljokisele mineralizovane vode iz bušotina Yu-1 i Yu-2.

Bunari Yu-1 i Yu-2 su urađeni do dubine od 210 m. Aluvijalni sedimenti su do 20 m, a ispod njih su laporci, glinci, peščari. U bušotini Yu-1, prema karotažu vodonosni intervali su utvrđeni na 133-143 m iz karbonatnog laporca, 174-176 iz laporaca i 183-187 m iz peščara, dok granitni grus nije registrovan. Bušotina je zacevljena do 57,5 m. Bušotina Yu-2 je sanirana 2011. godine. Iako je rastojanje između ovih objekata 324 m nema međusobnog uticaja na rad bunara, kao posledica slabih filtracionih karakteristika (10^{-4} do 10^{-5} m²/s) (Tasić, 2006, fond. dok.).

Plitki objekti **B-1 i B-2** (Bivoda) zahvataju malomineralizovanu vodu iz srednjeznog i krupnozrnog peska sa dubine 6 do 18,4 (B-1), odnosno od 15 do 32 m (B-2), na međusobnom rastojanju od 100 m. Temperatura vode je od 12,7 do 14,2°C, sa količinom voda od 6 l/s po objektu, odnosno ukupno 12 l/s.

Za flaširanje malomineralizovane vode Heba urađene su bušotine **pod B-1, B-4, B-7 i B-8** koji kaptiraju vode iz peskovito-šljunkovitih sedimenata aluvijalnih naslaga. Voda iz bunara B-1 i B-4 se flašira pod nazivom "Heba natural", a voda iz bunara B-7 i B-8

koristi se kao tehnička voda. Mineralizacija ovih voda je od 303 do 493 mg/l (Jovanović, 2012, fond. dok.).

Ukupne rezerve termalnih voda na području Bujanovačke Banje iznose 14,85 l/s (računato na osnovu podataka Jovanović, 2008, fond. dok. i Tasić, 2006, fond. dok.).

Tabela 13. Pregled hidrogeoloških pojava na području Bujanovačke Banje (prema podacima sa terena, 2011 i podacima fondovske dokumentacije: Stanković, 1988, Tasić, 2006, Jovanović, 2008, Jovanović, 2012)

Objekat	temperatura t (°C)	izdašnost Q (l/s)	dubina H (m)	vrsta hidrogeoloških pojava	status
Partizanski izvor	13,5	0,2		izvor	V
A-1	41		160	bušotina	zatvoren
A-2	46,5	7,31	200	bušotina	B
A-3	20	0,12	162	bušotina	V
A-4	31	3,5	310	bušotina	F, Heba
A-5	44	1,4	391	bušotina	ne koristi se
Yu-1	29	1,4	210	bušotina	F, Bivoda
Yu-2	29	1,1	210	bušotina	F, Bivoda
B-1	12,7 do 14,2	6	25	bušotina	F, Bivoda
B-2	12,7 do 14,2	6	40	bušotina	F, Bivoda
P-1	34	0,23	290	pijezometar	nije u funkciji
P-2			12,8	pijezometar	nije u funkciji
BH-1	23,6	0,06		pijezometar	ne koristi se
BH-2	16,5	0,26-0,05	110	pijezometar	V
BH-3	14-14,8	0,25	62,5	pijezometar	ne koristi se
BH-4			136	pijezometar	ne koristi se
BH-5	24,4	0,042	260	pijezometar	ne koristi se
BH-6	26	0,106	310	pijezometar	zatvoren
BH-7	42,5	3-1,1	555,2	pijezometar	nije u funkciji
B-1	12	11,9	20	bušotina	F, Heba
B-4	11	11,5	17	bušotina	F, Heba
B-7	13	4,5	14	bušotina	F, Heba
B-8	12	5,1	15	bušotina	F, Heba

Legenda: V-vodu koristi lokalno stanovništvo; B-balneologija; F-flaširanje ili za potrebe fabrike (tehnička voda)

5. REZULTATI I DISKUSIJA

5.1. Rezultati i diskusija hemijskih analiza voda

Zbog specifične geologije i tektonike terena, kao i uslova formiranja voda, na području Srpskog kristalastog jezgra pojavljuju se podzemne vode do 111°C, različite po vrednosti mineralizacije, sadržaja gasova i različitog hemijskog sastava. Hemijske analize 20 analiziranih voda na području Srpskog kristalastog jezgra date su u tabeli 14.

Od gasova ugljen-dioksid je dominantan u vodama Sijarinske Banje, Tulara, Viče i Bujanovačke Banje, dok je u manjoj meri prisutan i u vodama Ribarske i Vranjske Banje (koje su dominantno azotne). Ugljikokisele vode se najčešće pojavljuju u zonama velikih raseda, u zoni tercijarnog i kvartarnog vulkanizma i u okviru regionalnog metamorfizma (Aljtoovski, 1973). Ugljen-dioksid u termalnim vodama posledica je složenih geohemijskih i magmatskih procesa koji se dešavaju u dubokim delovima zemlje. Na osnovu izotopa $\delta^{13}\text{C}$ Milivojević (2003) zaključuje da je CO_2 u Vranjskoj i Bujanovačkoj Banji jednim delom magmatskog porekla, dok drugim delom je produkt termičkog razlaganja i hidrolize karbonatnih stena, odnosno mermera, dok je CO_2 u Sijarinskoj Banji poreklom od termičkog razlaganja mermera. Novijim proučavanjem formiranja ugljikiselih mineralnih voda Srbije (Marinković i saradnici, 2012), ugljenik je poreklom od karbonata hidrotermalnih procesa, sedimentnih, metamorfnih ili magmatskih stena. Proces generisanja CO_2 uslovljen je geotemperaturnim uslovima koji su na datom području vezani za tercijarni vulkanizam i intruzivni magmatizam sa hidrotermalnim procesima kao završnim fazama tih pojava. Na dubinama ispod 3 km vladaju povoljni geotemperaturni uslovi za temperaturnu metamorfozu karbonata i oslobađanje CO_2 (Marinković i saradnici, 2012).

Prema vrednosti pH analizirane termalne vode su neutralne do alkalne. Elektroprovodljivost podzemnih voda Srpskog kristalastog jezgra je u opsegu od 200 do 5880 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sa medijanom od 3230 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (tabela 14). Na osnovu vrednosti mineralizacije, šest analiziranih voda (vode Prolom i Ribarske Banje i voda iz bušotine B-1 u Vranjskoj Banji) su malomineralizovane ($M < 1 \text{ g/l}$) i četrnaest voda (vode Sijarinske, Bujanovačke i Vranjske Banje (izuzev B-1), vode iz bušotina u Tularu i u Viči) su mineralizovane ($M > 1 \text{ g/l}$). Jonski balans je od -2,66 % do 4,67 %, što ukazuje na ispravnost hemijskih analiza.

Tabela 14. Hemijske analize termalnih voda Srpskog kristalastog jezgra (rađene u laboratoriji BGR, Berlin, 2011)

Element	Jed.	B-4	B-5	RB-4	RB-5	CRB-1	Aragon	Gejzer	B-4	Inhal.	Tulare	Viča	Stara kaptaza	B-1	VG-2	VG-3	Part. česma	A-3	A-2	Yu 2	Yu 1	Sl.list 53/05
pH		8,9	9,3	9,1	9,2	8,4	6,8	6,8	6,8	6,8	6,5	7,0	7,4	7,2	8,0	8,0	6,6	6,6	6,5	6,7	6,6	-
Ep	μS/l	212	200	417	426	424	4300	4270	4330	4320	5880	4080	1780	1400	1688	1658	2380	4260	4460	4300	4560	2500
Miner.	mg/l	138	130	271	277	279	2795	2775	2814	2808	3822	2652	1157	910	1097	1078	1547	2769	2899	2795	2964	-
Na	mg/l	45,3	47	88,5	88,4	82,0	1126	1126	1146	1144	1469	1135	415	285	398	386	594	1165	1257	1107	1216	200
K	mg/l	0,3	0,2	1,5	1,5	2,0	47,0	44,6	49,6	47,1	32,8	25,0	18,5	11,4	17,5	16,5	25	44,7	45,5	37,3	52	-
Ca	mg/l	5,13	1,88	1,9	2,0	8,67	35,9	39,3	33,4	39,3	141,0	19,88	13,2	19,2	8,62	11,4	51,5	94,8	61,28	65,5	85,4	150
Mg	mg/l	0,064	0,017	0,03	0,01	1,7	16,7	16,5	16,2	16,2	56,7	7,54	0,471	1,24	0,314	0,43	9,27	12,5	7,96	21,2	20,6	50
HCO ₃	mg/l	124	113	111	97	149	2961	2996	2977	2969	3115	2760	559	267	488	497	1604	3070	3250	3015	3290	600
CO ₃	mg/l	1	4	6,0	8,0	3,0	-	-	-	-	-	-	8	3	22	10	-	-	-	-	-	-
SO ₄	mg/l	3,69	2,93	92,9	95,8	73,8	77,9	75,0	76,1	80,8	775	1,54	360	364	329	328	97,5	200	180	98,1	173	250
Cl	mg/l	2,48	1,79	1,78	1,78	2,64	92,0	93,3	93,1	92,4	215,0	130,0	34,6	45	48,5	47,9	22,2	56,4	54,2	52,3	54,1	250
J.B.	%	-2,66	0,0	1,01	2,77	1,03	0,54	0,11	1,02	1,55	2,1	2,65	3,9	1,73	4,67	3,83	1,44	1,3	0,7	1,06	0,9	-
Ag	μg/l	0,001	0,001	0,003	<0,001	0,001	0,007	0,005	0,004	0,003	0,013	0,004	0,003	0,001	0,001	0,388	0,004	0,004	0,004	0,006	0,003	-
Al	μg/l	4,3	9,8	27,1	47	2,1	2,2	2,0	2,2	5,4	12,2	6,4	125	6	13	24	9,1	16,3	3,7	12,3	1,16	200
As	μg/l	4,41	5,02	0,01	0,01	0,01	8,42	8,01	8,64	10,5	0,05	0,01	7,66	0,58	6,56	6,42	12,3	43,7	58,6	0,25	1,13	10
B	μg/l	19	24	49	51	59	7628	7386	7154	7084	18152	22925	1360	1061	1209	1190	2356	5222	4516	5054	5660	1000
Ba	mg/l	3	2	0,003	0,005	0,007	0,303	0,353	0,371	0,337	0,019	0,26	0,061	0,052	0,054	0,073	0,016	0,043	0,095	0,104	0,152	0,7
Be	μg/l	0,002	0,001	0,034	0,034	0,026	1,39	2,03	1,28	2,24	2,54	2,96	0,652	0,367	0,319	0,255	0,117	4,05	3,3	0,025	0,013	-
Bi	μg/l	0,0004	<0,001	0,001	<0,001	0,001	0,007	0,001	0,002	0,001	0,005	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,001	0,002	-
Br	mg/l	0,012	0,011	0,006	0,006	0,010	0,146	0,241	0,201	0,145	0,563	0,228	0,049	0,066	0,072	0,071	0,052	0,099	0,121	0,131	1,71	-
Cd	μg/l	0,001	0,001	0,001	<0,001	<0,001	0,003	0,003	0,002	0,003	0,005	0,002	0,007	0,001	0,004	0,006	0,002	0,004	0,005	0,002	0,007	3
Ce	μg/l	0,001	0,001	0,011	0,005	0,001	0,004	0,004	0,003	0,01	0,035	0,011	0,082	0,006	0,004	0,012	0,07	0,047	0,012	0,133	0,003	-
Co	μg/l	0,003	0,004	0,005	0,004	0,003	0,006	0,003	0,004	0,015	0,005	0,006	0,13	0,004	0,006	0,008	0,028	0,048	0,009	0,051	0,026	-
Cr	μg/l	1,35	1,19	0,04	0,01	0,01	0,03	0,02	0,03	0,02	0,07	0,03	0,65	0,01	0,21	1,31	0,03	0,45	0,03	0,06	0,29	50
Cs	μg/l	0,83	1,0	4,12	3,21	4,62	101	101	102	98,7	517	40	47	35	44,4	43,7	0,25	39,3	72,6	0,24	0,385	-

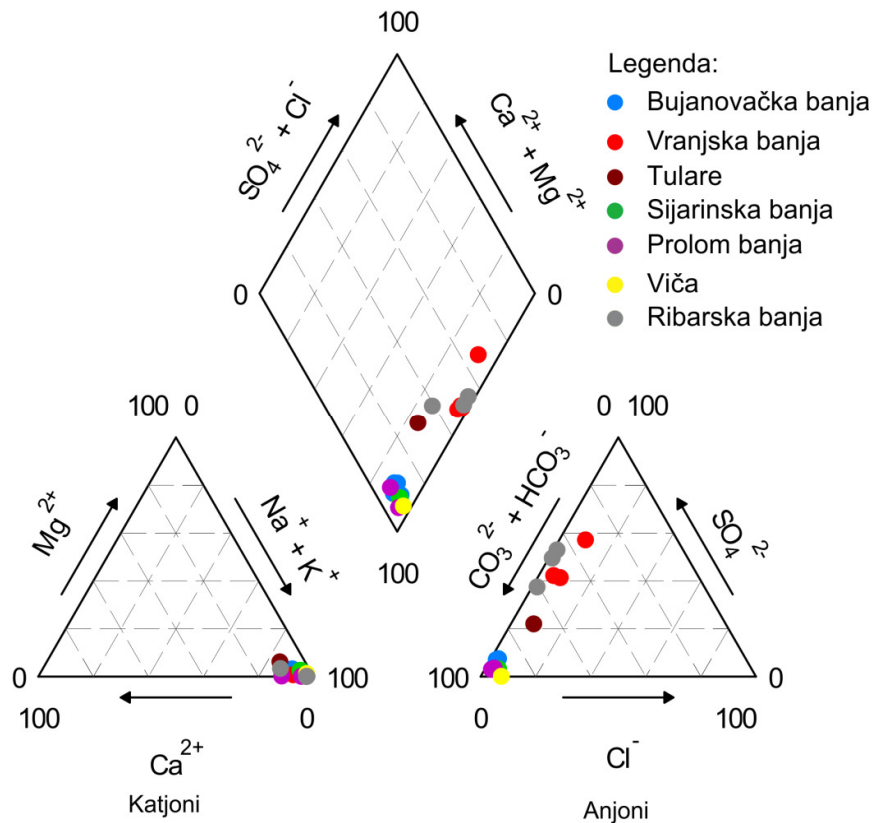
Element	Jed.	B-4	B-5	RB-4	RB-5	CRB-1	Aragon	Gejzer	B-4	Inhal.	Tulare	Viča	Stara kaptaza	B-1	VG-2	VG-3	Part. česma	A-3	A-2	Yu 2	Yu 1	Sl.list 53/05
Cu	µg/l	0,23	0,02	0,47	0,11	0,22	0,3	0,06	0,04	0,69	0,12	0,03	0,17	0,04	28	13,8	0,03	0,07	5,6	0,86	0,452	2000
Dy	µg/l	0,001	0,001	0,006	0,002	0,001	0,002	0,006	0,003	0,004	0,056	0,108	0,034	0,018	0,002	0,003	0,037	0,05	0,04	0,019	0,003	-
Er	µg/l	0,001	0,001	0,004	0,001	<0,001	0,002	0,004	0,002	0,003	0,03	0,202	0,017	0,012	0,001	0,002	0,036	0,045	0,04	0,015	0,004	-
Eu	µg/l	<0,001	<0,001	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	0,001	0,007	0,001	0,011	0,002	<0,001	<0,001	0,005	0,006	0,005	0,003	0,002	-
Fe	mg/l	0,002	0,002	0,045	0,001	0,001	0,078	0,133	0,172	1,418	0,106	0,072	0,17	0,096	0,040	0,024	1,18	1,64	0,72	0,62	3,88	1
F	mg/l	0,099	0,102	2,05	2,07	1,49	3,09	3,2	3,15	3,07	4,05	15,7	11	8,88	9,3	9,17	2,68	5,81	6,78	0,7	1,16	1,5
Ga	µg/l	0,189	0,535	2,19	2,02	1,19	0,052	0,055	0,057	0,057	0,006	0,036	1,27	0,449	1,04	0,895	0,007	0,007	0,003	0,005	<0,001	-
Gd	µg/l	0,001	0,001	0,004	0,001	0,001	0,008	0,008	0,007	0,01	0,054	0,021	0,04	0,01	0,003	0,004	0,023	0,027	0,016	0,02	0,004	-
Ge	µg/l	0,27	0,35	2,78	3,19	2,87	18,9	19,2	18	19,1	36,9	141	18	16,3	17	16,7	11	31,4	34,9	8,91	16,2	-
Hf	µg/l	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001	0,003	0,003	0,003	0,002	0,005	0,021	0,008	0,002	0,002	0,002	0,002	0,004	0,003	0,003	0,004	-
Hg	µg/l	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08	0,03	0,04	0,07	0,06	0,13	0,02	0,04	0,05	0,02	<0,01	1
Ho	µg/l	<0,001	<0,001	0,001	<0,001	<0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,011	0,041	0,006	0,004	<0,001	0,001	0,01	0,014	0,013	0,005	0,002	-
I	µg/l	2,3	2,2	0,6	0,9	1	14,4	20,6	21,5	16,8	20,9	30,9	6,3	13	9,9	9,9	11	9,8	9,2	9,0	19,1	-
La	µg/l	0,001	0,001	0,005	0,003	<0,001	0,008	0,009	0,008	0,011	0,017	0,009	0,027	0,004	0,003	0,009	0,034	0,026	0,01	0,061	0,004	-
Li	mg/l	0,002	0,001	0,06	0,062	0,07	1,14	1,12	1,08	1,09	1,77	0,72	0,320	0,222	0,292	0,28	0,435	0,850	0,906	1,061	0,985	-
Lu	µg/l	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,061	0,003	0,002	<0,001	0,001	0,005	0,006	0,005	0,003	0,0015	-
Mn	mg/l	<0,001	<0,001	0,002	0,001	0,001	0,008	0,012	0,007	0,012	0,376	0,107	0,026	0,104	0,007	0,015	0,102	0,107	0,056	0,043	0,036	50
Mo	µg/l	0,401	0,427	3,89	3,96	4,05	0,014	0,01	0,013	0,012	0,019	0,007	0,107	0,609	0,096	0,142	0,431	0,247	0,038	0,04	0,268	-
Nb	µg/l	0,002	0,001	0,001	0,002	0,001	0,003	0,003	0,003	0,002	0,003	6,37	0,004	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,002	0,004	0,006	-
Nd	µg/l	0,001	0,001	0,007	0,003	0,001	0,004	0,005	0,003	0,009	0,044	0,01	0,104	0,006	0,002	0,004	0,052	0,036	0,013	0,062	0,002	-
Ni	µg/l	0,05	0,03	0,38	0,06	0,18	0,13	0,09	0,09	0,15	0,2	0,08	0,2	0,1	0,69	0,97	0,13	0,38	0,68	0,44	1,29	20
Pb	µg/l	0,02	0,04	0,25	0,04	0,02	0,04	0,01	0,01	0,13	0,04	0,01	0,12	0,02	0,41	0,22	0,01	0,02	1,15	0,06	0,032	10
Pr	µg/l	<0,001	<0,001	0,002	0,001	<0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,007	0,002	0,016	0,001	0,001	0,001	0,011	0,007	0,003	0,016	0,0005	-
Rb	µg/l	0,59	0,54	8,64	8,31	13,1	247	245	247	240	219	128	116	68,1	108	105	78,4	324	303	102	163	-
Sb	µg/l	0,103	0,32	0,008	0,003	0,011	1,49	1,58	1,58	1,74	0,008	0,003	1,02	0,136	0,947	1,18	0,004	0,035	0,14	0,027	0,813	5
Sc	µg/l	0,04	0,03	0,04	0,05	0,05	0,12	0,11	0,11	0,1	0,19	0,28	0,19	0,11	0,14	0,12	0,11	0,24	0,19	0,15	0,348	-
Se	µg/l	0,12	0,17	<0,001	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,06	0,01	0,06	0,06	0,02	0,03	0,03	0,03	0,033	10

Element	Jed.	B-4	B-5	RB-4	RB-5	CRB-1	Aragon	Gejzer	B-4	Inhal.	Tulare	Viča	Stara kaptaza	B-1	VG-2	VG-3	Part. česma	A-3	A-2	Yu 2	Yu 1	Sl.list 53/05
Sm	µg/l	0,001	<0,001	0,003	0,001	0,001	0,005	0,006	0,005	0,007	0,023	0,009	0,035	0,006	0,002	0,003	0,017	0,015	0,009	0,018	0,002	-
Sn	µg/l	0,003	0,003	0,016	0,005	0,008	0,015	0,007	0,009	0,008	0,023	0,008	0,018	0,007	0,152	0,026	0,005	0,01	0,019	0,012	0,016	-
Sr	mg/l	0,049	0,021	0,096	0,091	0,29	1,86	1,99	1,91	1,89	2,73	0,515	0,666	0,663	0,674	0,634	0,895	1,69	1,56	1,19	1,49	-
Ta	µg/l	0,001	<0,001	0,001	0,001	<0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	-
Tb	µg/l	<0,001	<0,001	0,001	<0,001	<0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,009	0,008	0,006	0,002	<0,001	<0,001	0,005	0,006	0,004	0,003	<0,001	-
Te	µg/l	0,002	0,002	0,003	0,003	0,004	0,012	0,012	0,012	0,009	0,021	0,007	0,011	0,006	0,007	0,006	0,006	0,012	0,014	0,01	0,035	-
Th	µg/l	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,004	0,004	0,003	0,007	0,002	0,002	0,002	0,004	0,004	0,003	0,028	0,001	-
Ti	µg/l	0,21	<0,001	0,14	0,13	0,03	0,08	0,03	0,05	0,09	0,11	0,04	0,22	0,04	0,1	0,18	0,24	0,15	0,07	0,39	0,115	-
Tl	µg/l	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,324	0,356	0,38	0,306	0,004	0,002	0,444	0,099	0,215	0,286	0,002	0,004	0,006	0,002	0,007	-
Tm	µg/l	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,044	0,002	0,002	<0,001	<0,001	0,006	0,008	0,007	0,002	0,001	-
U	µg/l	2,85	2,32	0,002	0,001	0,022	0,01	0,011	0,008	0,012	2,48	0,053	0,055	0,002	0,006	0,01	1,09	0,109	0,01	0,013	1,83	-
V	µg/l	7,78	7,95	0,01	0,01	0,01	0,08	0,15	0,06	0,12	0,32	0,07	0,11	0,01	0,01	0,04	0,05	0,31	0,05	0,06	4,45	-
W	µg/l	0,38	0,56	23,2	23,7	14,8	2,9	2,59	2,46	2,26	3,55	8,72	150	146	138	138	0,31	0,38	2,22	0,18	0,102	-
Y	µg/l	0,009	0,007	0,041	0,012	0,004	0,028	0,048	0,027	0,037	0,366	1,09	0,165	0,130	0,012	0,026	0,455	0,489	0,598	0,175	0,081	-
Yb	µg/l	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,004	0,004	0,002	0,004	0,025	0,375	0,017	0,015	0,002	0,002	0,036	0,048	0,041	0,016	0,009	-
Zn	µg/l	0,49	0,03	2,39	16,7	0,82	0,79	0,39	0,37	1,98	0,67	0,38	1,98	0,11	5,67	8,45	1,28	1,63	7,05	5,77	1,1	-
Zr	µg/l	0,052	0,001	0,086	0,021	0,003	0,015	0,016	0,016	0,007	0,068	2,16	0,021	0,007	0,007	0,011	0,062	0,123	0,026	0,406	1,11	-
NO ₃	mg/l	2,31	1,59	0,006	0,01	0,012	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,06	<0,001	0,01	0,01	0,04	0,02	2,11	0,36	0,46	50
NO ₂	mg/l	0,014	0,039	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	0,14	0,1
NH ₄	mg/l	<0,01	<0,01	0,17	0,18	0,14	1,62	1,69	1,66	1,54	4,39	2,63	0,26	0,4	0,33	0,4	0,37	0,76	<0,01	0,01	-	0,5
PO ₄	mg/l	0,09	0,05	0,03	<0,02	<0,02	0,27	0,28	0,22	0,35	0,44	0,18	0,03	0,02	0,02	-	0,14	0,38	0,3	0,8	0,65	-
BO ₂	mg/l	0,56	0,27	1,03	0,47	0,005	29,1	28,4	28,8	28,5	73,5	91,0	5,4	4,45	5,08	5,03	8,8	18,6	16,4	19,4	-	-
SiO ₂	mg/l	32,6	27,9	43,6	43,4	38,6	66,7	65,7	66,7	67,1	52,3	28,8	117	72,7	113	110	38,6	55,7	78,1	70	88,8	-

Tabela 15. Statistički parametri analiziranih voda (n=20)

Element Jed.	min	25%	median	75%	Max	Element Jed.	min	25%	median	75%	Max
pH	6,5	6,6	6,9	8,1	9,3	La µg/l	0,001	0,004	0,009	0,014	0,061
Ep µS/l	200	1156,5	3230	4305	5880	Li mg/l	0,001	0,184	0,57	1,08	1061
Miner. mg/l	130	752,25	2099,5	2798,25	3822	Lu µg/l	0,001	0,001	0,002	0,005	0,061
Na mg/l	45,3	235,875	850,5	1144,5	1469	Mn mg/l	0,001	0,007	0,0205	0,09	0,376
K mg/l	0,2	9,05	25	44,9	52	Mo µg/l	0,007	0,017	0,124	0,43	4,05
Ca mg/l	1,88	8,6	26,6	53,9	141	Nb µg/l	0,001	0,002	0,002	0,003	6,37
Mg mg/l	0,01	0,4	7,75	16,3	56,7	Nd µg/l	0,001	0,002	0,005	0,018	0,104
HCO₃ mg/l	97	237,5	2182	3000,75	3290	Ni µg/l	0,03	0,09	0,165	0,395	1,29
CO₃ mg/l	1	3	6	8	22	Pb µg/l	0,01	0,02	0,04	0,12	1,15
SO₄ mg/l	1,54	75,8	96,65	232	775	Pr µg/l	0,0005	0,001	0,002	0,007	0,016
Cl mg/l	1,78	17,3	50,4	92,1	215	Rb µg/l	0,54	54,35	112	241,25	324
Ag µg/l	0,001	0,002	0,004	0,004	0,388	Sb µg/l	0,003	0,01	0,138	1,06	1,74
Al µg/l	1,16	3,3	7,75	13,8	125	Sc µg/l	0,03	0,087	0,115	0,19	0,348
As µg/l	0,01	0,2	5,72	8,4	58,6	Se µg/l	0,01	0,02	0,03	0,046	0,17
B µg/l	19	810,5	3436	7101,5	22925	Sm µg/l	0,001	0,002	0,006	0,012	0,035
Ba mg/l	0,003	0,037	0,084	0,3	3	Sn µg/l	0,003	0,007	0,009	0,016	0,152
Be µg/l	0,001	0,03	0,34	2	4,05	Sr mg/l	0,021	0,45	0,78	1,73	2,73
Bi µg/l	0,0004	0,001	0,002	0,002	0,007	Ta µg/l	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003
Br mg/l	0,006	0,04	0,08	0,16	1,71	Tb µg/l	0,001	0,001	0,003	0,006	0,009
Cd µg/l	0,001	0,002	0,003	0,004	0,007	Te µg/l	0,002	0,005	0,008	0,012	0,035
Ce µg/l	0,001	0,003	0,008	0,02	0,133	Th µg/l	0,001	0,001	0,002	0,004	0,028
Co µg/l	0,003	0,004	0,006	0,017	0,13	Ti µg/l	0,03	0,06	0,11	0,165	0,39
Cr µg/l	0,01	0,027	0,035	0,33	1,35	Tl µg/l	0,001	0,002	0,005	0,29	0,44
Cs µg/l	0,24	2,65	39,65	79,12	517	Tm µg/l	0,001	0,001	0,002	0,006	0,04
Cu µg/l	0,02	0,055	0,19	0,52	28	U µg/l	0,001	0,009	0,012	0,35	2,85
Dy µg/l	0,001	0,002	0,005	0,035	0,108	V µg/l	0,01	0,0325	0,065	0,19	7,95
Er µg/l	0,001	0,002	0,004	0,023	0,202	W µg/l	0,102	0,515	2,745	23,325	150
Eu µg/l	0,001	0,001	0,002	0,005	0,011	Y µg/l	0,004	0,022	0,044	0,22	1,09
Fe mg/l	0,001	0,036	0,1	0,645	1418	Yb µg/l	0,001	0,002	0,004	0,019	0,375
F mg/l	0,099	1,91	3,12	7,3	15,7	Zn µg/l	0,03	0,465	1,19	3,21	16,7
Ga µg/l	0,003	0,02	0,057	0,967	2,19	Zr µg/l	0,001	0,01	0,02	0,072	2,16
Gd µg/l	0,001	0,003	0,008	0,02	0,054	NO₃ mg/l	0,006	0,01	0,02	0,21	2,31
Ge µg/l	0,27	7,48	16,85	19,12	141	NO₂ mg/l	0,014	0,026	0,04	0,09	0,14
Hf µg/l	0,001	0,002	0,003	0,003	0,021	NH₄ mg/l	0,01	0,24	0,4	1,63	4,39
Hg µg/l	0,01	0,012	0,035	0,057	0,13	PO₄ mg/l	0,02	0,05	0,22	0,35	0,8
Ho µg/l	0,001	0,001	0,004	0,01	0,041	BO₂ mg/l	0,005	2,74	8,8	28,45	91
I µg/l	0,6	5,3	9,9	17,37	30,9	SiO₂ mg/l	27,9	42,2	66,2	74,05	117

Hemijski sastav voda na području Srpskog kristalastog jezgra je posledica interakcije između vode i stena. Na terenu su dominantni kristalasti škriljci, potom granitoidi, u čijem mineralnom sastavu dominiraju K, Na, SiO₂, što objašnjava visok sadržaj ovih elemenata u vodama.



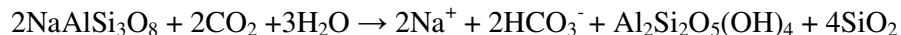
Slika 35. Trilinearni dijagram termalnih voda Srpskog kristalastog jezgra

Sve analizirane vode su u pogledu katjona dominantno natrijumske, dok su u pogledu anjona uglavnom hidrokarbonatne do sulfatne, što se jasno uočava na Piper-ovom dijagramu (slika 35). Sadržaj Na u vodama je od 45,3 do 1469 mg/l (medijana 850,5 mg/l), HCO₃ od 97 do 3290 mg/l (medijana 2182 mg/l), dok je sadržaj SO₄ od 1,54 do 775 mg/l (medijana 96,65 mg/l). Hidrokarbonati su produkti kondenzacije gasova i para (CO₂ i H₂S) u bezkiseoničnim sredinama (O'Brien, 2010)

HCO₃-Na vode se formiraju u okviru magmatskih i metamorfnih stena (Petrović et al, 2012). Ovaj tip voda nastaje u reakciji CO₂ i natrijumskih feldspata, pri čemu se

oslobađaju joni natrijuma i silicijumova kiselina, čiji sadržaj raste sa porastom temperature usled porasta rastvorljivosti (Papić, 1994, fond. dok.).

Hidrolizom albita oslobađaju se Na, HCO₃, SiO₂, a ostatak je kaolinit.

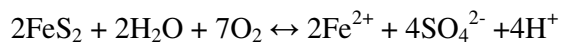


Na trilinearnom Piper-ovom dijagramu (slika 35) uočava se da vode Vranjske i Ribarske Banje, pa i voda iz Tulara imaju povišen sadržaj sulfata, koji je u pojedinim uzorcima dominantan. SO₄ mogu nastati rastvaranjem sulfatnih minerala (gipsa i anhidrida) ili oksidacijom pirita. Sulfatne vode se obrazuju tako što se mineral sumpora (pirit) razlaže u H₂S ili oksiduje do FeSO₄, obrazujući slobodnu sumpornu kiselinu, koja istiskuje karbonate i silikate Na iz stene, dok se sulfidi Fe alterišu u stabilne okside i hidrokside (Papić, 1994, fond. dok.). Vode sa dominantnim ili povišenim sadržajem sulfata se sreću uglavnom u višim zonama (plićim vodonosnim horizontima) geotermalnih sistema, gde se odvajanje gasova i pare uglavnom manifestuje kao ključanje gasova (CO₂ i H₂S).

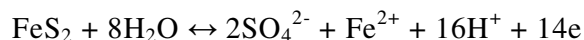
Osim prisustva sulfata, u vodama Vranjske i Ribarske Banje prisutan je i gas H₂S. Sadržaj H₂S u vodi zavisi od temperature vode, tako da smanjenjem temperature opada sadržaj H₂S-a (Malešević i saradnici, 2011). H₂S najčešće nastaje od sulfidnih minerala



U zavisnosti od pH vrednosti, pri oksidaciji sulfidnih minerala (pirit, galena, sfalerit) nastaju sulfati.



Usled nedostatka slobodnog kiseonika sulfati nastaju sledećom reakcijom.



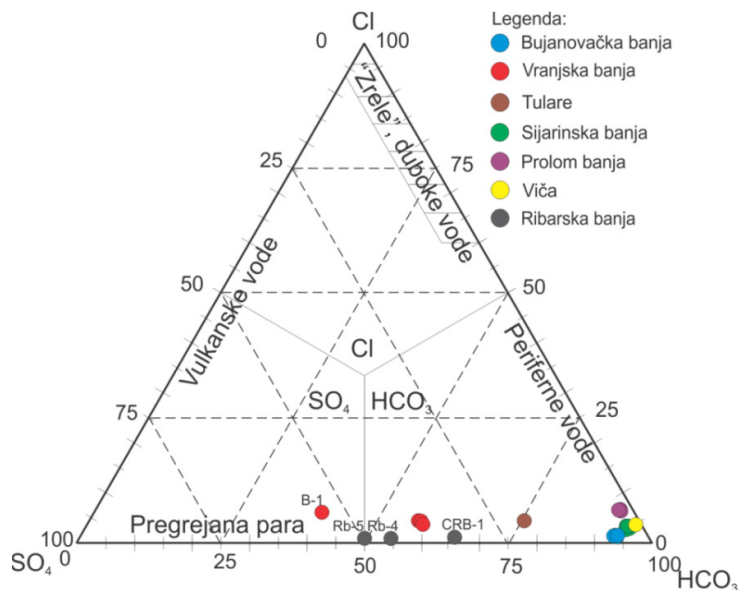
U Ribarskoj Banji, pH termalne vode je visok, a na mestima izlivanja vode ne zapaža se talog hidroksida gvožđa, što ukazuje da H₂S ne potiče od navedenih reakcija sa piritom (Špadijer i saradnici, 2003, fond. dok.). U zoni isticanja dolazi do mešanja termalnih voda sa običnim podzemnim vodama, usled čega dolazi do formiranja sulfidne geohemijske

barijere. Tom prilikom dolazi do formiranja teško rastvorljivih sulfida mnogih elemenata u širokoj okolini crpnih bušotina, tj. u zonama sulfatoredukcije i zonama mešanja kiseonikom bogatih ili bezkiseoničnih voda ($E_h=100-250$ mV) sa većim količinama sulfatnih voda (Krajnov and Švec, 1987). Proizvod rastvorljivosti sulfida Fe, Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Hg, Ni, Mo, As, Sb nesrazmerno je niži od stabilnosti njihovih kompleksnih jedinjenja, što dovodi do njihovog obaranja u podzemnim vodama. Visoka pH vrednost vode pogoduje obaranju gore navedenih elemenata, jer je pri višim vrednostima pH potrebna manja koncentracija sumpora za početak obrazovanja sulfida. Obaranjem sulfida u užoj okolini eksploatacionih bušotina, smanjuje se vodopropusnost stene i dovodi do progresivnog smanjenja izdašnosti bušotina. Sadržaj H_2S je promenljiv tokom vremena, što je utvrđeno i sa jonima SO_4 . Sulfati su u ranijem periodu bili među dominantnim anjonima, odnosno voda je bila SO_4-HCO_3-Na tipa (Špadijer i saradnici, 2003, fond. dok.).

U Vranjskoj Banji SO_4-HCO_3-Na tip voda nastaje na račun oksidacije pirita, dok HCO_3-SO_4-Na tip voda, , posledica je razlaganja natrijumskih feldspata. (Papić, 1994, fond. dok.). HCO_3-SO_4-Na tip voda dominantan je u vodi iz Tulara

Za klasifikaciju prirodnih i geotermalnih voda na osnovu koncentracije anjona korišćen je $Cl-SO_4-HCO_3$ trilinearni dijagram (slika 36), konstruisan od strane Giggenbach-a (1991). Na dijagramu se izdvajaju zrele vode, bikarbonatne ili periferne vode, pregrejane pare i vulkanske vode, kao i mešanje pomenutih grupa. Pod “zrelim vodama“ (mature waters) se podrazumevaju neutralne, nisko-sulfatne, visoko-hloridne geotermalne vode (Mainza, 2006). Na osnovu dosadašnjih istraživanja poznato je da hloridi potiču od morske vode ili nastaju rastvaranjem stena, sulfati malim delom potiču iz morskih voda, većim delom nastaju oksidacijom sulfida u vulkanskim parama, dok hidrokarbonati ukazuju na visoko-temperaturne geotermalne sisteme (Imtiaz, 1997).

Termalne vode Srpskog kristalastog jezgra klasifikovane su kao hidrokarbonatne vode (slika 36), dok pojedini uzorci sa povišenim sadržajem sulfata pripadaju grupi pregrejanih para. Voda iz bušotine B-1 u Vranjskoj Banji pripada grupi pregrejanih para, kao posledica nižeg sadržaja hidrokarbonata u odnosu na sulfate.



Slika 36. Cl-SO₄-HCO₃ dijagram termalnih voda Srpskog kristalastog jezgra

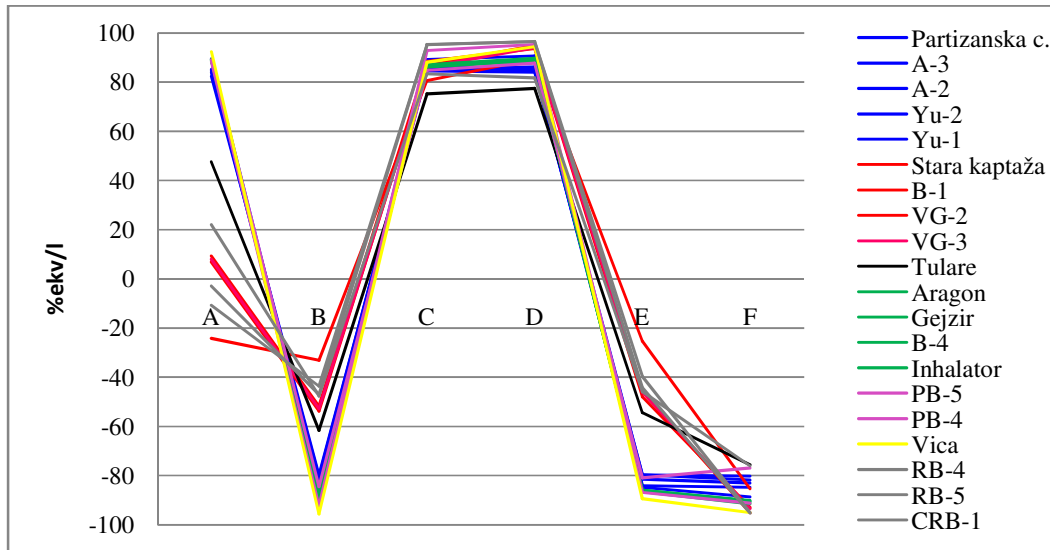
Generalno, po sadržaju makrokomponentata mogu se izdvojiti sledeći tipovi voda:

- I tip: HCO₃-Na vode (vode iz Prolom, Sijarinske, Bujanovačke Banje i iz Viče);
- II tip: HCO₃-SO₄-Na (Vranjska Banja-Stara kaptaža, VG-2 i VG-3; Tulare, T-1; Ribarska Banja CRB-1);
- III tip: SO₄-HCO₃-Na tip voda (Vranjska Banja B-1).
- IV tip: Vode iz bušotina RB-5, RB-4 u Ribarskoj Banji pripadaju prelaznom tipu voda između HCO₃-SO₄-Na i SO₄-HCO₃-Na.

Iako su male razlike u sadržaju HCO₃ i SO₄ u termalnim vodama Ribarske Banje, ipak se može izvesti zaključak da sa porastom dubine dominiraju SO₄, dok bliže površini terena dominiraju HCO₃. Pored toga vode iz pliće bušotine bogatije su Ca i Mg što ukazuje na mešanje sa vodama iz plićih vodonosnih zona (slika 36).

U cilju boljeg razumevanja porekla voda, primenjen je i "genetski dijagram" po D'Amore et al (1983). Razlike u parametru A i B (slika 37) su odraz sadržaja sulfata u analiziranim vodama. Visoke vrednosti parametra A ukazuju na obogaćenost HCO₃, dok niže vrednosti ukazuju da voda prolazi kroz stene obogaćene evaporitima (gips,

anhidrid, halit...). Isto je potvrđeno i na osnovu parametra B, tako da niske vrednosti parametra B ukazuju na Na obogaćene vode, a osiromašene sulfatima. Na dominaciju Na u odnosu na Mg, Ca i Cl ukazuju i parametri C, D i F. Niže vrednost parametra E ukazuju da karbonati dominiraju u odnosu na Ca i Mg.



Slika 37. Genetski dijagram termalnih voda Srpskog kristalastog jezgra

$$A = \left[\frac{100}{\sum(-)} (HCO_3 - SO_4) \right]$$

$$D = 100 \left(\frac{Na - Mg}{\sum+} \right)$$

$$B = 100 \left[\left(\frac{SO_4}{\sum(-)} \right) - \left(\frac{Na}{\sum(+)} \right) \right]$$

$$E = 100 \left[\left(\frac{Ca + Mg}{\sum(+)} \right) - \left(\frac{HCO_3}{\sum(-)} \right) \right]$$

$$C = 100 \left[\left(\frac{Na}{\sum(+)} \right) - \left(\frac{Cl}{\sum(-)} \right) \right]$$

$$F = 100 \left(\frac{Ca - Na - K}{\sum+} \right)$$

Na osnovu genetskog dijagrama potvrđuje se da vode Bujanovačke, Sijarinske, Prolom Banje i vode iz Viče pripadaju prvom tipu voda (dominantan sadržaj Na i HCO₃). Kao posledica povišenog sadržaja SO₄ u odnosu na HCO₃ (niže vrednosti parametara A, a više parametara B i E) ukazuju vode Ribarske Banje, Vranjske Banje i bušotina iz Tulara koje su svrstane u II, III i IV tip voda.

Zbog velikog broja bušotina na području Sijarinske Banje, detaljne hemijske analize rađene su za 4 najtoplije bušotine (bušotina B-4, Aragon, Inhalator i Gejzer) u laboratoriji BGR u Berlinu (tabela 14). Za ostale izvore korišćene su Hemijske analize rađene u Institutu za rehabilitaciju u Beogradu (tabela 16).

Tabela 16. Hemijske analize termalnih voda Sijarinske Banje (rađene u Institutu za rehabilitaciju, Beograd, 2006)

Izvor/ Bušotina	T (°C)	Q (l/s)	pH	S.O. ¹ (mg/l)	ANJONI (mg/l)			KATJONI (mg/l)				GASOVI (mg/l)		J.B. ² (%)
					HCO ₃	SO ₄	Cl	Ca	Mg	Na	K	CO ₂	H ₂ S	
B-4	70,0	30	7	2679	2946	78,8	87,2	38,0	15,8	1147	68,0	319	3,0	2,27
Gejzer	70,0	2,8	6,75	2798	2946	79,3	85,9	29,6	16,8	1220	69,1	363	1,0	4,84
Snežnik	21,1	0,013	6,23	2620	2800	69,5	91,5	41,6	19,9	1090	64,7	1375	0,7	2,78
Aragon	66,0	1,8	7,2	2739	3050	79,0	85,0	37,6	19,2	1189	67,9	418	2,0	2,59
Suzica	26,3	0,005	6,7	2723	2922	56,4	83,2	48,8	17,0	1164	62,2	1094	0,7	4,32
Zdravlje	30,9	0,009	6,36	2500	2733	105,0	86,5	62,1	22,4	989	61,6	995	1,0	0,11
Jablanica	34,3	0,103	6,42	2550	2727	105,0	93,1	56,1	17,5	1189	63,4	935	0,85	7,53
Hisar	27,0	0,011	6,5	2635	2806	95,9	81,2	52,5	26,2	1168	62,3	990	0,85	6,42
Borovac	40,0	0,24	6,35	2525	2702	145,0	86,0	48,0	25,3	1167	61,7	1100	2,0	6,65
Spas	28,0	0,013	7,35	2700	2824	136,0	91,9	46,1	16,8	1164	65,6	231	0,8	3,97
Raj	26,4	0,013	6,3	2501	2849	133,0	91,8	55,3	18,0	1330	63,5	1292	0,7	10,07
Inhalator	56,0	0,8	6,66	2757	2959	90,3	91,8	36,0	14,6	1252	62,2	289	2,2	5,43
Kiseljak	19,0	0,016	6,54	2649	2873	56,4	78,1	48,4	18,5	1129	64,1	660	0,7	4,01

¹S.O. –Suvi ostatak; ²J.B. –Jonski balans

Povišena vrednost jonskog balansa (>5%) utvrđena je za hemijske analize voda sa izvora Jablanica, Borovac, Raj i voda iz bušotina Hisar i Inhalator, što ukazuje da analize nisu pouzdane, međutim pokazale su se korisnim za utvrđivanje da li su sve vode sa područja banje istog porekla. Sadržaj makrokomponentata prikazan na Schoeller-ovom dijagramu (slika 38c) ukazuje da je reč o istim vodama. Manje razlike su uočene u sadržaju Ca, Mg i SO₄, tako da najtoplije pojave (B-4, Gejzer, Aragon, Inhalator) imaju niže vrednosti ovih elemenata. Vode bogatije ovim elementima su nižih temperatura, što ukazuje da dolazi do mešanja toplih HCO₃-Na voda sa hladnijim vodama koje sadrže više SO₄, Ca i Mg. Najviše vrednosti SO₄ imaju Borovac, Spas i

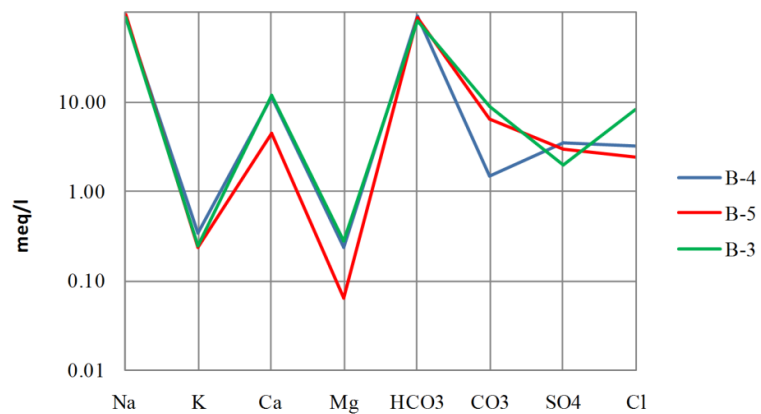
Raj. Glavna razlika između voda Sijarinske Banje je temperatura, koja je u opsegu od 25-78°C. Pri različitim temperaturama, hemijski sastav voda se bitno ne menja, što ukazuje na relativno sporu vodozamenu.

Pošto se voda Sijarinske Banje dovodi u vezu sa vodom iz Tulara (Stanković, 1985, fond. dok.) i Viče (Milivojević i Perić, 1990, fond. dok.), na slici 38d prikazan je hemijski sastav termalnih voda Sijarinske Banje, vode iz Tulara i vode iz sela Viča. Sa dijagrama (slika 38d) se uočava da voda iz Tulara ima veći sadržaj Ca, Mg, Cl i znatno veći sadržaj SO₄, dok voda iz Viče ima niži sadržaj Ca, Mg i SO₄. U vodi iz Tulara, piriti su usloveli viši sadržaj SO₄, a na postojanje karbonatnih stena ukazuju Ca i Mg. Iako je voda iz Viče zahvaćena iz mermera, na hemijski sastav vode značajniji uticaj imaju kristalasti škriljci.

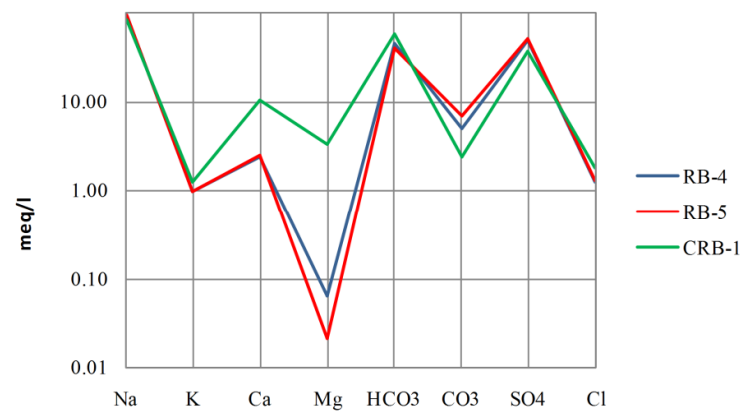
Sa Scholler-ovog dijagrama za vode Bujanovačke Banje (slika 39b), uočava se da iako su vode zahvaćene iz različitih litoloških jedinica (iz granita-Partizanska česma, granitnog grusa- A-2 i A-3, laporaca i peskova Yu-2 i Yu-1), reč je o istom tipu voda HCO₃-Na, sa istim međusobnim odnosom katjona i anjona, što potvrđuju krive na dijagramu.

Upoređivanjem dijagrama sa slike 38 i 39. uočava se da su najsličniji dijagrami za vode iz Sijarinske Banje (slika 38c) i vode iz Bujanovačke Banje (slika 39b), iako su vode zahvaćene iz različitih litoloških sredina.

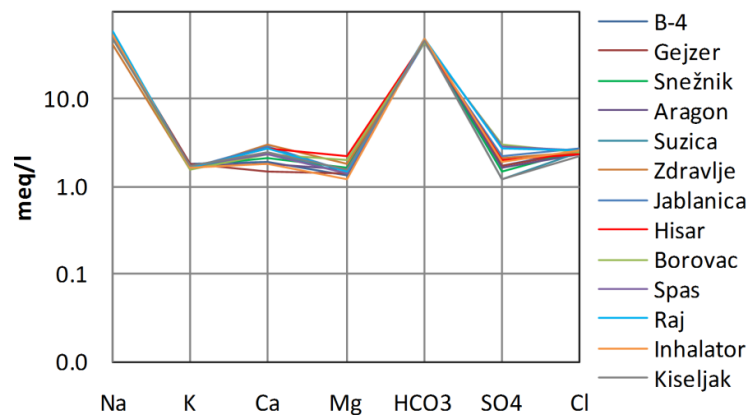
Ovi dijagrami ukazuju na kompleksnost formiranja hemijskog sastava voda, koji je najvećim delom posledica cirkulacije vode kroz različite litološke sredine, zatim starosti voda, dok je manjim delom posledica litoloških sredina iz kojih su zahvaćene vode.



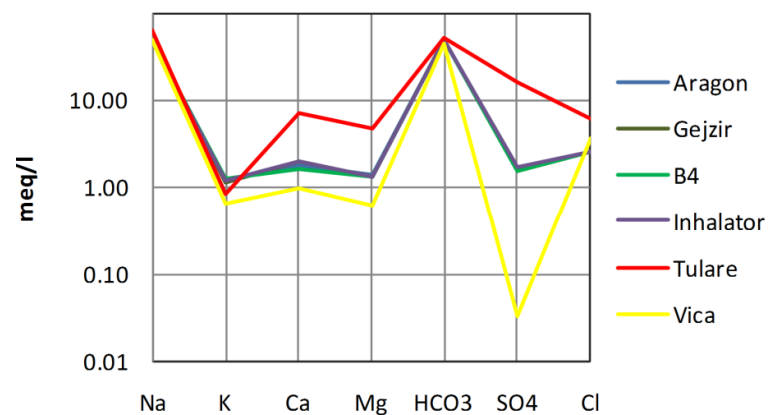
a) Prolom Banja



b) Ribarska Banja

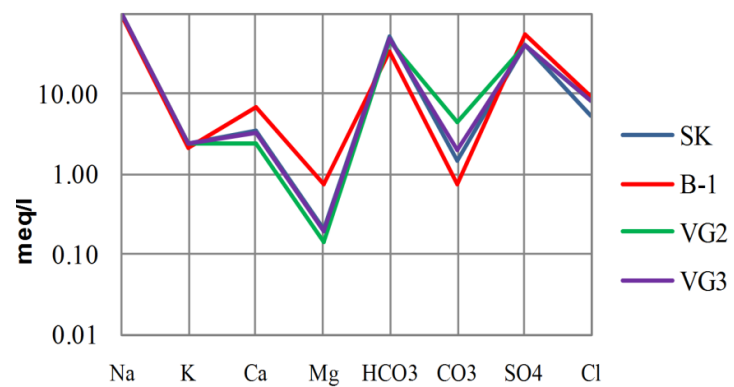


c) Sijarinska Banja

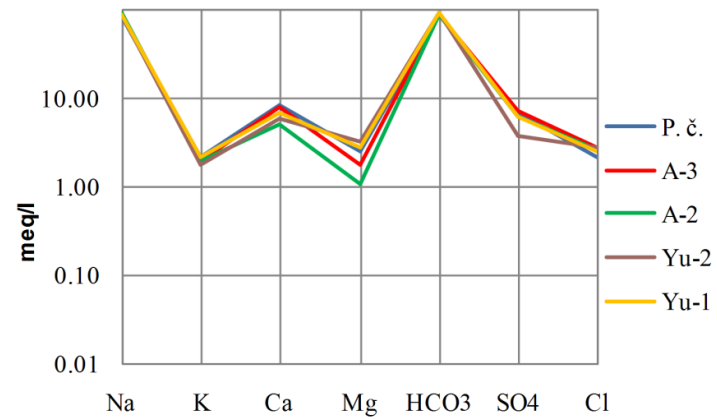


d) Sijarinska-Viča-Tulare

Slika 38. Scholler-ovi dijagrami termalnih voda Srpskog kristalastog jezgra
a) Prolom Banja; b) Ribarska Banja; c) Sijarinska Banja; d) Sijarinska-Viča-Tulare;



a) Vranjska Banja



b) Bujanovačka Banja

Slika 39. Scholler-ovi dijagrami termalnih voda Srpskog kristalastog jezgra a) Vranjska Banja; b) Bujanovačka Banja

➤ Mikroelementi u vodama Srpskog kristalastog jezgra

Zbog specifične geologije terena, duboke cirkulacije termalnih voda, očekivano je prisustvo mikroelemenata u vodi. Značajan broj analiziranih voda koristi se i za piće (vode Prolom Banje, Bujanovačke Banje, Viče, pojedini izvori u Sijarinskoj Banji), pa su elementi u vodi analizirani u odnosu na vrednosti propisane Pravilnikom o kvalitetu i drugim zahtevima za prirodnu mineralnu vodu, prirodnu izvorsku vodu i stonu vodu (Sl. list SCG br. 53/05), kao i na odnosu na prosečan sadržaj elemenata u 884 flaširane vode Evrope (Reimann and Birke, 2010).

Povišeni sadržaji bora (B), germanijuma (Ge), rubidijuma (Rb) i fluora (F), javljaju se uglavnom u svim analiziranim vodama, izuzev u vodama Prolom Banje i Ribarske Banje, dok se F javlja i u vodama Ribarske Banje. Ovi elementi se genetski vezuju za minerale magmatskih stena (Petrović et al, 2012). Mikroelementi arsen (As), berilijum (Be), cezijum (Cs), galijum (Ga), gvožđe (Fe), litijum (Li), vanadijum (V) i volfram (W) povišeni su samo u uzorcima sa pojedinih lokaliteta. Ostali elementi su zanemarljivo prisutni u termalnim vodama Srpskog kristalastog jezgra.

U daljem tekstu navedeni su svi elementi koji su prisutni u povišenom sadržaju na području istraživanja.

Podzemne vode sa povišenim sadržajem arsena (As) pojavljuju se u određenim geološkim sredinama: u području sulfidne mineralizacije, geotermalnim područjima, u anaerobnim mladim podzemnim vodama (nekoliko hiljada godina), aerobnim mladim podzemnim vodama sa visokom pH vrednošću, uglavnom u aridnim i semiaridnim područjima (Smedley, 2008). U izvorima i gejzerima Yellowston-a, koncentracije As dostižu 10000 µg/l (Stauffer and Thompson, 1984), dok je u termalnim vodama na Islandu As prisutan do maksimalnih 10 µg/l (Arnorrsson, 2003). Iako je mnogo radova posvećeno pojavama As u podzemnim vodama, poreklo ovog elementa u pojedinim geotermalnim vodama nije potpuno jasno.

Medijana za As u analiziranim vodama Srpskog kristalastog jezgra iznosi 5,72 µg/l (tabela 15), dok su najviše vrednosti zabeležene u uzorcima vode A-2 (58,6 µg/l) i A-3 (43,7 µg/l) iz Bujanovačke Banje. U odnosu na ostale vode Srpskog kristalastog jezgra i

ostale analizirane vode Bujanovačke Banje, u bušotinama A-2 i A-3 uočen je i povišen sadržaj Be, Ge i Rb čije poreklo u vodi je posledica interakcije između vode i granita, pa vrednosti ovih elemenata nisu povišene u bušotinama Yu-1 i Yu-2 koje se zahvataju iz laporaca i peščara. Iako se jednim delom voda iz bušotine A-2 koristi za potrebe fabrike Heba, ova voda se ne koristi za flaširanje. Problem predstavlja voda iz bunara A-3 koju meštani koriste za piće, a sadrži znatno više koncentracije As, F i B od maksimalno dozvoljenih koncentracija propisanih domaćom regulativom (Sl. list SCG 53/05). F i B su generalno povišeni na celom području Bujanovačke banje.

Bor (**B**) je povišen u svim uzorcima voda iz Sijarinske Banje, Bujanovačke Banje, Viče i Tulara, delimično i u vodama Vranjske Banje. Srednja vrednost B u vodama Srpskog kristalastog jezgra je 4908 µg/l, medijana 3436 µg/l, a maksimalna vrednost je 22925 µg/l (tabela 15), što ukazuje da su termalne vode celog područja obogaćene B. Visoke koncentracije B javljaju se u termalnim vodama kasnih faza magmatske aktivnosti, pri vulkanskim i postvulkanskim delovanjima (Hem, 1985). B se akumulira u pegmatitima, pod dejstvom hidrotermalnih procesa, pri čemu ga dobro apsorbuju gline u sekundarnom okruženju (Reimann and Birke, 2010). Bujanovački granitoid probijaju pegmatitske žice, što bi moglo da opravda njegovo poreklo u vodama Bujanovačke Banje. Na ostalim lokalitetima pegmatiti nisu dominantni da bi opravdali količine bora u vodi. Pri preobražaju kiselih intruzivnih stena, dolazi do povećavanja koncentracije B i F. *“Pneumatolitski rastvori koji vrše preobražaj kiselih intruzivnih stena mogu biti fluorni ili borni. Pod dejstvom fluornih rastvora feldspati i biotit se preobražavaju u muskovit, topaz, liskune i kvarc, dok pod dejstvom bornih rastvora sastojci intruziva se zamenjuju sa turmalinom. Pri ovim preobražajima se uz fluor i bor prinose i izvesne količine kalijuma i volframa. Pri nedovoljnoj količini rastvora feldspati i femski sastojci (biotit, amfiboli, piroksen, olivin) se preobražavaju u muskovit (ili sericit) uz istovremeno obogaćivanje stene kvarcom“* Karamata (1967) .

Sadržaj fluora (**F**) je generalno povišen u vodama Srpskog kristalastog jezgra (medijana 3,12 mg/l, maksimalna vrednost 15,7 mg/l), izuzev u vodi Prolom Banje (andeziti), i vodama iz bušotine Yu-1 i Yu-2 u Bujanovačkoj Banji (peščari i laporci). F i CO₂ su indikatori dubokog zaleganja voda i cirkulacije voda kroz pukotine magmatskih i metamorfnih stena (Petrović et al, 2012). Nosioci F su minerali apatit, biotit, fluorit koji

se najčešće javljaju u granitoidnim stenama (Dangić i Protić, 1995). Akumulira se u hidrotermalnim rastvorima tokom kristalizacije magme i procesa diferencijacije magme. Najveće koncentracije F u vodi javljaju se u okviru kristalaste prekambrijumske osnove izgrađene od kalk-alkalnih granita (Brunt et al, 2004). Preporučena koncentracija F u vodi, za razvoj kostiju i zuba je između 0,7 i 1,5 mg/l (Misund et al, 1999), što je naročito bitno za vode Bujanovačke Banje, Viče i Prolom Banje koje se koriste za piće. Iako vode Bujanovačke Banje sadrže visok sadržaj F, vode koje se flaširaju pod nazivom Bivoda su zahvaćene iz laporaca i peščara, čime je prirodnim putem postignuta refluorizacija, pa je sadržaj F u ovim vodama je 0,7-1,16 mg/l, što ih čini veoma pogodnim za korišćenje.

Isti princip primenjen je i sa flaširanom vodom Heba, tako da su revitalizacijom bunara A-4 (koji se koristi za flaširanje) izolovani donji vodonosni slojevi u okviru granitoidnog grusa i granita (Jovanović, 2008, fond. dok.; Krunić et al, 2013). Proučavanjem mineralnog sastava granitnog grusa na području Bujanovačke Banje, utvrđeno je da su liskuni (muskovit i biotit) kao i apatit, glavni nosioci F u ovim stenama (Krunić et al, 2013).

Berilijum (**Be**) se retko javlja u vodama. Tokom magmatskih procesa Be teži da se akumulira u poslednjoj fazi magmatskih stena, posebno granitima i pegmatitima. Najviše koncentracije Be u flaširanim vodama Evrope nađene su u vodi iz Portugala (64,1 µg/l) koje se vezuju za hercinski graanit.

Na području Srpskog kristalastog jezgra Be je povišen u vodama Sijarinske banje, Tulara, Viče, kao i u bušotinama A-2 i A-3 u Bujanovačkoj banji. Maksimalna zabeležena vrednost je 4,05 µg/l, medijana 0,34 µg/l (tabela 15).

U odnosu na ostale uzorke voda, sadržaj galijuma (**Ga**) je povišen u vodama Ribarske Banje (do 2,19 µg/l). Ovaj element se javlja i u vodi iz bušotine B-1 u Vranjskoj Banji (1,27 µg/l). Minerali Ga se retko javljaju u litološkim jedinicama, samim tim i u podzemnim vodama. Ga je nađen u alkalnim termalnim vodama Bugarske poreklom iz granita, metamorfnih silikatnih stena i andezita (Reimann and Birke, 2010).

Povišen sadržaj germanijuma (**Ge**) konstatovan je u vodama Sijarinske, Vranjske i Bujanovačke Banje, kao i vodama iz Viče i Tulara. Najveća koncentracija Ge je u vodi

iz Viče (141 $\mu\text{g/l}$), Medijana Ge u analiziranim vodama Srpskog kristalastog jezgra iznosi 17 $\mu\text{g/l}$. Ge se najviše koncentriše u termalnim, alkalnim vodama koje cirkulišu kroz termalno alterisane sedimentne stene obogaćene organskim Ge (Bernstein, 1985). Granitni pegmatiti mogu sadržati i neobičajeno visoke koncentracije Ge (De Vos et al, 2006).

Najveća koncentracija rubidijuma (**Rb**) zabeležena je u vodama iz bušotina A-3 i A-2 u Bujanovačkoj Banji (do 324 $\mu\text{g/l}$) i termalnim vodama Sijarinske Banje (247 $\mu\text{g/l}$), dok se u povišenim koncentracijama javlja i u vodama Vranjske Banje, Viče i Tulara. Medijana Rb u vodama Srpskog kristalastog jezgra je 108 $\mu\text{g/l}$ (tabela 15), dok je medijana u flaširanim vodama Evrope 2,12 $\mu\text{g/l}$ (Reimann and Birke, 2010). Poreklo Rb se vezuje za felsične, granitoidne intruzije, a najveće koncentracije Rb se nalaze u biotitu i K-feldspatima (Beaucaire and Michard 1982).

Najviša vrednost cezijuma (**Cs**) nađena je u vodi iz Tulara (517 $\mu\text{g/l}$), zatim u vodama Sijarinske Banje (oko 100 $\mu\text{g/l}$), dok je medijana 39,65 $\mu\text{g/l}$. U geotermalnim vodama sadržaj Cs je često povišen.

Cs i Rb često zamenjuju K u liskunima i K-feldspatima, čije raspadanje predstavlja glavni izvor ovih elemenata u datoj sredini (Dinelli et al, 2010). Povišen sadržaj Cs i Rb u Bivodi (bušotina Yu-1) su u vezi sa tercijarnim magmatskim telima intrudovanim u okviru Bujanovačkog granitoida (Petrović et al, 2010). Visok sadržaj ovih elemenata i u Sijarinskoj Banji ukazuju na kontakt vode sa kiselim magmatskim stenama.

U vodi Prolom banje zabeležena je povišena koncentracija urana (**U**) od 2,85 $\mu\text{g/l}$, (Petrović Pantić i Zlokolica-Mandić, 2012a) u odnosu na ostale analizirane vode. Uran je čest element u vulkanitima, što je i dokazano ispitivanjem vulkanita Unutrašnjih Dinarida i Srpskog kristalastog jezgra (Backović, 1996, fond. dok.), kao i analizama radiogenih elemenata u vulkanitima Leca (Omaljev, 1997). Prolom voda se flašira, pa je važno napomenuti da je prema prema World Health Organization (WHO, 2011) maksimalna dozvoljena koncentracija urana u vodi 30 $\mu\text{g/l}$.

Takođe u vodi Prolom banje zabeležena je povišena koncentracija vanadijuma (**V**) od 7,95 $\mu\text{g/l}$, (Petrović Pantić i Zlokolica-Mandić, 2012a). Vanadijum se javlja u vodama vulkanskih oblasti, pa se na području Evrope najčešće sreće u vodama na Islandu,

Kanarskim ostrvima, Kipru i Italiji. Prosečna vrednost V u italijanskim flaširanim vodama zahvaćenim u vulkanskim stenama je 2,5 µg/l, dok je sadržaj V u vodama zahvaćenim iz metamorfnih, intruzivnih i sedimentnih stena daleko niži (Dinelli et al, 2010). pa je značajno da je dozvoljena granica V u oligomineralnoj flaširanoj vodi prema Pravilniku o higijenskoj ispravnosti vode za piće (Sl. list SRJ br. 42/98 i 44/99) 1 µg/l, dok je u bivšim jugoslovenskim republikama granica 5 µg/l. Prema standardima EU ne postoji definisana granica za V u flaširanoj vodi i nije poznata uloga ovog elementa na ljudski organizam.

Visok sadržaj volframa (**W**) uočen je u termalnim vodama Vranjske Banje (138-150 µg/l) i u manjoj meri u vodama iz Ribarske Banje (15-24 µg/l). Hidrotermalni fluid je obogaćen W pri kontaktu sa granitskom magmom, a kasnije je W deponovan iz fluida u samom intruzivu, ili u okolnim silikatnim i/ili karbonatnim stenama (Wood and Samson, 2000). Fluidi obogaćeni Na mogu rastvoriti W tokom metasomatskih procesa i transportovati ga kao Na₂WO₄ na visokim temperaturama (De Vos et al, 2006). Mineral volframit se najčešće javlja u pegmatitima i visoko temperaturnim kvarcnim žicama u granitima (Hurlbut and Klein, 1977), u kojima se stvara u toku poslednje faze magmatizma, dok se povišene koncentracije W javljaju i u liskunima i granitima (Reimann and Birke, 2010). Pegmatiti u Surduličkom masivu nisu registrovani (Babović i saradnici, 1977). U Tumaču za list Vranje (Vukanović i saradnici, 1977) spominju se kvarcno-šelitske žice sa visokim procentom WO₃ (2-10%).

U vodi iz bušotine RB-5 u Ribarskoj Banji uočen je povišen sadržaj cinka (**Zn**). Pojave Zn vezuju se za sulfidna ležišta. U neposrednoj okolini Ribarske Banje uočene su pojave pirita u jezgrima bušotina i na kontaktu sa granitom.

U ugljikiseljoj vodi iz Viče pored već pomenutog povišenog sadržaja B, Be, Ge, Rb, W, F, javljaju se i povišeni sadržaji niobijuma (Nb) i cirkonijuma (Zr) i retkih elemenata poput disprozijuma (Dy), erbijuma (Er), holmijuma (Ho), lutecijuma (Lu), terbijuma (Tb), tulijuma (Tm), itrijuma (Y) i iterbijum a(Yb). Ova grupa retkih elemenata, naziva se i itrijumska grupa elemenata ili teški retki zemljani elementi (heavy rare earth elements HREE). Navedeni elementi se retko javljaju i u prirodi, a posebno u vodi. Voda iz Viče se flaširala pod nazivom "Milan Toplica", a vrednosti ovih elemenata su

više od maksimalno zabeleženih vrednosti navedenih elemenata u 884 flaširane vode u Evropi (tabela 17).

Svi ovi elementi najčešće se javljaju u monacitu i ksenotipu, koji se nalaze u peskovitim nanosima obogaćeni vrednim mineralima (zlato, platina, dijamanti, kalaj), zatim u ležištima urana, ležištima nastalim površinskim raspadanjem glina, kiselim i bazičnim eruptivnim stenama i gnajsevima (Hedrick, 2004)

Nb se javlja kao element u tragu (trace element) u biotitu, rutilu, sfenu, cirkonu i kasiteritu. Posebno je značajna jonska zamena Nb za Zr u cirkonu, pošto je ovaj element široko prisutan u magmatskim stenama (De Vos et al, 2006). Mineralizacija Ta i Nb je u vezi sa alkalnim granitima, i vezana je za visok sadržaj fluora kao posledica post magmatskih alteracija (Pollard, 1989). Generalno, kompleksna geologija terena na širem području sela Viča uslovlila je formiranje vode sa povišenim sadržajem retkih elemenata.

Tabela 17. Vrednosti Nb, Zr i HREE u vodi iz bunara B-1 u Viči (rađene u laboratoriji BGR, 2011) u odnosu na statističke vrednosti istih elemenata određene u flaširanim vodama Evrope (Reimann and Birke, 2010)

Element	B-1, Viča	Flaširane vode Evrope (884 uzorka)				
		Minimum	Medijana	75%	95%	Maksimum
Nb (µg/l)	6,37	<0,01	<0,01	<0,01	0,025	0,537
Zr (µg/l)	2,16	<0,001	0,008	0,05	1,05	165
Dy (µg/l)	0,108	<0,001	0,0012	0,003	0,0164	0,389
Er (µg/l)	0,202	<0,001	<0,001	0,0027	0,016	0,773
Ho (µg/l)	0,04	<0,001	<0,001	0,0011	0,005	0,122
Lu (µg/l)	0,061	<0,001	<0,001	<0,001	0,0041	0,411
Tb (µg/l)	0,08	<0,001	<0,001	<0,001	0,0025	0,077
Tm (µg/l)	0,044	<0,001	<0,001	<0,001	0,0028	0,191
Yb (µg/l)	0,375	<0,001	<0,001	0,0032	0,021	1,84
Y (µg/l)	1,09	<0,001	0,012	0,038	0,211	3,49

Na širem području Sijarinske Banje naročito duž Tupalske dislokacije pojavljuju se sulfidne rude Pb, Zn, Sb, Ag, Au. Ova ležišta se vezuju se za kvarcno-brečaste zone i za hidrotermalno promjenjenje andezite (Vukanović i saradnici, 1973). Ni jedan od ovih elemenata nije detektovan u povišenoj koncentraciji u termalnim vodama Sijarinske Banje. Pretpostavke su da:

- u slučaju da je hidrotermalni rastvor (voda) cirkulisao kroz ležišta, sumpor iz rastvora se istaložio u formu sulfida u redukcionoj sredini, tako da je rastvor ostao osiromašen sulfatima. U slučaju da voda i dalje cirkuliše kroz sulfidna ležišta, nema više osobine koje bi rastvarale formirane sulfidne minerale i njima se obogaćivala,
- ili voda zaleže na mnogo veće dubine tako da ni ne dolazi u kontakt sa ležištima.

5.2. Određivanje maksimalnih temperatura rezervoara

Najzastupljeniji metod za određivanje maksimalnih temperatura vode u rezervoaru je primena hemijskih geotermometara (tabela 18). Za procenu temperature u geotermalnom sistemu Srpskog kristalastog jezgra korišćeni su SiO_2 , Na-K, i Na-K-Ca geotermometri. Primena geotermometara podrazumeva da je postignuta termodinamička ravnoteža između podzemne vode i minerala u rezervoaru, kao i da nema mešanja termalne vode sa hladnom vodom iz pliče izdani (Fournier, 1981). Stoga je osim primene geotermometara određena i ravnoteža između vode i izabranih minerala uz primenu softvera WATCH (Arnorsson and Bjarnason, 1993), u slučaju konduktivnog hlađenja (slike 40, 41, 42, 43, 44 i 45)

Prilikom korišćenja silicijumskih geotermometara, u obzir se uzima indeks zasićenja kvarca i kalcedona u cilju određivanja koji od ove dve silikatne faze određuje rastvorljivost silicijuma prilikom isticanja vode (dostiže ravnotežu). Amorfni silicijum nije razmatran, jer daje niže temperature od temperatura dobijenih na isticanju. U termalnim vodama Srpskog kristalastog jezgra, na uzorkovanim temperaturama, voda je postigla ravnotežu i sa kalcedonom i sa kvarcom SI-0 (slike 40-45). Ako bi se CO_2 uključio u model za izračunavanje indeksa zasićenja, dobilo bi se da je rastvorljivost silicijuma kontrolisana kvarcom (Oerter, 2011). Tako da se može prihvatiti da je u ugljikiselim vodama Srpskog kristalastog jezgra ravnoteža postignuta kvarcom, dok u vodama bez CO_2 (vode Prolom Banje) može da se prihvati temperatura dobijena kalcedonskim geotermometrom.

Osim toga kalcedonski geotermometri pokazuju temperature malo više nego što su dobijene izlazne temperature, dok u pojedinim vodama pokazuju čak i niže temperature od temperatura dobijenih na isticanju.

Tabela 18. Određivanje maksimalnih temperatura u bušotinama i izvorima Srpskog kristalastog jezgra pomoću hemijskih geotermometara

Lokacija	Bunar	T (°C)	T ¹ _q (°C)	T ² _q (°C)	T ³ _q (°C)	T ⁴ _q (°C)	T ⁵ _{ch} (°C)	T ⁶ _{ch} (°C)	T ⁷ _{Na-K} (°C)	T ⁸ _{Na-K} (°C)	T ⁹ _{Na-K} (°C)	T ¹⁰ _{Na-K} (°C)	T ¹¹ _{Na-K-Ca} (°C)	T ¹² _{K-Mg} (°C)
Prolom Banja	B-4	33	82,8	86,1	83,4	83,8	54,2	51,7	80,6	49,7	59,2	21,0	17,8	45,2
	B-5	32	76,4	80,4	76,9	77,4	47,8	44,9	64,1	33,5	42,6	4,2	24,1	50,4
Ribarska Banja	CRB-1	38,7	90,1	92,4	90,6	91,0	61,4	59,4	140,2	108,9	119,9	84,9	62,7	90,5
	RB-4	41,5	95,5	97,1	95,9	96,2	66,8	65,1	121,6	90,3	100,8	64,4	86,6	105,4
	RB-5	54,0	95,3	96,9	95,8	96,0	66,6	64,9	121,7	90,4	100,9	64,5	85,5	50,4
Sijarinska Banja	Aragon	66,0	115,7	114,5	115,9	115,0	87,2	86,95	171,0	140,2	152,0	120,1	162,8	98,1
	Gejzer	68,0	115,0	113,9	115,2	114,3	86,4	86,13	167,8	137,0	148,6	116,3	159,4	96,8
	B-4	76,0	115,7	114,5	115,9	115,0	87,2	86,95	173,2	142,5	154,3	122,7	165,5	100,0
	Inhalator	54,7	116,0	114,8	116,2	115,3	87,5	87,28	170,1	139,4	151,1	119,1	161,6	98,6
Tulare	T-1	27,2	103,9	104,4	104,2	104,1	75,3	74,15	135,5	104,3	115,1	79,7	127,5	73,5
Viča	V-1	23,6	77,7	81,6	78,2	78,7	49,1	46,29	134,8	103,5	114,4	78,9	137,4	91,9
Vranjska Banja	St. kaptaza	81	146,1	140,2	145,8	141,7	118,1	120,5	176,6	146,0	157,9	126,7	142,8	122,7
	B1-česma	77	120,1	118,2	120,2	118,9	91,6	91,7	165,9	135,0	146,7	114,2	105,9	95,0
	VG-2	102	144,1	138,5	143,9	140,0	116,1	118,2	176,3	145,6	157,5	126,3	152,3	127,3
	VG-3	100	142,6	137,2	142,3	138,6	114,5	116,5	175,7	145,1	156,9	125,6	139,7	120,6
Bujanovačka Banja	Part. česma	13	90,1	92,4	90,6	91,0	61,4	59,4	176,1	145,5	157,3	126,1	126,6	89,2
	A-2	46	123,8	121,4	123,9	122,2	95,4	95,7	171,3	140,5	152,3	120,4	166,2	100,7
	A-3	20	106,9	106,9	107,2	106,9	78,3	77,4	174,7	144,1	155,9	124,5	143,1	107,5
	Yu-1	29	118,2	116,6	118,3	117,2	89,6	89,6	168,4	137,6	149,3	117,0	155,8	98,0
	Yu-2	29	130,6	127,2	130,6	128,3	102,3	103,2	172,6	141,9	153,7	122,0	164,8	88,8

¹⁾SiO₂ geotermometar – Fournier, 1977

²⁾SiO₂ geotermometar – Fournier, 1977

³⁾SiO₂ geotermometar – Fournier and Potter, 1982

⁴⁾SiO₂ geotermometar – Fournier and Potter, 1982

⁵⁾SiO₂ geotermometar – Arnórsson et al, 1983

⁶⁾SiO₂ geotermometar – Fournier, 1977

⁷⁾Na-K geotermometar – Giggenbach, 1988

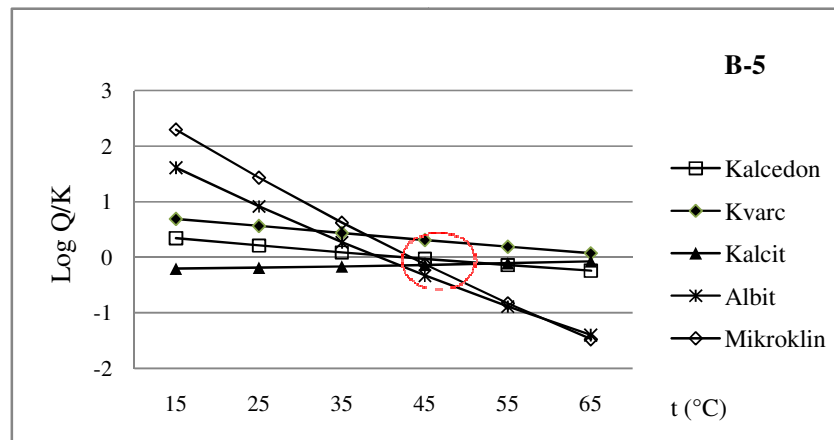
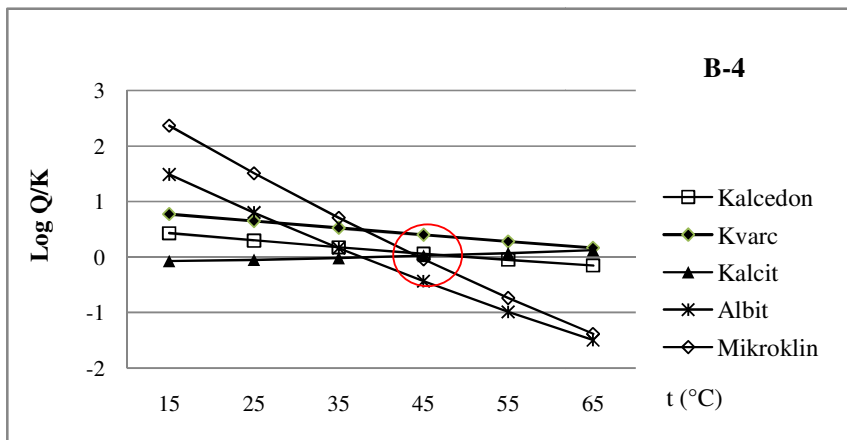
⁸⁾Na-K geotermometar – Nieva and Nieva, 1987

⁹⁾Na-K geotermometar – Fournier, 1979

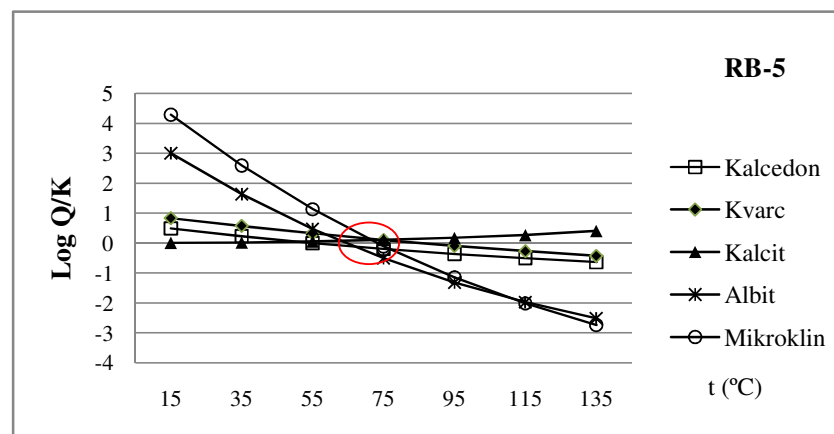
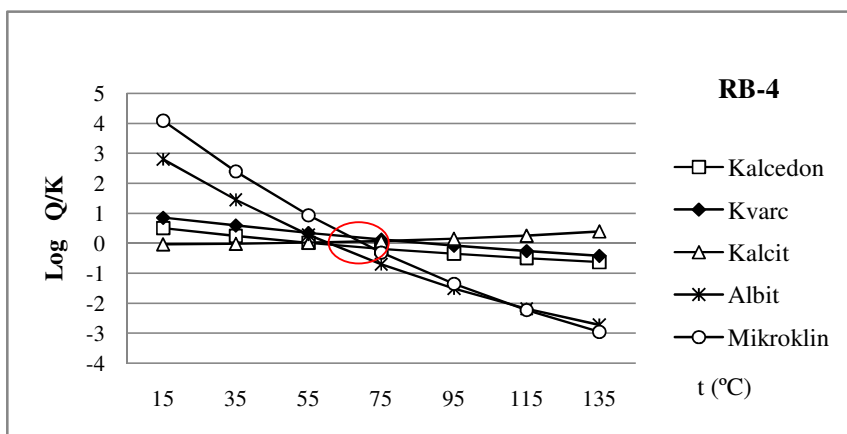
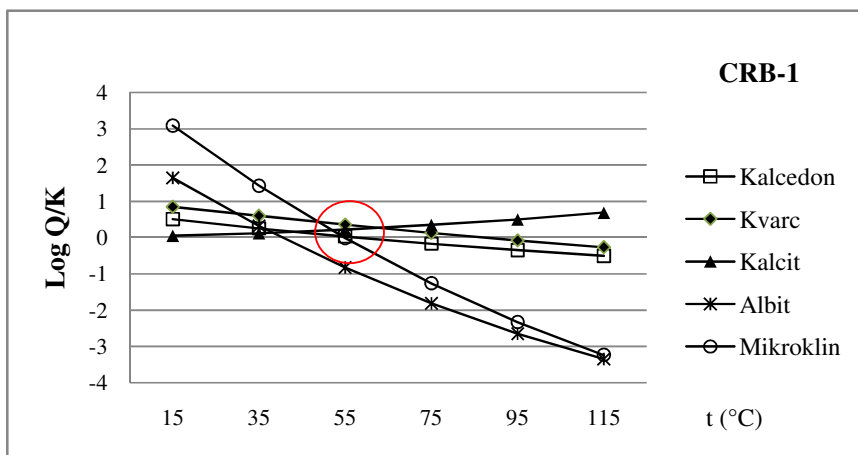
¹⁰⁾Na-K geotermometar – Arnórsson et al, 1983

¹¹⁾Na-K-Ca geotermometar – Fournier and Truesdell, 1973

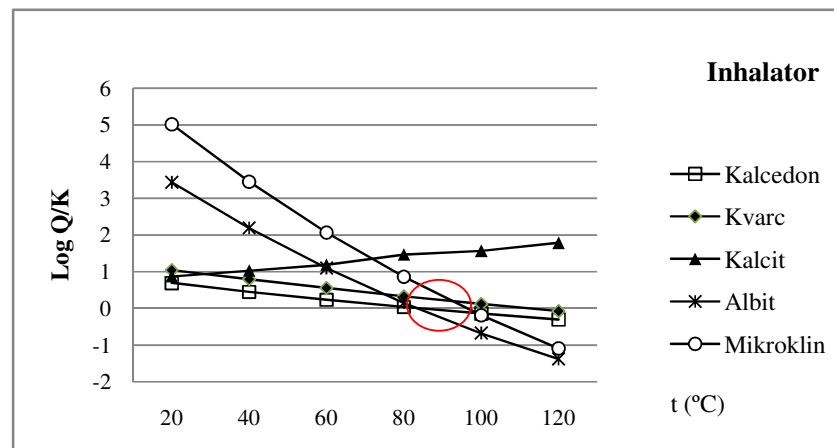
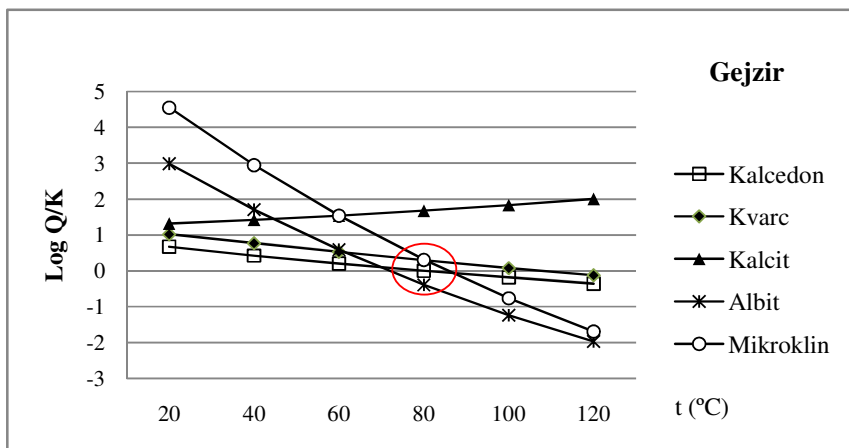
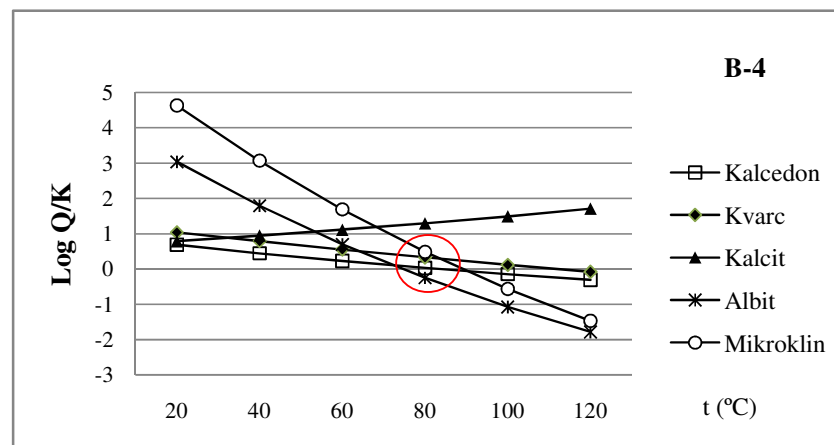
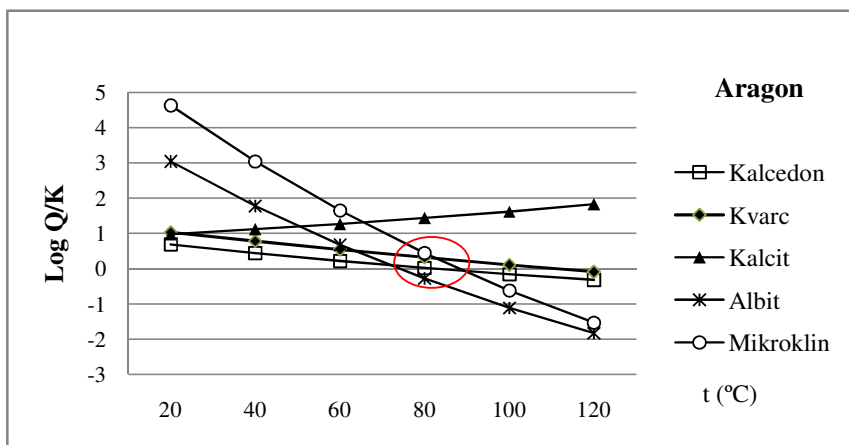
¹²⁾K-Mg – Giggenbach 1988



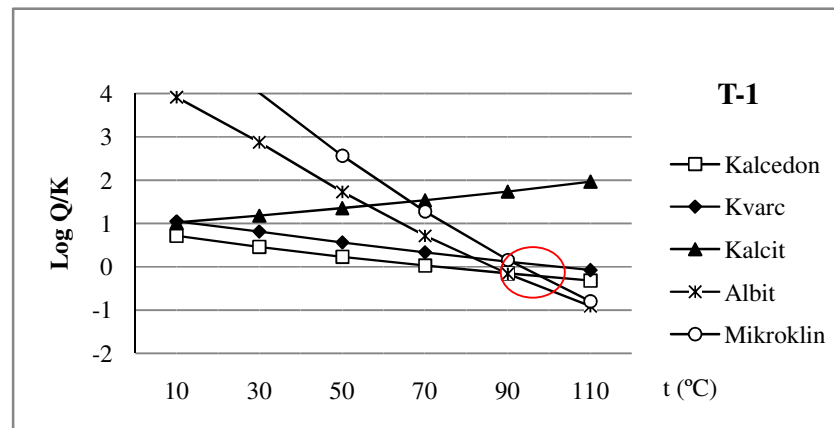
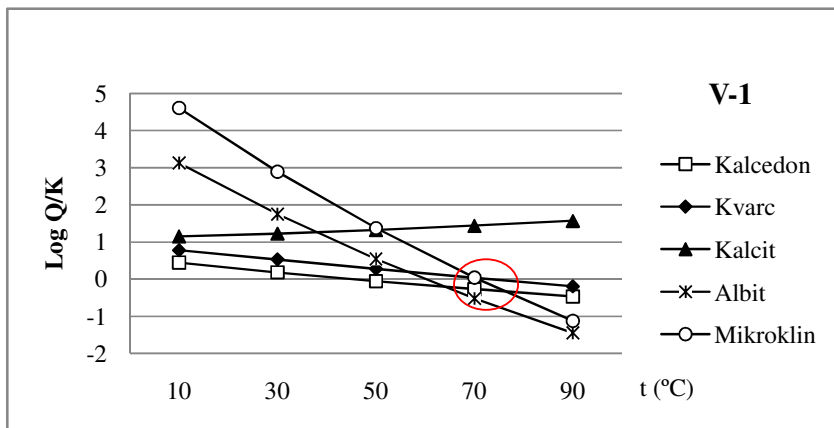
Slika 40. Dijagrami zavisnosti log Q/K u odnosu na promenu temperature, termalne vode u Prolom Banji (ravnoteža postignuta na ~48°C)



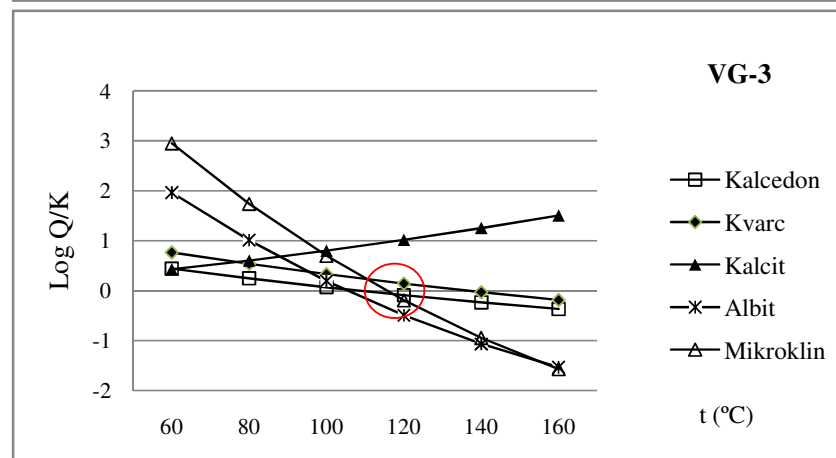
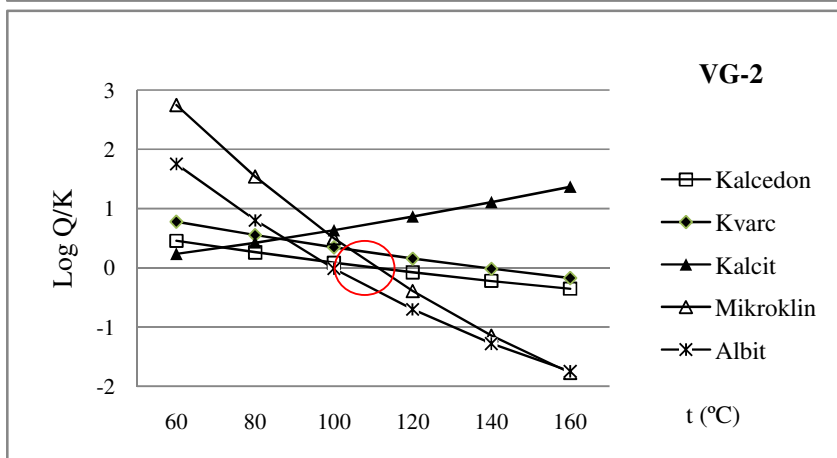
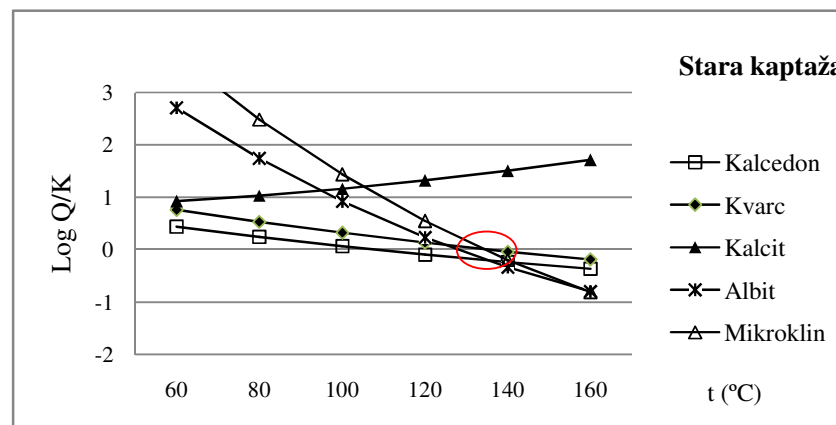
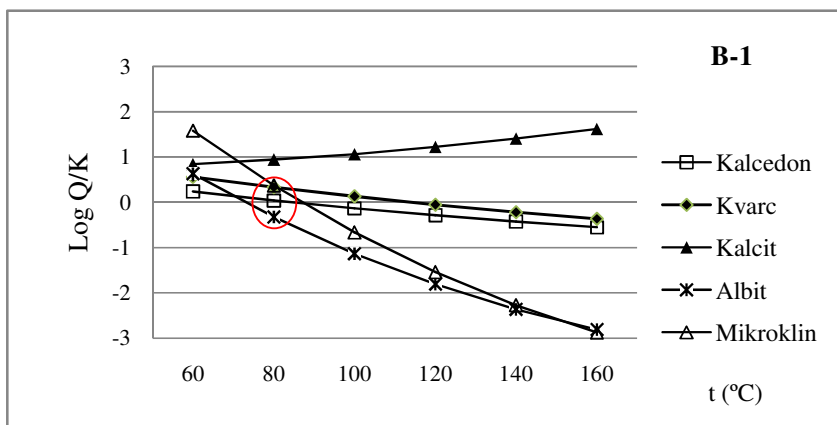
Slika 41. Dijagrami zavisnosti log Q/K u odnosu na promenu temperature, termalne vode u Ribarskoj Banji (u bušotini CRB-1 ravnoteža postignuta na 55-60°C, u bušotini RB-4 i RB-5 na 60-75°C)



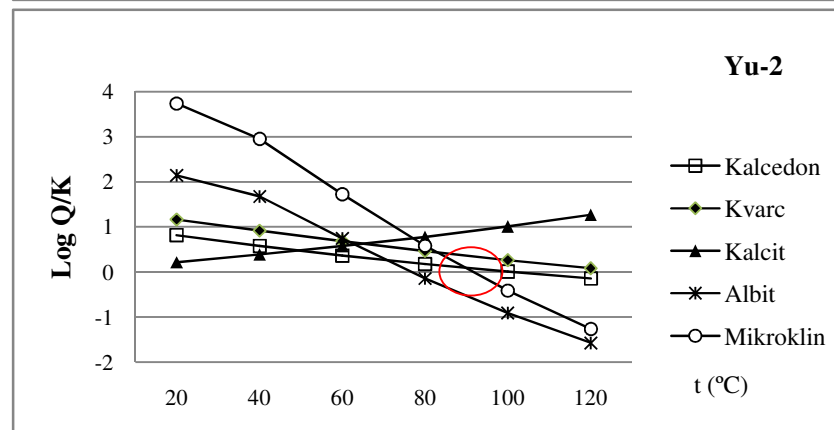
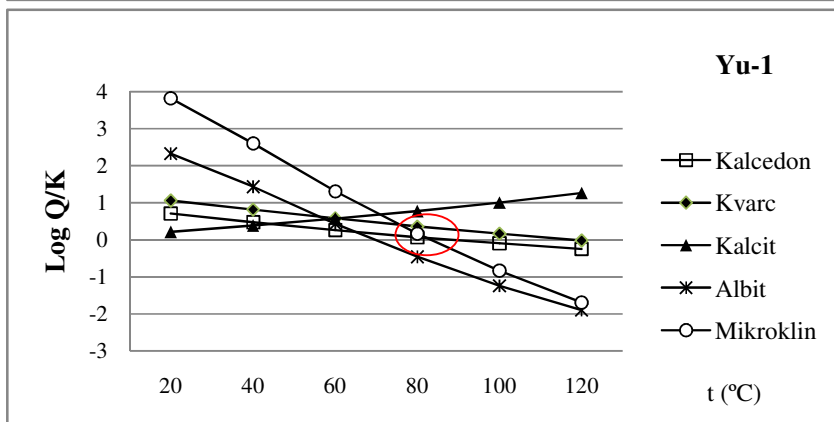
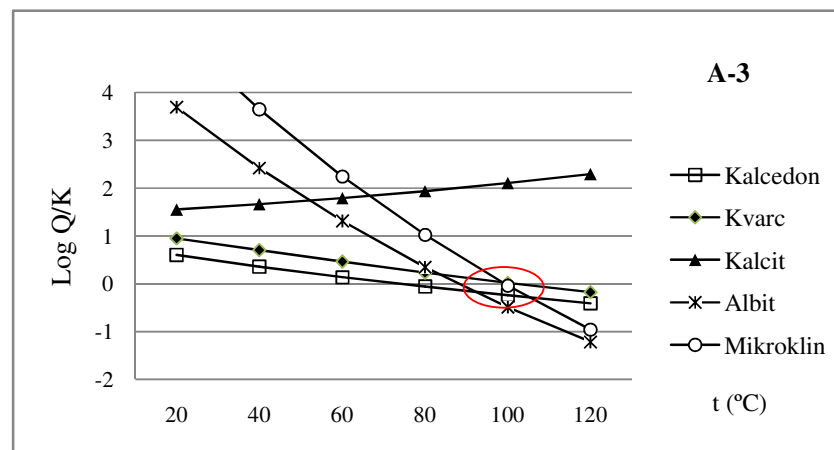
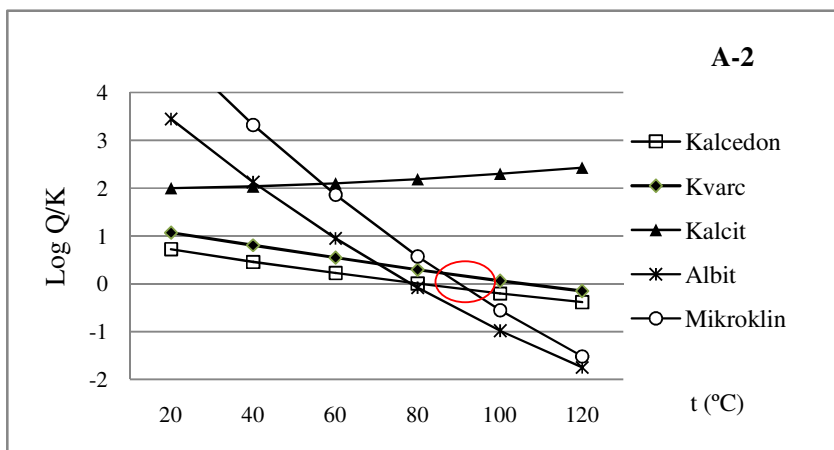
Slika 42. Dijagrami zavisnosti log Q/K u odnosu na promenu temperature, termalne vode u Sijarinskoj Banji (u bušotinama Aragon, B-4 i Gejzer ravnoteža postignuta na 80 °C, u bušotini Inhalator na 90°C)



Slika 43. Dijagrami zavisnosti $\log Q/K$ u odnosu na promenu temperature, u bušotini V-1 u selu Viča i bušotini T-1 u Tularu u bušotini V-1 u selu Viča, ravnoteža postignuta na 70 °C, dok je u bušotini T-1 u Tularu na 97 °C



Slika 44. Dijagrami zavisnosti log Q/K u odnosu na promenu temperature, termalne vode u Vranjskoj Banji (u bušotini B-1 ravnoteža postignuta na 80°C, u Staroj kaptazi na 135°C, u VG-2 i VG-3 115- 120°C)



Slika 45. Dijagrami zavisnosti log Q/K u odnosu na promenu temperature, termalne vode Bujanovačke Banje

(u bušotini A-2 ravnoteža se postiže na 95°C, u A-3 100°C, u Yu-1 80°C i u Yu-2 90°C)

Prolom Banja: Primenom Na-K geotermometra po Arnórsson et al (1983) i Na-K-Ca geotermometara u Prolom Banji dobijene su niže temperature od temperatura dobijenih na samoizlivu. Osim toga nije ispunjen ni jedan uslov po Karingithi (2009) za korišćenje Na-K geotermometra (videti poglavlje 3.2.1.), pa dobijeni rezultati ne mogu biti prihvaćeni. Generalno, silicijumski geotermometri ukazuju da se više temperature mogu očekivati u samoj banji, nego na lokaciji Pupavce. Po kvarcnim geotermometrima maksimalne temperature u rezervoaru su do maksimalnih 86°C, dok se po kalcedonskim geotermometrima proračunate temperature do 54°C. Voda Prolom Banje nije ugljikisela, pa vrednosti dobijene kalcedonskim geotermometrom mogu biti prihvaćene. Iako K-Mg geotermometri, zbog niskog sadržaja ovih elemenata, nisu preporučljivi za vode Prolom Banje, dobijene temperature su slične temperaturama dobijenim kalcedonskim geotermometrima.

Na osnovu dijagrama $\log(Q/K)$, na temperaturi isticanja (33°C) vode su u ravnoteži (± 1) sa svim izabranim mineralima, osim mikroklinom (slika 40). Najbolja ravnoteža između izabranih minerala i vode, u dve analizirane bušotine Prolom Banje, postiže se oko 48°C. Ove temperature dobijene su i kalcedonskim geotermometrom, tako da se ne mogu očekivati znatno više temperature u sistemu. Dijagrami (slika 40) za vode iz bušotina B-4 i B-5, potvrđuju da je reč o istom rezervoaru termalnih voda.

Ribarska Banja: Ni u bušotinama Ribarske Banje nije prihvatljivo korišćenje Na-K geotermometara, prvenstveno zbog povišene pH vrednosti voda, kao i zbog izmerene temperature koja je niža od 100°C. Zbog niskog sadržaja K i Mg, ni geotermometar K-Mg nije preporučljiv za korišćenje, dok zbog niskog sadržaja Ca i nižih temperatura ni geotermometar Na-K-Ca nije pouzdan. Na osnovu temperatura dobijenih Na-K-Ca geotermometrom uočava se značajna temperaturna razlika između pliće bušotine (CRB-1) i dubokih bušotina (RB-4 i RB-5), kao rezultat priliva hladnijih voda, bogatijih Ca u bušotini CRB-1.

Svi kvarcni geotermometri pokazuju približno iste temperature (90-97°C) nezavisno od primenjene metode. Kalcedonski geotermometri ukazuju da su u sistemu temperature od 60 do 67°C. Prema dijagramu $\log(Q/K)$ ravnoteža između vode i izabranih minerala postignuta je na 55-60°C u bušotini CRB-1 i na oko 60-75°C u dubokim bušotinama

RB-4 i RB-5 (slika 41). Izmerene temperature su niže od 100°C, što ukazuje da je ravnoteža u geotermalnom sistemu postignuta sa kalcedonom, međutim prema termokarotajnim merenjima u bušotini RB-5, već je dostignuta temperatura od 74°C na 1178 m, tako da se u geotermalnom sistemu Ribarske Banje očekuju više temperature. Kvarc može kontrolisati rastvorljivost silikata na temperaturama ispod 100°C, ako je voda dugo u kontaktu sa stenama (Chelnokov, 2004), pa su u ovom slučaju prihvatljivije temperature dobijene kvarcnim geotermometrom.

Sijarinska Banja: Primenom varijeteta Na-K geotermometara dobijene su temperature u opsegu većem od 50°C, od 116 do 173°C. Visoke temperature dobijene su i primenom Na-K-Ca geotermometra. Na ovaj geotermometar utiče gubljenje Ca prilikom izlučivanja kalcita, kao i prisustvo CO₂. Na najniže temperature u sistemu, niže od 100°C, ukazuju kalcedonski geotermometri.

Prema dijagramu log(Q/K) (slika 42), ravnoteže izabranih minerala (Q/K=0) u vodama Sijarinske Banje dostignute su na 80°C, odnosno 90°C u Inhalatoru. To su približne temperature na koje ukazuju i kalcedonski geotermometri (87°C). Međutim, ako bi se prihvatile temperature dobijene kalcedonskim geotermometrom i na osnovu indeksa zasićenja, to bi značilo da su u banji skoro dostignute maksimalne temperature (u bušotini B-4 prilikom presecanja rasedne zone na 360 m, dobijena je temperatura od 77°C) i da je izvor toplote u neposrednoj blizini, što nije dokazano geološkim istraživanjima.

U slučaju da je voda dugo u kontaktu sa stenama, kvarc može kontrolisati rastvorljivost silikata, što je potpomognuto prisustvom CO₂. Pošto su vode Sijarinske Banje ugljikisele, a temperature dobijene kalcedonskim geotermometrom i na osnovu ravnoteže minerala nisu reprezentativne, najprihvatljivija je temperatura određena kvarcnim geotermometrima. Po ovim geotermometrima očekivane temperature u Sijarinskoj Banji su oko 115°C.

Prema ravnotežnim temperaturama dobijenim pomoću indeksa zasićenja u bušotini V-1 (Viča) mogu se očekivati temperature od 70-80°C, koje su približno dobijene i kvarcnim geotermometrima (~80°C).

Iako su u bušotinama u selu Tulare i u Viči zabeležene niske temperature, geotermometri ukazuju da se u ovim područjima mogu očekivati znatno više temperature. Tako u Tularu je na osnovu ravnoteže minerala očekivana temperatura 90°C, dok je po kvarcnom geotermometru oko 104°C. Najviše temperature procenjene su po Na-K-Ca geotermometru, međutim ove vode, kao i vode Sijarinske Banje sadrže značajne količine CO₂, tako da dobijene temperature nisu prihvatljive bez korekcije CO₂. Visok sadržaj SiO₂ u ovim vodama može biti posledica kompleksnih geohemijskih uslova na koje ukazuju hemijske analize voda, odnosno visoka mineralizacija, visok sadržaj mikroelemenata u vodi i visok sadržaj gasova.

Vranjska Banja: U Vranjskoj Banji je zabeležena temperatura preko 100°C, pa osim kvarcnog, mogu biti prihvaćeni i Na-K geotermometri. Na-K-Ca geotermometar nije prihvatljiv zbog niskog sadržaja Ca u vodi. Prema dijagramu log(Q/K) najviša očekivana temperatura je u Staroj kaptazi od 135°C, a najniža u bušotini B-1 od 80°C (slika 44). U dubokim bušotinama VG-2 i VG-3 ravnoteža je postignuta na 115-120°C. Međutim prema podacima bušenja, u ovim bušotinama je izmerena maksimalna temperatura od 126°C (VG-2), odnosno 124°C (VG-3).

Primenom Na-K geotermometra u Staroj kaptazi dobijena je najviša temperatura od 176°C (Na-K geotermometar po Giggenbach-u, 1988), i najniža temperatura od 126,1°C (Na-K geotermometar po Arnorsson-u et al, 1983). Svi kvarcni geotermometri pokazuju da se na Staroj kaptazi i u bušotinama VG-2 i VG-3 očekuju temperature od oko 140-145°C, pri čemu i Na-K geotermometar (Nieva and Nieva, 1987) ukazuje na približno iste maksimalne temperature u ovim objektima. Na temperature između 130-140°C ukazuju i Martinović i Magazinović (2010). U bušotini B-1 ne očekuju se temperature veće od 120°C, što potvrđuje pretpostavku da u ovoj bušotini dolazi do mešanja sa hladnijim podzemnim vodama.

Bujanovačka Banja: Na-K geotermometri pokazuju neočekivano višu temperaturu za hladan izvor Partizanska česma u odnosu na bušotinu A-2. Uslovi koji ukazuju na povoljnost korišćenja Na-K geotermometra nisu zadovoljeni (Karingithi, 2009,

poglavlje 3.2.1), a zbog značajnog prisustva CO₂ ni Na-K-Ca geotermometar nije relevantan. Najpouzdanije prognozne temperature rezervoara se oslanjaju na silicijumske geotermometre. Prema kvarcnim geotermometrima u bušotinama Bujanovačke Banje očekuju se temperature do 130°C (Yu-2), u bušotini Yu-1 118°C, dok se u bušotini A-2 u samoj banji procenjuje temperatura od oko 123°C. Kalcedonskim geotermometrima dobijene su niže temperature od kvarcnih geotermometara, tako da je najviša temperatura 103°C u bušotini Yu-2, dok je u bušotini A-2 95°C. Zbog prisustva CO₂ prihvatljiviji su kvarcni geotermometri.

Metodom određivanja temperature na osnovu dijagrama log(Q/K) (slika 45) očekivane temperature su od 80°C (Yu-1) do 100°C (A-3). Ovom metodom najviše očekivane temperature su u u bušotinama A-3 i A-2, dok se po silicijumskim geotermometrima najviše temperature očekuju u bušotinama Yu-1 i Yu-2. Razlike u temperaturama između bušotina Yu-1 i Yu-2 je posledica različitog perioda analiziranja (Yu-1 2011, Yu-2 2007), i što je Yu-2 analizirana kao flaširana voda (Bivoda) kupljena u marketu, za razliku od Yu-1 koja je uzorkovana na terenu.

Sumirajući primenjene metode, temperature u rezervoarima Srpskog kristalastog jezgra uglavnom se oslanjaju na kvarcne i kalcedonske geotermometre. Metoda procene temperature pomoću indeksa zasićenja (SI) ukazuju na temperature uglavnom sličnije kalcedonskim geotermometrima, međutim te temperature su ponekad i niže ili približno iste sa temperaturama voda dobijenih karotažnim merenjima u bušotinama (Ribarska Banja, Sijarinska Banja). Neprihvatljive temperature koje su dobijene kalcedonskim geotermometrom, kao i temperature dobijene na osnovu indeksa zaićenja, posledica su mešanja sa hladnijim vodama i zasićenjem mineralima (kvarc, kalcedon). Na osnovu rezultata i njihove analize, može se zaključiti da su očekivane temperature u rezervoarima:

Prolom Banje: 45-54°C (kalcedon)

Ribarske Banje: 90-97°C (kvarc)

Sijarinske Banje: 115°C (kvarc)

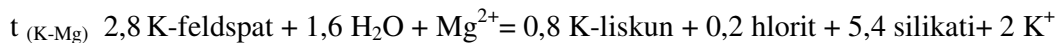
Tulara: 104°C (kvarc)

Viče: 79°C (kvarc)

Vranjske Banje: 118-146°C (kvarc)

Bujanovačke Banje: od 90 do 123°C (kvarc)

Procena ravnotežnog stanja vode i minerala moguća je i na osnovu Giggenbach-ovog (1988) trilinearnog dijagrama. Dijagram se zasniva na odnosima između Na (albit), K (mikroklin) i Mg (liskuni i hlorit) u vodi (slika 46), koristeći vezu između Na/1000, K/100 i \sqrt{Mg} . Metod se zasniva na hemijskoj ravnoteži između sledećih mineralnih faza:



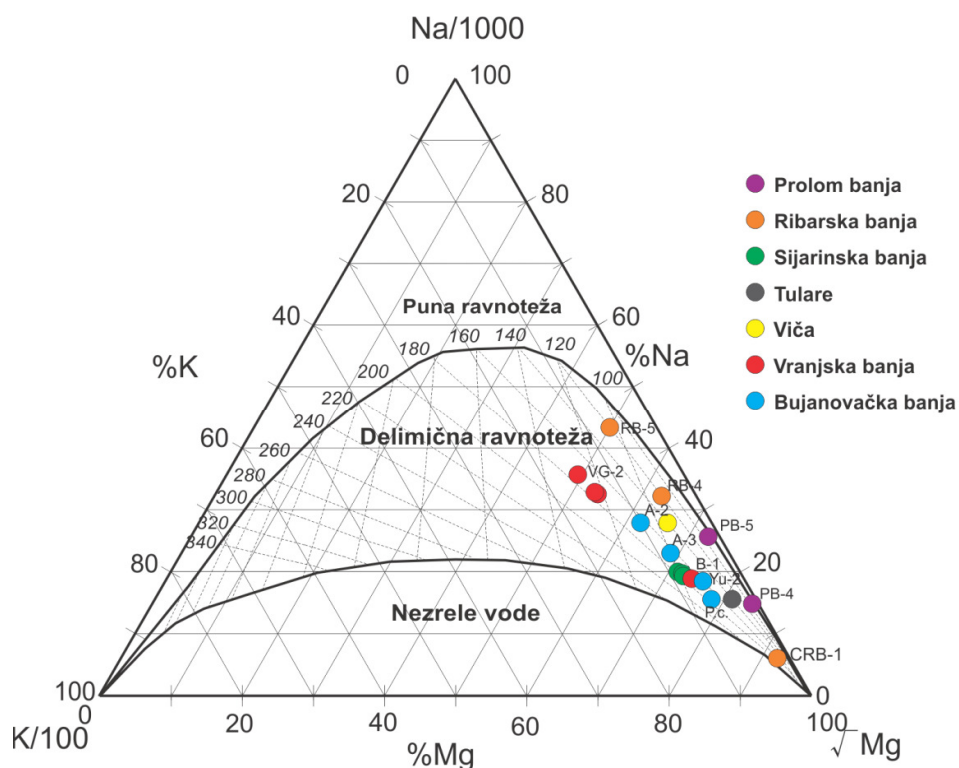
Na-K-Mg dijagram konstruisan je na osnovu termodinamičkih osobina stabilnih minerala i omogućava razlikovanje:

- voda koje su u ravnoteži sa visoko temperaturnim mineralima (puna ravnoteža), što znači da se stena ne rastvara pod dejstvom vode;
- voda formiranih u stanju delimične ravnoteže sa Na, K i Mg, odnosno stanje delimične ravnoteže ukazuje da je mineral rastvoren, ali nije došlo do ravnoteže ili se voda koja je dostigla ravnotežu (geotermalna voda) meša sa vodom koja nije dostigla ravnotežu (hladna podzemna voda). Tačke na dijagramu koje se nalaze blizu \sqrt{Mg} ugla obično ukazuju na visok sadržaj hladne podzemne vode pre nego što ukazuju na “nezrele” vode;
- plitkih voda, odnosno nezrelih voda (immature waters), koje ne postižu ravnotežu sa stenama. Kada ne postoji ravnoteža između vode i stene, dešava se potpuno rastvaranje minerala stene.

Osim toga ovaj dijagram pokazuje očekivane temperature u rezervoaru na osnovu geotermometara Na-K i K- \sqrt{Mg} (Gigenbach, 1988).

Na Na-K-Mg dijagramu (slika 46) uočava se da se sve vode Srpskog kristalastog jezgra nalaze u okviru zone delimične ravnoteže. Vode Prolom Banje se nalaze najbliže liniji pune ravnoteže, kao i vode iz bušotina RB-4 i RB-5. Voda iz bušotine CRB-1 se nalazi na granici između zone delimične ravnoteže i nezrelih voda, u uglu $\sqrt{\text{Mg}}$, što potvrđuje, iznad navedenu pretpostavku, da u ovim bušotinama dolazi do mešanja sa vodama iz plićih vodonosnih zona. U odnosu na ostale uzorke vode iz Vranjske Banje, u uglu $\sqrt{\text{Mg}}$ se nalazi i voda iz bušotine B-1. I u uzorcima voda iz Bujanovačke Banje je zapaženo da se pliće bušotine, kao i izvor Partizanska česma nalaze bliže liniji “nezrelih voda”, a da je “delimična ravnoteža” izraženija u dubljim bušotinama.

Prema Na-K-Mg dijagramu (slika 46) uočava se da se najviše temperature očekuju u dubokim bušotinama i Staroj kaptaži Vranjske Banje, a najniže u Prolom Banji.



Slika 46. Na-K-Mg trilinearni dijagram termalnih voda Srpskog kristalastog jezgra

5.3. Procena korozije i inkrustracije u bušotinama

Sagledavanje korozivnih i inkrustativnih svojstava vode veoma je važno zbog planiranja korišćenja voda, naročito u cilju projektovanja cevi i opreme. Zbog značajnog prisustva rastvorenih materija i visokih temperatura, geotermalne vode mogu izazvati korodiranje cevi ili stvaranje taloga na cevima, čime se smanjuje produkcija bušotina, odnosno onemogućava se korišćenje voda. Inkrustracija se javlja u vidu taloga CaCO_3 , koji se taloži u vidu kalcita (Vranjska Banja), aragonita (Sijarinska Banja) ili veterita.

Analizirajući dijagrame log Q/K u odnosu na promenu temperature (slike 40-45) uočava se da je zasićenje kalcitom ($\text{SI} > 1$) prisutno u svim bušotinama Sijarinske Banje, Vranjske Banje, Bujanovačke Banje, bušotini V-1 (Viča) i bušotini T-1 (Tulare), i manifestuje se stvaranjem naslaga CaCO_3 . Uočava se da se zasićenje voda kalcitom javlja u vodama sa visokim sadržajem CO_2 i HCO_3 . Prema dijagramu, inkrustrativna svojstva nemaju samo alkalne vode Prolom i Ribarske Banje (niži sadržaj CO_2 i HCO_3).

Inkrustrativna i korozivna svojstva vode moguće je odrediti pomoću Langelier-ovog indeksa zasićenja i Ryznar-ov indeksa stabilnosti (tabela 19). Za određivanje ovih indeksa neophodni su pH vrednost, mineralizacija, temperatura, Ca i HCO_3 , pa su za Sijarinsku banju korišćene i postojeće analize rađene u Institutu za rehabilitaciju u Beogradu.

U analiziranim vodama Srpskog kristalastog jezgra vrednost Langelier-ovog indeksa zasićenja je od -0,7 do 1,0 i Ryznar-ovog indeksa stabilnosti od 5,0 do 9,3.

Kao što je gore navedeno, u vodama Prolom i Ribarske Banje ne očekuje se inkrustracija, ali može se očekivati manja korozija. Značajan korozivni potencijal imaju vode sa visokim sadržajem CO_2 i O_2 , kada Fe^{2+} dođe u kontakt sa ovim gasovima (Papić, 1991).

U Sijarinskoj Banji zasićenje kalcitom ukazuje na izlučivanje i taloženje CaCO_3 , koji se u banji taloži kao aragonit, odnosno mermerni oniks. Obično se taloži iz toplih izvora, zbog nagle promene temperature. U bušotini Inhalator CaCO_3 se obara što dovodi do smanjenja prečnika bušotine, tako da se svakih nekoliko godina bušotina sanirala u cilju otklanjanja taloga. Bunar A-1 je nazvan Aragon po stvaranju taloga aragonita. Talog CaCO_3 se stvara u sistemima obogaćenim CO_2 . Cirulacijom vode u bušotini ka vrhu

dolazi do pada pritiska i izdvajanja rastvorenog CO₂, čime se povećava pH vode. Pri povećanju pH vrednosti vode, dolazi do prelaska HCO₃ u CO₃²⁻, koji izaziva taloženje CaCO₃ na zidovima eksploatacione cevi, površinskim instalacijama i uređajima (Soleša i saradnici, 1995).

Tabela 19. Langelierov indeks zasićenja (LSI) i Ryznar-ov indeks stabilnosti (RSI)

Lokacija	Bušotina	pH	pHs	LSI	RSI
Prolom Banja	B-4	8,5	8,6	-0,07	8,6
	B-5	8,85	9,1	-0,23	9,3
Ribarska Banja	RB-4	9,1	9,0	0,08	8,9
	RB-5	9,2	8,8	0,43	8,3
	CRB-1	8,4	8,3	0,14	8,1
Sijarinska Banja	B-4	7,0	6,0	1,0	5,0
	Gejzer	6,7	6,1	0,6	5,5
	Inhalator	6,9	6,2	0,7	5,5
	Aragon	7,3	6,1	1,2	5,1
	Suzica	6,7	6,8	-0,1	6,9
	Zdravlje	6,3	6,6	-0,3	6,9
	Jablanica	6,42	6,6	-0,25	6,9
	Hisar	6,5	6,7	-0,2	6,9
	Borovac	6,35	6,5	-0,2	6,75
	Raj	6,3	6,8	-0,5	7,3
Snežnik	6,2	6,9	-0,7	7,6	
Tulare	T-1	6,4	6,3	0,05	6,3
Viča	V-1	7,5	7,2	0,3	6,9
Vranjska Banja	St.kaptaža	7,4	6,9	0,5	6,4
	B-1	7,2	7,1	0,1	7,0
	VG-2	8,0	7,2	0,8	6,4
	VG-3	8,0	7,0	1,0	6,0
Bujanovačka Banja	P.česma	6,6	7,1	-0,54	7,7
	A-3	6,6	6,6	0,04	6,5
	A-2	6,5	6,2	0,3	5,9
	Yu-1	6,7	6,5	0,16	6,4
	Yu-2	6,6	6,4	0,2	6,2

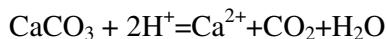
Na osnovu proračuna datih u tabeli 19, potvrđuje se da u termalnim vodama iznad 60°C (B-4, Gejzer, Inhalator, Aragon) dolazi do inkrustracije, bez korozije, dok u vodama

nižih temperatura dolazi do manje korozije, bez inkrustracije. Najviše vrednosti LSI zabeležene su u vodama iz bušotina B-4 i Aragona. Voda sa izvora Snežnik ima veoma korozivna svojstva.

Taloženje CaCO_3 se uglavnom javlja kao rezultat prelaska CO_2 iz tečne u gasovitu fazu sa porastom pH vrednosti. Taloženje CaCO_3 je u zavisnosti i od temperature vode, tako da sa porastom temperature, bikarbonati se razlažu do karbonata i uz prisustvo Ca dolazi do sledeće reakcije (Vaska and Kellog, 1988):



Rastvorljivost kalcita, aragonita i drugih CaCO_3 minerala može se izraziti sledećom reakcijom:



Da bi se omogućila optimalna količine voda na objekatima, neophodno je uspostaviti ravnotežno stanje između pritiska, CO_2 i količine vode.

U Vranjskoj Banji inkrustracija u instalacijama i cevima vremenom dovodi do smanjenja protoka vode. Prema Langelier-ovom indeksu zasićenja najveći problem predstavljaju duboke bušotine gde dolazi do značajnije inkrustracije. U svim bušotinama u Vranjskoj Banji, voda je prezasićena kalcitom, s tim što sa padom pritiska dolazi do njegovog istaložavanja i smanjenja prezasićenosti u rastvoru. Otvaranjem dubokih bušotina zabeleženo je intenzivno taloženje CaCO_3 , kao posledica poremećaja ravnoteže, pri promeni temperature i pritiska. Pritisak CO_2 na ustima bušotine iznosi 9,5 bar-a, a parcijalni pritisak CO_2 u vazduhu je 0,0003 bar-a, što dovodi do izdvajanja CO_2 na ustima bušotine i prouzrokuje prezasićenje kalcitom u rastvoru i njegovo istaložavanje.

Na osnovu Langelier-ov indeksa zasićenja i Ryznar-ov indeksa stabilnosti voda iz bušotine T-1 (Tulare), V-1 (Viča), vode Vranjske Banje i Bujanovačke Banje mogu dovesti do manje inkrustracije ili korozije, dok voda na izvoru Partizanska česma ima teško korozivna svojstva.

Za sprečavanje inkrustracije, odnosno taloženja CaCO_3 , dodaju se inhibitori taloženja, antiinkrustricijenti, koji se utiskuju u sloj ili se doziraju na kritičnim mestima (Soleša i saradnici, 1995). Antiinkrustricijenti su neorganski polifosfati, organske kiseline, etri...

Za sprečavanje korozije dodaju se alkalni reagenski, kreč, NaHCO_3 ili NaOH , fosfatna jedinjenja ili se vrši degazacija.

5.4. Rezultati i diskusija izotopskih analiza

U cilju određivanja prihranjivanja geotermalnog sistema korišćeni su stabilni izotopi $\delta^2\text{H}$ i $\delta^{18}\text{O}$. Izotopi u geotermalnim vodama sugerišu na njihovo poreklo, ali i na mešanje, interakciju voda-stena, kondenzaciju i starost (Armannsson, 2007). Vrednosti izotopa u termalnim vodama Srpskog kristalastog jezgra su od -8,07 do -11,14 ‰ za $\delta^{18}\text{O}$ i od -73,89 do -82,76 ‰ za $\delta^2\text{H}$ (tabela 20).

Izotopi analiziranih voda $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$, nalaze se uz globalnu meteorsku liniju (slika 47) što potvrđuje da se analizirane termalne vode prihranjuju od atmosferskih padavina. Manje odstupanje od linije padavina uočeno je u sadržaju $\delta^{18}\text{O}$.

U visokotemperaturnim vodama, odstupanje $\delta^{18}\text{O}$ od linije padavina, posledica je obogaćivanja $\delta^{18}\text{O}$ prilikom interakcije između vode i stena (Hadžišehović et al, 1995), što može biti prihvatljivo jedino u vodama Vranjske Banje.

Posmatrajući vrednosti analiziranih termalnih voda u odnosu na horizontalnu strelicu (slika 47) koja ukazuje na interakciju između voda i stena, zaključuje se da je najintenzivnija interakcija u hladnijim vodama kao što su vode Viče i Tulara, što se odrazilo na mineralizaciju ovih voda. Na interakciju između voda i stena, pored temperature voda, utiče i starost voda, alkalnost vode, prisustvo gasova (CO_2 , H_2S), vrsta stenskih masa kroz koje vode cirkulišu, njihove rastvorljivosti.

Pomeranje $\delta^{18}\text{O}$ u vodama Srpskog kristalastog jezgra posledica je visinske razlike, to jeste, razlike u nadmorskoj visini prihranjivanja. Niža vrednost $\delta^{18}\text{O}$ ukazuje na više nadmorske visine i obrnuto. Na 100 m porasta nadmorske visine sadržaj $\delta^{18}\text{O}$ pomera se za -0,15 do -0,5 ‰ i za $\delta^2\text{H}$ -1,5 do -4 ‰ (Kendall et al, 1995).

Ovo je veoma značajan podatak, naročito ako je za neke podzemne vode definisana visina prihranjivanja. Na osnovu poznate visine prihranjivanja, koristeći efekat visinske razlike, mogu da se izračunaju visine prihranjivanja ostalih podzemnih voda. Pouzdanim podacima dobijaju se na osnovu $\delta^{18}\text{O}$.

Vode Prolom Banje imaju najnižu vrednost $\delta^{18}\text{O}$ od svih analiziranih voda, tako da se ove vode prihranjuju na najvišim visinama na području Srpskog kristalastog jezgra. Prihranjivanje je moguće jedino na Radan planini (lecki andezitski masiv) gde je najviši vrh Šopot (1409 m.n.v.). Razlike u vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ određene u bušotini B-4 i B-5 ukazuju da se vode u banji (bušotina B-4) prihranjuju na višim nadmorskim visinama, dok je prihranjivanje vode iz Pupavca na nižim nadmorskim visinama, sa visinskom razlikom od 100 do 200 m. Prosečna visina prihranjivanja voda Prolom Banje je iznad 1200 m.n.v. (slika 5), tako što se vode iz bušotine u banji prihranjuju na 1300 m.n.v, a vode iz bušotine B-5 na 1100 m.n.v. Zona prihranjivanja se pruža u okviru andezita jugoistočno od banje, i obuhvata vrh Sokolovac.

Hemijski sastav voda ukazuje na isti rezervoar voda, a na različite visine prihranjivanja (Milivojević i Perić, 1990, fond. dok).

U termalnim vodama Sijarinske Banje zabeležene vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ ukazuju na prihranjivanje 100 do 300 m niže od prihranjivanja voda Prolom Banje. Na osnovu ovog podatka, definisana je zona prihranjivanja termalnih voda Sijarinske banje iznad 1000 m.n.v. (slika 15). Ove visine ukazuju na prihranjivanje u okviru leckog andezitskog masiva, sa površinski većom zonom prihranjivanja od zone voda Prolom Banje. Iako je zona prihranjivanja dosta udaljena, dobro razvijen sistem raseda omogućava isticanje voda na području Sijarinske Banje.

Izotopske vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ termalnih voda Ribarske Banje imaju približno iste vrednosti kao vode u Sijarinskoj Banji (tabela 20). Na osnovu istih vrednosti definisana je ista nadmorska visina prihranjivanja ovih voda, odnosno iznad 1000 m. Ove visine obuhvataju K-Pg kontaktno metamorfne stene na planini Jastrebac, istočno od Ribarske Banje (slika 10).

Po Milovanoviću et al (1989), prihranjivanje termalnih voda Vranjske Banje je iznad 1100 m.n.v, dok je po Hadžišehović et al (1993) visina prihranjivanja iznad 500 m.n.v. Na osnovu prosečnih vrednosti izotopa $\delta^{18}\text{O}_{\text{sr}}=-10,35\%$, zona prihranjivanja termalnih

voda Vranjske Banje obuhvata kote iznad 800 m.n.v., s tim što se vode Stare kaptaze prihranjuju na nižim kotama (oko 750 m.n.v.), a vode iz bušotine B-1 na višim (oko 900 m.n.v). Vode iz bušotine VG-2 i VG-3 imaju istu zonu prihranjivanja iznad 800 m.n.v. (slika 22). Ove visine obuhvataju ceo surdulički masiv, tako da je zona prihranjivanja velika, što opravdava dobijene količine voda u Vranjskoj Banji.

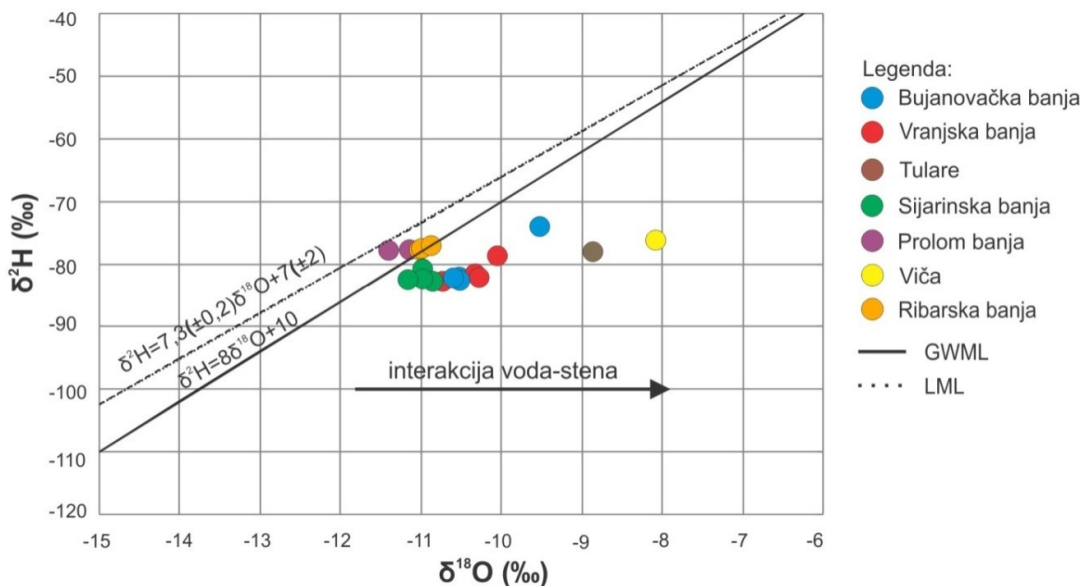
U Bujanovačkoj Banji zabeležene su razlike u vrednostima izotopa između uzorka hladne vode (Partizanska česma) i termalnih voda u banji od 1,11 ‰ za $\delta^{18}\text{O}$ i od 8,36 ‰ za $\delta^2\text{H}$. Viša vrednost deuterijuma u hladnoj vodi u odnosu na termalnu vodu, posledica je mešanja izotopski obogaćene podzemne vode sa šireg područja istraživanja sa izotopski osiromašenom podzemnom vodom iz lokalnog područja istraživanja (Nieva et al, 1997). Vrednosti izotopa u vodama iz bušotine A-3, A-2 i Yu-1 ukazuju na istu zonu prihranjivanja, koja se pruža iznad 900 m.n.v. u okviru gnajseva i granita S-SI od banje (slika 30), dok se hladne vode Partizanske česme prihranjuju na nižim nadmorskim visinama na oko 700 m.n.v.

Najvišu vrednost $\delta^{18}\text{O}$ imaju termalne vode iz Viče što ukazuje na prihranjivanje na najnižim nadmorskim visinama u okviru Srpskog kristalastog jezgra. Vode iz Viče prihranjuju se iznad 400 m.n.v., u okviru M, Pl klastita i Pz mermera.

Vrednosti izotopa termalne vode u selu Tulare ukazuju na prihranjivanje u okviru andezita (>500 m.n.v.).

Tabela 20. Sadržaj izotopa i radioaktivnost termalnih voda Srpskog kristalastog jezgra (izotopske analize rađene u laboratoriji TU, Dresden, 2011; radioaktivnost određena u laboratoriji PMF-a u Novom Sadu, 2013. godine)

Lokalitet	Bušotina	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	^3H (T.U.)	α aktivnost (Bq/l)	β aktivnost (Bq/l)	^{222}Rn (Bq/l)	^{226}Ra (Bq/l)
Prolom Banja	B-4	-11,40	-77,73					
	B-5	-11,13	-77,61					
Ribarska Banja	RB-4	-10,99	-77,33	<17,8	0,020±0,002	< 0,3	42 ± 7	0,32 ± 0,19
	RB-5	-11,01	-77,43	<17,8	0,082±0,009	< 0,3	54 ± 8	0,48 ± 0,18
	CRB-1	-10,85	-77,12	<17,8	0,101±0,011	< 0,3	104 ± 15	0,26 ± 0,08
Sijarinska Banja	Aragon	-10,8	-82,60	<17,8	3,3±0,4	< 0,3	52±9	0,41±0,18
	Gejzer	-11,01	-82,51	<17,8	1,15±0,12	< 0,3	48±6	0,45±0,09
	B-4	-11,14	-82,40	<17,8	2,05±0,22	< 0,3	32±7	0,37±0,08
	Inhalator	-10,98	-80,72	<17,8				
Tulare	T-1	-8,86	-77,80	<17,8	2,9±0,4	< 0,3	52±10	0,35±0,18
Viča	V-1	-8,07	-76,05					
Vranjska Banja	St. kaptaza	-10,05	-78,66	<17,8	0,20±0,04	< 0,3	26±5	0,27±0,07
	B-1	-10,74	-82,76	<17,8	0,25±0,06	< 0,3	48±5	0,27±0,07
	VG-2	-10,34	-81,52					
	VG-3	-10,28	-82,17					
Bujanovačka Banja	Part. česma	-9,52	-73,89	<17,8	0,30±0,12	< 0,3	46±9	0,21±0,09
	A-3	-10,52	-82,25	<17,8	0,73±0,09	< 0,3	52±13	0,32±0,017
	A-2	-10,63	-82,08	<17,8	0,64±0,07	< 0,3	30±11	0,47±0,20
	Yu-1	-10,53	-82,11	<17,8	0,60±0,07	< 0,3	10,4±0,9	0,48±0,09



Slika 47. Sadržaj $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ u termalnim vodama Srpskog kristalastog jezgra

Legenda: GWML-Globalna svetska meteorska linija (Craig, 1961); LML-Lokalna meteorska linija (Hadžišehović et al, 1993; Hadžišehović et al, 1995)

Za određivanje starosti voda koriste se nestabilni izotopi ^3H i ^{14}C . Tricijum je antropogenog porekla, nastao serijom termonuklearnih eksplozija u atmosferu od 1952. godine pa na dalje. Maksimalna koncentracija od 6000 T.U. registrovana je 1963. godine. Nakon zabrane nuklearnih testiranja koncentracija tricijuma je postepeno opadala zbog kratkog perioda poluraspada (12,4 godina). Danas je koncentracija tricijuma u atmosferi manja od 10 T.U. Postojanje ^3H u podzemnim vodama ukazuje da se sistem prihranjivao sa vodama starim najviše 50 godina. U svim analiziranim vodama sadržaj ^3H je manji od 2,1 Bq/l (granica detekcije), odnosno od 17,8 T.U., što ukazuje da je reč o starijim vodama. Iako je visoka granica detekcije, generalno se u ovim vodama ne očekuje tricijum, pošto su u pitanju duboki geotermalni sistemi.

Prema ranijim analizama sadržaj ^{14}C u termalnim vodama Vranjske Banje je $\delta^{14}\text{C}$ od 1,3 pmC (percent modern Carbon) do 6,9 pmC (Hadžišehović et al, 1995), odnosno 6 pmC (Milivojević i Perić, 1990, fond.dok.). Na osnovu ^{14}C procenjena je starost od 9000 do 20000 godina (21900 ± 650 Milivojević i Perić, 1990, fond.dok.), mada zbog visoke koncentracije

bikarbonata Hadžišehović et al (1995) pretpostavljaju da je starost voda manja. Vrednost $\delta^{13}\text{C} = -3,3\text{‰}$ ($-3,7\text{‰}$, Milivojević i Perić, 1990, fond.dok.) ukazuje na intenzivnu reakciju između vode i stene.

U Sijarinskoj Banji, novijim analizama ^{14}C (Milanović i saradnici, 2012) starost voda je procenjena na 42160 ± 1630 godina. Korigovanjem ovog podatka statističkim korekcionim modelom STAT modelom zbog povećane reakcije karbonata unutar izdani, dobijeno je da je starost voda Sijarinske Banje od 10000 do 40000 godina (Milanović i saradnici, 2012). Starost od 40000 godina ukazuje na dug vremenski period cirkulacije voda, odnosno na dug vremenski period od prihranjivanja do isticanja.

Na području Srpskog kristalastog jezgra, metodom ^{14}C ustanovljeno je da su najmlađe vode Prolom Banje od 1350 ± 90 godina, dok su najstarije vode u Viči i Bujanovačkoj Banji za koje je procenjeno da su starije od 40000 godina (Milivojević i Perić, 1990, fond.dok.).

Prema Pravilniku o higijenskoj ispravnosti voda za piće ("Sl. list SRJ", br. 42/98 i 44/99), sadržaj alfa radioaktivnosti u vodama Sijarinske Banje, Tulara, Vranjske i Bujanovačke Banje je iznad dozvoljenih koncentracija ($>0,1$ Bq/l). Ovo je naročito bitno za vode Bujanovačke Banje, koje se koriste za piće. Sadržaj beta radioaktivnosti je u granicama dozvoljenih vrednosti u vodama za piće.

Prirodni radionuklidi uranovog niza ^{222}Rn (radon) i ^{226}Ra (radijum) često se javljaju u termalnim vodama. Visoke koncentracije ^{222}Rn često se sreću u pukotinskim zonama kristalastih stena (Leonard and Janzer, 1978). To je potvrđeno i na osnovu analiza termalnih voda Srpskog kristalastog jezgra (Nikolov et al, 2013), tako da je najviša koncentracija ^{222}Rn određena u vodi iz bušotine CRB-1 u Ribarskoj Banji, u kojoj je voda zahvaćena iz rasedne zone.

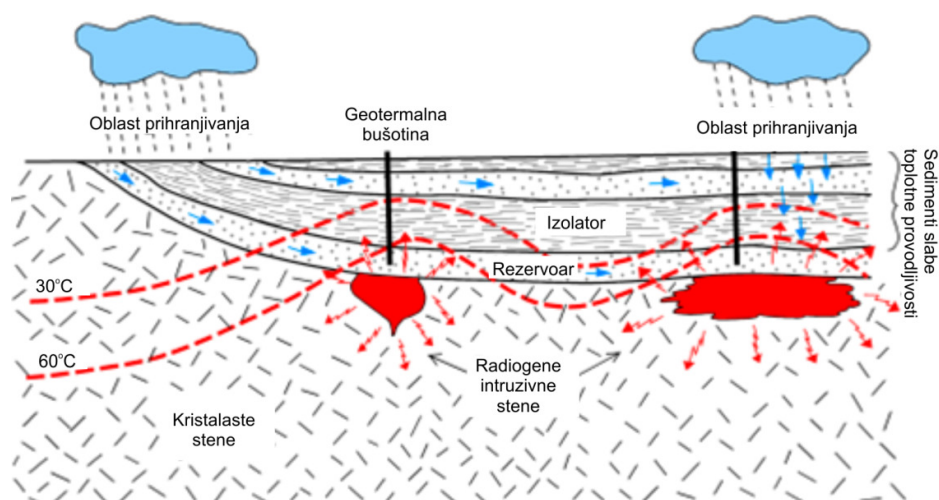
Vrednosti ^{226}Ra su od 0,21 (Partizanska česma u Bujanovačkoj Banji) do 0,48 (Yu-1 u Bujanovačkoj Banji; RB-5 u Ribarskoj Banji).

U vodama sa višom koncentracijom ^{226}Ra u vodi, može se očekivati i viša temperatura, što je značajno za geotermalnu potencijalnost područja. Radioaktivni elementi u vodi su vezani za stenske mase koje su nosioci uranovih orudnjenja, odnosno za tercijarne magmatite

(Vukićević, 1996). U domaćim pravilnicima sadržaj radona nije razmatran, ali prema US Environmental Protection Agency (EPA, 1999), gornja granica ^{222}Rn u vodama za piće je 11,1 Bq/l, što ukazuje da analizirane vode nisu za piće. Jedino je u vodi iz bušotine Yu-1 niži sadržaj ^{222}Rn od graničnog, što je veoma bitno jer se ova voda flašira. Na žalost, ove analize nisu rađene za Prolom vodu koja se takođe flašira.

5.5. Proračun radiogene toplote stenskih masa

Raspadanjem radioaktivnih elemenata U, Th i K, dolazi do emanacije toplote i zagrevanje podzemnih voda (slika 48). Ispitivanjem sadržaja U, Th i K u stenama (Vinogradov, 1962) utvrđeno je da najviši sadržaj ovih elemenata imaju magmatske stene, najviše kisele magmatske stene (graniti, rioliti), potom intermedijarne stene, bazične pa ultrabazične. Od kiselih magmatskih stena graniti imaju najvišu vrednost radiogene toplote, pa je očekivano što su jedan od glavnih uzročnika povišene temperature podzemnih voda.



Slika 48. Radiogeni geotermalni sistem (Anderson and Lund, 1979; izmenjeno)

Radiometrijske analize su rađena od strane Geoinstituta u okviru projekta Ministarstva nauke i tehnologije Republike Srbije “Geološka i tehnološka izučavanja nuklearnih sirovina u Republici Srbiji” krajem sedamdesetih i početkom osamdesetih godina dvadesetog veka. Zahvaljujući V. Omaljevu koji je publikovao rezultate sadržaja U, Th i K omogućen je proračun radiogene toplote magmatskih stena na području Leca, Jastrepa i Surdulice. Radiometrijske analize na području Leca rađene su na 80 geohemijskih proba (Omaljev, 1997), na području Jastrepa na 36 proba (Omaljev, 1996a), na području Surdulice na 113 geohemijskih proba (Omaljev, 1994; Omaljev, 1995; Omaljev, 1996b). Sadržaj U, Th i K određen je i na jezgru bušotine VG-3 u Vranjskoj Banji (Milojević, 1991, fond. dok.). Gustina stena (ρ) je preuzeta iz Studije potencijalnost teritorije SR Srbije van teritorija SAP

(Milivojević i Perić, 1990, fond.dok.). U tabeli 21. date su vrednosti U, Th i U kao i proračunata radiogena toplota (A) po formuli Rybach-a (1986).

Tabela 21. Sadržaji U, Th i K u parcijalnim statističkim uzorcima stena Leca, Jastrebca i Surdulice i proračunata vrednost radiogene toplote.

U, Th, K Leca (Omaljev, 1997); U, Th, K Jastrebca (Omaljev, 1996a); U, Th i K Surdulice i Besne Kobile (Omaljev, 1994; Omaljev, 1995; Omaljev, 1996b); U, Th i K bušotini VG-3 (Milojević, 1991, fond. dok.); gustina stena (Milivojević i Perić, 1990, fond.dok.).

	Stena	N	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	gustina stena ρ (kg/m ³)	radiogena toplota A (μ W/m ³)
Lece	Nealterisani dacit	6	3,67	14,22	1,75	2606	2,02
	Alterisani dacit	1	3,7	10,80	1,62	2606	1,79
	Dacit	7	3,67	13,73	1,73	2606	1,98
	Nealterisani dacito-andezit	1	3,10	14,50	1,85	2640	1,93
	Nealterisani andezit	32	3,77	13,86	2,07	2640	2,07
	Alterisani andezit	3	3,60	12,63	1,51	2640	1,90
	Andezit	36	3,76	13,75	2,02	2640	2,06
	Nealterisani vulkanit	35	3,03	13,07	2,81	2623	1,89
	Alterisani vulkanit	2	3,83	15,98	0,2	2623	2,05
	Vulkaniti	37	3,07	13,23	2,67	2623	1,90
	Nealterisani vulkaniti	74	3,40	13,52	2,39	2623	1,98
	Alterisani vulkaniti	6	3,69	13,44	1,09	2623	1,92
	Vulkaniti leckog masiva	80	3,42	13,52	2,29	2623	1,97
Jastrebac	Granitoid	36	4,9	12,42	1,55	2728	2,28
Surdulica	Granitoid	21	6,59	16,68	2,86	2764	3,19
	Kvarclatit	35	7,15	22,33	3,65	2582	3,56
	Dacit	36	5,4	17,78	2,98	2606	2,80
	Vulkanit (daciti, kvarclatiti)	71	6,27	20,02	3,31	2594	3,18
	Vulkanit	21	5,7	21,22	3,28	2594	3,11
Besna kobilica	Graniti	12	6,68	19,38	2,99	2640	3,26
	Granodioriti	50	6,7	17,95	3,00	2728	3,28
	Granitoid	62	7,09	18,23	3,00	2764	3,44
	Kvarclatiti	19	8,38	19,09	3,19	2582	3,61
	Daciti	9	6,68	17,00	3,13	2606	3,08
	Vulkaniti	28	7,83	18,42	3,17	2594	3,44
bušotina VG-3 u Vranjskoj Banji	Gnajs	4	2,85	6,72	1,67	2800	1,44
	Biotitski gnajsganit	1	3,85	10,07	9,67	2750	2,64
	Zeleni škriljci	2	2,25	2,42	1,79	2640	0,89
	Breča	1	1,36	4,74	9,48	2430	1,41

U vulkanitima Leca srednji sadržaj urana (3,42 ppm) je visok i nalazi se na nivou klarka¹ urana (3,5 ppm) za kisele magmatske stene, a viši je od klarka urana (1,8 ppm) za intermedijarne magmatske stene (po Vinogradovu, 1962), što ukazuje da su lecki vulkaniti obogaćeni uranom. Srednji sadržaj torijuma (13,52 ppm) je viši od klarka Th za intermedijarne magmatske stene (7 ppm), a niži od klarka za kisele magmatske stene (18 ppm) (po Vinogradovu, 1962). Andeziti leckog masiva su uglavnom obogaćeni torijumom (Omaljev, 1997). Srednji sadržaj kalijuma (2,29%) je u nivou klarka za intermedijarne magmatske stene (2,3%). Vrednosti radiogene toplote u varijetetima vulkanita leckog masiva su približno iste, pri čemu najvišu radiogenu toplotu imaju nealterisani andezit, andezit i alterisani vulkanit (tabela 21).

Dobijene vrednosti radiogene toplote u vulkanitima Leca su veoma male u odnosu na radiogenu toplotu vulkanita Surdulice, naročito vulkanita na Besnoj Kobili. Po sadržaju torijuma u Srbiji, Antonović (2002) ističe da su koncentracije iznad 19 ppm anomalne, što je zabeleženo u vulkanitima Surdulice. Od svih analiziranih stena, najviše vrednosti radiogene toplote imaju kvarclatiti u okviru surduličkog granodiorita. Ove stene utiskute u drugoj fazi magmatizma, nakon utiskivanja granodiorita, ukazuju da su mlađi izlivi izazvali povišen temperaturni režim na širem području.

U tercijarnim andezitima Srbije vrednost radiogene toplote je $1,53 \mu\text{W}/\text{m}^3$, dok je u tercijarnim dacitima radiogena toplota $2,98 \mu\text{W}/\text{m}^3$ (Milivojević i Perić, 1990, fond.dok.). U andezitima ostrva Lipari u Tirenskom moru radiogena toplota je $1,69 \mu\text{W}/\text{m}^3$ (Pasquale et al, 1997), dok je radiogena toplota andezita u severoistočnom nemačkom basenu od 0,9 do $1,9 \mu\text{W}/\text{m}^3$ (Norden and Forster, 2006). Po Pollack-u (1982) prosečna radiogena toplota dacita je $1,5 \mu\text{W}/\text{m}^3$, a andezita $1,1 \mu\text{W}/\text{m}^3$. Na osnovu pomenutih vrednosti zaključuje se da je radiogena toplota leckih vulkanita ($1,97 \mu\text{W}/\text{m}^3$), andezita ($2,06 \mu\text{W}/\text{m}^3$), naročito surduličkih vulkanita ($3,18 \mu\text{W}/\text{m}^3$) značajno viša od prosečne radiogene toplote određene za ove stene, kao i od radiogene toplote određene u vulkanitima Evrope.

Prosečna vrednost Th u granitima je 20 ppm, a U 4,7 ppm (Clark et al, 1966), što ukazuje da je granitoid Surdulice obogaćen U, a osiromašen Th. U odnosu na ove vrednosti granitoid Jastrepca ima prosečan sadržaj U, dok je osiromašen Th.

¹ Klark-srednji sadržaj određenog hemijskog elementa u geohemijskom sistemu (Fersman, 1953)

Ako je sadržaj $U > 10$ ppm granit se klasifikuje u “tope” i ako je još prekriven stenama sa funkcijom termalnog izolatora, visoku temperaturu može da zadrži godinama i bude odličan izvor geotermalne energije (Grahame, 2009). Navedena vrednost nije zabeležena u granitoidnima Srpskog kristalastog jezgra, ali je sadržaj urana povišen u Surduličkom granitoidu (6-7 ppm). Interesantno je da granitoidi i vulkaniti Surdulice imaju jednake vrednosti radiogene toplote.

Osim uranom, granodiorit Surdulice je bogatiji i Th i K u odnosu na jastrebački granitoid, što rezultira i višom radiogenom toplotom. Poređenja radi, prosečna radiogena toplota granita je $2,5 \mu\text{W}/\text{m}^3$, granodiorita $1,1 \mu\text{W}/\text{m}^3$ (Pollack, 1982), u Irskoj je određena radiogena toplota granita Drogheda i granita Kentstown od 2,5 do $4,5 \mu\text{W}/\text{m}^3$ (Fritschle et al, 2012), dok je vrednost radiogene toplote paleogenog granita Mourne od 4 do $7 \mu\text{W}/\text{m}^3$ (Muller et al, 2012). Granit Big Tob u Australiji poseduje toplotu od $3,03 \mu\text{W}/\text{m}^3$ (McLaren, et al 1999). U odnosu na navedene vrednosti granita, surdulički granodiorit ima prosečnu do povišenu vrednost ($3,19 \mu\text{W}/\text{m}^3$), odnosno visoku vrednost za granodiorit, dok jastrebački granitoid ($2,28 \mu\text{W}/\text{m}^3$) ima prosečnu ili čak ispod proseka vrednost radiogene toplote, bitnu sa aspekta geotermalne energije.

Granitoidne stene i vulkaniti Surdulice imaju daleko više vrednosti radiogene toplote od vrednosti izračunatih u stenama bušotine VG-3 u Vranjskoj Banji. U bušotini VG-3 (tabela 21) najniže vrednosti radiogene toplote imaju zeleni škriljci, dok najveće vrednosti imaju biotitski gnajsgnani, a potom gnajsevi bliži površini terena.

U skladu sa vrednostima radiogene toplote najviše temperature su registrovane u Vranjskoj Banji koja je u vezi sa surduličkim stenama, zatim u Ribarskoj Banji (jastrebački granitoid), a najniže u Prolom Banji (lečki vulkaniti).

5.6. Geotermalna potencijalnost Srpskog kristalastog jezgra

Geotermalni potencijal se definiše kao ukupna količina geotermalne energije akumulirane u stenama i geotermalnim fluidima ispod određene površine do date dubine (10 km) u Zemljinoj kori, a u odnosu na lokalne temperature na granici sezonskih promena temperature (Muffler and Cataldi, 1978; Milivojević i Perić, 1990, fond. dok.; Petrović, 2010, fond. dok.).

Geotermalna potencijalnost zavisi od (Milivojević i Perić, 1990, fond. dok.): debljine i sastava zemljine kore, debljine litosfere, starosti tektonske aktivnosti, starosti i vrste magmatskih procesa, neotektonskih kretanja, radiogene toplote, seizmičnosti, kao i od hidrogeoloških karakteristika terena.

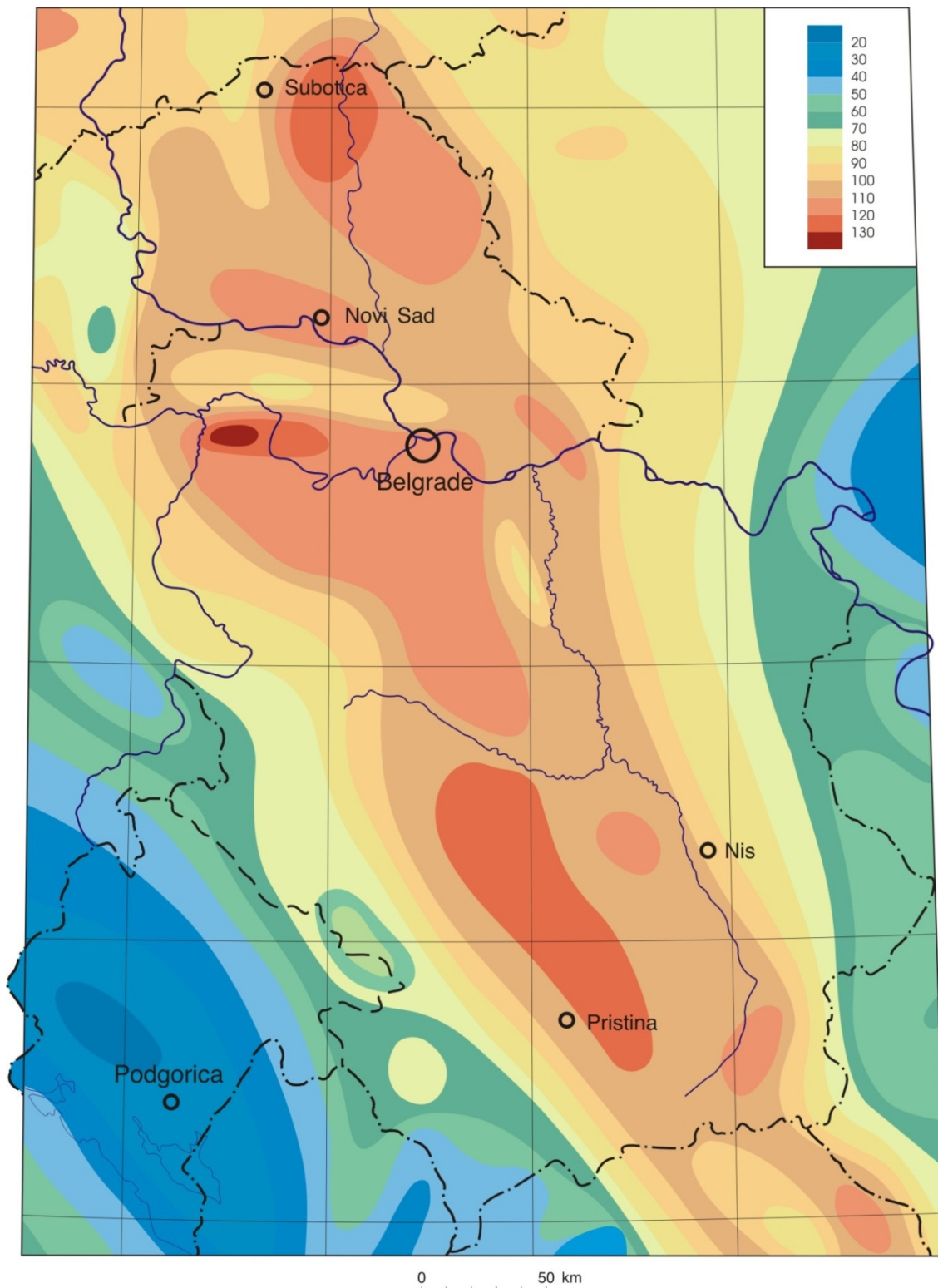
Potencijal se izražava kroz gustinu toplotnog toka, koji je predstavljen kao proizvod geotermnog gradijenta (G) i toplotne provodljivosti stena (λ).

Ova dva parametra (G , λ) su prilično problematična za određivanje u postojećim bušotinama iz više razloga. Da bi se odredio geotermalni gradijent potrebno je raspolagati sa bušotinom dovoljne dubine (Milivojević i Perić, 1990, fond. dok.), uglavnom dubljom od 1000 m. Na celom području istraživanja samo četiri bušotine su dublje od 1000 m (RB-5 u Ribarskoj Banji, VG-2 i VG-3 u Vranjskoj Banji i B-4 u Sijarinskoj Banji). Za određivanje gradijenta, potrebno je raspolagati podacima karotažnih merenja, odnosno temperaturnih logova, koji su dostupni za veoma mali broj bušotina. Podaci temperaturnih karotažnih merenja dostupni su za bušotinu B-3 u Prolom Banji, RB-5 u Ribarskoj Banji, B-4 u Sijarinskoj Banji i za bušotine B-2, Yu-1 i Yu-2 u Vranjskoj Banji, za koje su proračunati geotermalni gradijenti i gustina toplotnog toka (tabela 22).

Toplotna provodljivost stena određena je krajem osamdesetih za potrebe Studije geotermalne potencijalnosti SR Srbije (Milivojević i Perić, 1990, fond. dok.). Metode određivanja opisane su u poglavlju 3.6.

Tabela 22. Proračun geotermalnog gradijenta i gustine toplotnog toka u bušotinama Srpskog kristalastog jezgra

Lokalitet	Bušotina	Podaci karotažnih merenja			Temperatura tla t_{sr} (°C)	Toplotna provodljivost λ (W/mK)	Geotermalni gradijent G (°C/m)	Gustina toplotnog toka q (mW/m ²)
		Temperatura t_b (°C)	Dubina H (m)	Izvor podataka				
Prolom Banja	B-3	29	95	Protić, 1982, fond.dok.	14	2,17, andeziti	0,178	388,3
Ribarska Banja	RB-5	74	1178	Milovanović, 2001, fond.dok.	14	3,21, škriljci	0,051	163,5
Sijarinska Banja	B-4	74,8	1200	Stanković i Zlokolica, 1993, fond.dok.	14	2,69, gnajs	0,050	136,3
	A-2	56	100		14	2,17, andeziti	0,42	911,4
Vranjska Banja	B-2		44	Zlokolica i saradnici, 1994, fond.dok; Martinović i Magazinović, 2010	14	3,21, škriljci	0,174	558,5
	VG-3	124	1545		14	2,69, gnajs	0,071	191,5



Slika 49. Gustina toplotnog toka Srbije u mW/m^2 (Milivojević i saradnici, 1992; Martinović i Milivojević, 2010)

Prosečna vrednost geotermalnog gradijenta u svetu 0,025 do 0,03 °C/m (Dickson and Fanelli, 2004). Prosečna vrednost gustine toplotnog toka Zemlje je 91,6 mW/m², na kontinentima 70,9 mW/m² i na okeanima 105,4 mW/m² (Davis and Davis, 2010). U okviru tercijarnih vulkanskih oblasti, gustina toplotnog toka iznosi 92 mW/m² (Polyak and Smirnov, 1975). Za područje Srbije izrađena je karta gustine toplotnog toka (Milivojević i saradnici, 1992, slika 43), sa vrednostima preko 100 mW/m² na području Panonskog basena, Srpskog kristalastog jezgra, u graničnoj zoni Dinarida i Srpskog kristalastog jezgra i na području neogenih magmatskih aktivnosti (Martinović i Milivojević, 2010).

Na području Srpskog kristalastog jezgra, najviše vrednosti geotermalnog gradijenta, pa i gustine toplotnog toka zabeležene su u bušotinama gde je karotaž određen ispod 1000 m (B-3, Prolom Banja, A-2 Sijarinska Banja i Yu-2 Vranjska Banja), pa ovi rezultati nisu reprezentativni za određivanje geotermalnog potencijala područja.

Za tri reprezentativne bušotine (RB-5 u Ribarskoj Banji, B-4 u Sijarinskoj Banji i VG-3 u Vranjskoj Banji), računski je određen geotermalni gradijent je od 0,05 do 0,07 °C/m, dok je gustina toplotnog toka od 136,3 mW/m² do 191,5 mW/m².

Najveći geotermalni potencijal ima Vranjska Banja, gde je gustina toplotnog toka 191,5 mW/m². Visoka vrednost geotermalnog toplotnog toka zabeležena je i u Ribarskoj Banji (163,5 mW/m²), dok su niže vrednosti određene u Sijarinskoj Banji (136,3 mW/m²).

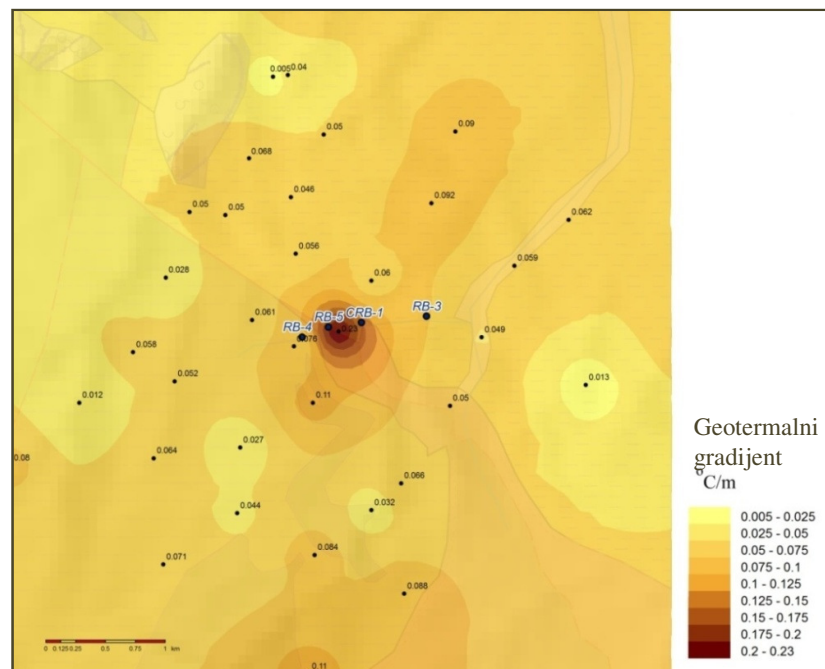
Na području Ribarske Banje geotermalna istraživanja vršena su 1978. (Milovanović, 1978, fond. dok.), pa je su za ovo područje prikazani rezultati tih istraživanja. Istraživanja su obuhvatila izradu 36 bušotina (20 do 100m) iz kojih su određene toplotno-fizičke osobine stena (Perović i saradnici, 1978), a potom i određivanje geotermalnog gradijenta i gustine toplotnog toka.

Na osnovu vrednosti geotermalnih gradijenata urađena je interpolacija metodom IDW² za područje Ribarske Banje (slika 50). Na datoj karti uočava se da je najperspektivnije područje centralnog dela banje na kojoj danas postoje i duboke bušotine.

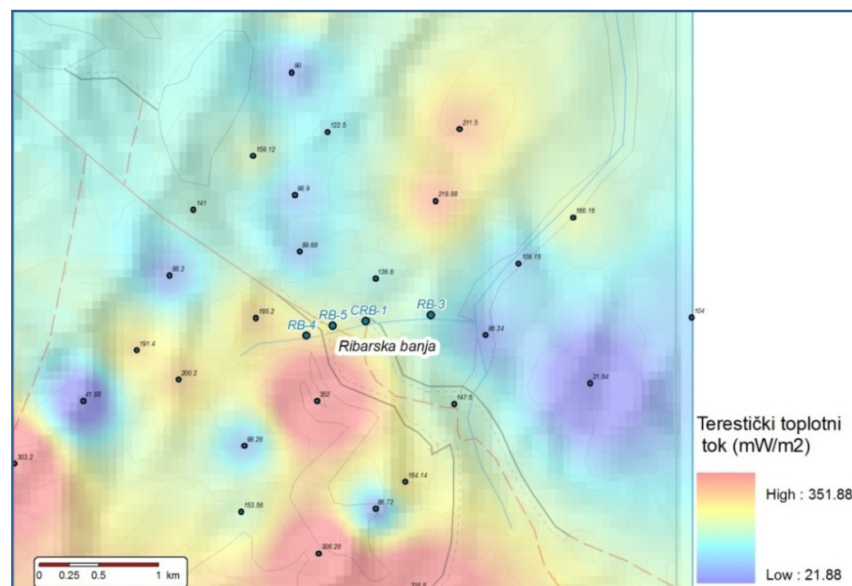
Na karti gustine toplotnog toka na širem području Ribarske Banje (slika 51) uočava se da su najviše vrednosti toplotnog toka zabeležene južno od banje. Dobijena vrednost gustine

² IDW- Inverse Distance Weighting, tip determinističke metode za multivarijantnu interpolaciju sa poznatim, rasutim tačkama

toplalnog toka u bušotini RB-5 od $163,5 \text{ mW/m}^2$ odgovara i gustini toplalnog toka na području banje, određenom interpolacijom bušotina do 100 m.

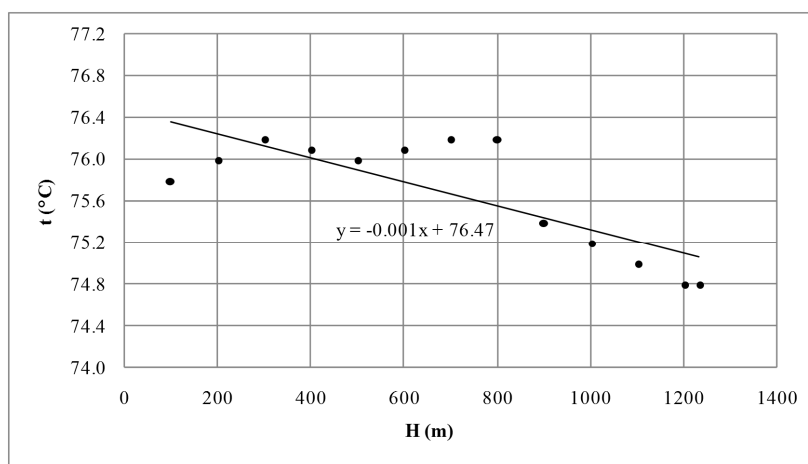


Slika 50. Interpolovana karta geotermalnih gradijenata metodom Inverse Distance Weighting (IDW) (prema podacima Milovanović, 1978, fond. dok.)



Slika 51. Interpolovana karta gustine toplalnog toka metodom Inverse Distance Weighting (IDW) (prema podacima Milovanović, 1978, fond. dok.)

Iako je prema metodi Bullara (1939), određen geotermalni gradijen za bušotinu B-4 u Sijarinskoj Banji od 0,05 °C/m, na osnovu loga temperaturnog karotaža, uočeno je da je u celoj bušotini izmerena temperatura od 76,3°C na ustima bušotine do 74,8 °C na dnu bušotine (slika 52). U bušotini B-4 sa porastom dubine dolazi do manjeg opadanja temperature. Isto je uočeno i u bušotini A-2 (100 m), gde je na termokarotažom na dubini 0-10 m registrovana temperatura od 60,5 - 62,0°C, na 15-37 m 65°C dok je na 100 m registrovano 56°C (Stanković i Zlokolica, 1993, fond. dok.). Očigledno da su rasedne i pukotinske zone dovodnici hidrotermalnih fluida, ujedno i najviši nosioci temperatura. Ovakav slučaj pada temperature sa porastom dubine predstavlja geotermalnu anomaliju, tako da se može zaključiti da se područje Sijarinske Banje nalazi se na anomalnom geotermalnom polju.



Slika 52. Dijagram promene temperature sa porastom dubine, bušotina B-4 u Sijarinskoj Banji (prema podacima: Obrenović, 1990, fond. dok.)

5.7. Procena dubine cirkulacije termalnih voda

Dubinu cirkulacije termalnih voda moguće je odrediti na osnovu temperature na kojoj podzemna voda cirkuliše (određenu geotermometrima) i geotermalnog gradijenta određenog za datu oblast (Allen et al, 2006). Ovaj parametar je veoma važan, naročito za izradu geotermalnog modela i bolje razumevanje geotermalnog sistema, pa je bitno imati što pouzdanije podatke o geotermalnom gradijentu područja istraživanja i pravilno odabrati geotermometar za ocenu temperature geotermalnog rezervoara.

Generalno, za bušotine i izvore za koje ne podaci o termokarotaznim merenjima, usvaja se prosečan geotermalno gradijent od 30°C/km (Mazor, 2004). Na području Srpskog kristalastog jezgra geotermalni gradijent je određen za tri bušotine i iznosi od 50°C/km (Ribarska Banja RB-5, Sijarinska Banja B-4) do 70°C/km (Vranjska Banja VG-3). Vrednost geotermalnog gradijenta od 50°C/km prihvaćena je za sve izvore i bušotine na području istraživanja, izuzev u bušotinama u Vranjskoj Banji, gde je definisan gradijent od 70°C/km (tabela 23).

U Ribarskoj Banji određena je vrednost geotermalnog gradijenta od 51°C/km u bušotini RB-5. Temperatura dobijena na osnovu kvarcnog geotermometra od 95,3°C može se očekivati na 1,87 km (tabela 23). Bušotina RB-5 urađena je do 1543 m, sa maksimalno registrovanom temperaturom od oko 80°C, pa je dubina cirkulacije termalnih voda od 1,87 km prilično realna. Dubina cirkulacije termalnih voda na području Ribarske Banje je od 1,8 do 1,9 km.

Dubina cirkulacije termalnih voda u Sijarinskoj Banji je 2,3 km (tabela 23). Bušotina B-4 urađena je do navedene dubine, pri čemu je poslednji zahvaćeni vodonosni interval od 1085 do 1095 m. Termokarotazna merenja u bušotini nisu utvrdila temperaturu od 115°C, već je registrovan anomalni geotermalni gradijent (poglavlje 5.6), tako da ovaj podatak nije prihvatljiv.

U Vranjskoj Banji geotermalni gradijent u bušotini VG-3 iznosi 71°C/km, dok je temperatura određena kvarcnim geotermometrom 142,6°C. Za date vrednosti, dubina cirkulacije podzemnih voda je oko 2 km, što je prihvatljivo. Dubina cirkulacije termalnih voda Vranjske Banje je od 1,7 do 2,1 km.

U Prolom Banji temperature vode od oko 50°C mogu se očekivati na dubini od 1 km.

U Bujanovačkoj Banji cirkulacija termalnih voda temperature od 107 do 130°C je na dubini od 2,1 km do 2,6 km.

Proračunate temperature i dubine, potvrđuju da je reč o dubokim strukturama. Količine voda na datim dubinama, datih temperatura nije moguće računski odrediti. Sa aspekta korišćenja voda, u terenima sa dominacijom kristalastih stena, na većim dubinama uglavnom se ne očekuju veće količine podzemnih voda.

Tabela 23. Procena dubine cirkulacije termalnih voda

Lokalitet	Bušotina	Geotermalni gradijent (°C/km)	Temperatura (°C) (geotermometar)	Dubina cirkulacije termalnih voda (km)
Ribarska Banja	RB-5	51	95,3	1,87
Sijarinska Banja	B-4	50	115,7	2,3 (?)
Vranjska Banja	VG-3	71	142,6	2,0
Prolom Banja	B4	50	54,2	1,08
Prolom Banja	B5	50	47,8	0,96
Ribarska Banja	RB-4	50	95,5	1,91
Ribarska Banja	CRB-1	50	90,1	1,80
Sijarinska Banja	Aragon	50	115,7	2,31
Sijarinska Banja	Inhalator	50	116	2,32
Sijarinska Banja	Gejzer	50	115	2,30
Tulare	T-1	50	103,9	2,08
Viča	V-1	50	77,7	1,55
Vranjska Banja	St. kaptaza	70	146,1	2,09
Vranjska Banja	B-1	70	120,1	1,72
Vranjska Banja	VG-2	70	144,1	2,06
Vranjska Banja	VG-3	70	142,6	2,04
Bujanovačka Banja	A-2	50	123,8	2,48
Bujanovačka Banja	A-3	50	106,9	2,14
Bujanovačka Banja	Yu-1	50	118,2	2,36
Bujanovačka Banja	Yu-2	50	130,6	2,61

5.8. Korišćenje hidrogeotermalnih resursa Srpskog kristalastog jezgra

Tehnologija korišćenja hidrogeotermalnih resursa je dobro osvojena i lako primenljiva. Na osnovu dosadašnjih iskustava, geotermalni sistemi pružaju veliku sigurnost i pouzdanost pri korišćenju. Moguće je višestepeno korišćenje hidrogeotermalnih resursa, tj. potpuno iskorišćenje temperature vode za različite svrhe. Korišćenjem geotermalne energije omogućava se bolja energetska efikasnost, smanjuje se zavisnost od uvoznih energenata, isplativo je, samim tim što je voda jeftiniji resurs od bilo kog fosilnog goriva. Negativne strane korišćenja geotermalne energije su: problemi deponovanja termalnih “otpadnih” voda, odnosno termalnih voda po iskorišćenju; velika početna investiciona ulaganja, kao i problem transporta na veća rastojanja. Deponovanje termalnih voda može se rešiti izradom reinjektivnih bušotina, čime bi se voda ponovo vraćala u rezervoar.

Na području Srpskog kristalastog jezgra korišćenje se uglavnom svodi na balneoterapiju i zagrevanje banjaskih objekata. Vode Prolom Banje pokazale su se delotvorne za bolesti bubrega i mokraćnih puteva, bolesti organa za varenje, bolesti kože, bolesti perifernih krvnih sudova, vanzglobni reumatizam (www.prolomvoda.com). Termalne vode Ribarska Banje koriste se u balneoterapiji kao pomoćno lekovito sredstvo za bolesti lokomotornog aparata: reumatizam, koštano-zglobnih povreda, preloma kostiju i hirurških intervencija na koštano-zglobnom sistemu (ribarskabanja.org). Indikacije termalne vode Sijarinske Banje su bolesti lokomotornog aparata, bolesti gastrointestinalnog trakta, bubrega i mokraćnih puteva, ginekološka oboljenja, bolesti respiratornog trakta, neurološka oboljenja (Protić, 1995). Slične su indikacije termalnih voda Vranjske Banje (lokomotorni aparat, neurološka i ginekološka oboljenja i kožne bolesti) i Bujanovačke Banje (reumatske bolesti, stanje posle povreda, hronična oboljenja probavnog trakta, kardiovaskularnih bolesti, neurološka i ginekološka oboljenja i kožne bolesti) (Protić, 1995). Pored lekovitih voda Bujanovačke Banje, u okviru Specijalne bolnice za rehabilitaciju “Vrelo” koriste se i lekovita blata peloidi.

Vode Prolom Banje koriste se i za vodosnabdevanje naselja i flaširanje pod nazivom Prolom voda. Voda iz bušotine B-5 u Pupavcu se flašira, s tim što se za flaširanje koristi 1,7 l/s podzemne vode, što je 40% od utvrđenih rezervi ove bušotine (4,3 l/s; Milanović, 2009, fond.dok.gov.rs). Kad se uračunaju i potrebe procesa proizvodnje, zaključuje se da se koristi ukupno oko 3-3,5 l/s, a preostale količine (0,7-1,0 l/s) se prosleđuju u banjaski rezervoar

(Milanović, 2009, fond. dok.). Iz banjskog rezervoara deo voda se koristi u balneologiji, a ostatak se koristi za vodosnabdevanje banje i grejanje hotela Radan i rehabilitacionog centra pomoću toplotnih pumpi. Kapacitet hidrogeotermalnih resursa za balneološke potrebe iznosi oko 0,17 MWt, čime se ostvaruje korišćenje od 1,38 TJ/god (tabela 25).

Toplotne pumpe, snage 6 MWt, proizvode 40 TJ/godišnje toplote (Martinović and Milivojević, 2010). Na osnovu Lindalovog dijagrama (slika 53), zasnovanog na korišćenju voda u zavisnosti od temperature, vode Prolom Banje osim korišćenja u balneoterapiji, za punjenje bazena i instalisanih toplotnih pumpi, mogu da se koriste za zagrevanje ribnjaka i zemljišta.

U *Ribarskoj Banji* u upotrebi su četiri bušotine, tako da se CRB-1 koristi za punjenje balneoterapeutskih bazena koji se koriste u terapiji, RB-4 i RB-3 za punjenje bazena u okviru novog SPA kompleksa, dok se termalna voda iz bušotine RB-5 koristi za toplifikaciju objekata i kao sanitarna voda.

Voda iz bušotine CRB-1 koristi se za potrebe punjenja dva bazena u hidroterapiji sa 400 m³/dan, 6-7h dnevno punim kapacitetom samoizliva, a potom se zatvara (Milovanović, 2001, fond. dok.). Temperatura u bazenima je oko 35-36°C. Voda iz bušotine RB-5 koristi se kao potrošna topla voda u banjskim objektima i delimično za punjenje bazena, uz prethodno obaranje temperature sa 54 do 40°C. Energija termalne vode koristi se za grejanje banjskih objekata, tako da se u toku grejne sezone (200 dana po 16h) bušotina RB-5 eksploatiše punim kapacitetom samoizliva, dok se u toku letnje sezone eksploatiše sa maksimalnim satnim opterećenjem do 60% kapaciteta za potrošnu toplu vodu, a prosečno oko 25-30% dnevnog kapaciteta izvora (Milovanović, 2001, fond. dok.).

Iskorišćena voda se ispušta u kanalizacioni sistem i glavnom kanalizacionom cevi se odvodi oko 500 m do izliva u Ribarsku reku.

Ukupna količina toplote u Ribarskoj Banji iznosi 31,42 TJ/god, toplotna snaga 1,65 MWt pri faktoru iskorišćenja od 0,58 (tabela 25). Ova količina toplote zamenjuje 750,45 tona ekvivalentne nafte, odnosno 1072 tone ekvivalentnog uglja (tabela 24).

Temperatura vode do 54°C, prema Lindalovom dijagramu (slika 53) može se koristiti za ribnjake, zagrevanje zemljišta, za topljenje snega, za pripremu stočne hrane, proizvodnju alkohola, za staklenike, proizvodnju hrane, proizvodnju nameštaja, pranje vune i metala.

U *Sijarinskoj Banji* napravljen je projekat korišćenja voda iz bušotine B-4 ($Q=30$ l/s, $t=75^{\circ}\text{C}$, $\text{CO}_2=135$ l/s, $p=8$ bara; Zlokolica i Ilić, 1994, fond. dok.) za: hotel "Gejzer", novi hotelski kompleks, sportski centar i stanove, fabriku mineralne vode, fabriku tečnog CO_2 , za staklenike, pri čemu bi se za staklenike koristila voda iz Gejzera, Inhalatora i bunara A-2. Na žalost radovi nisu realizovani, tako da se u Sijarinskoj Banji termalna voda koristi samo za balneološke potrebe i za zagrevanje hotela Gejzer.

Za potrebe hotela "Gejzer" koristi se 5,5 l/s iz bušotine B-4, iako je dobijeno 33 l/s na samoizlivu (Milanović i saradnici, 2012). Za date vrednosti dobija se termalna snaga od 4,42 MWt, energija od 23,21 TJ/god pri stepenu iskorišćenosti od 0,17 (tabela 25). Izračunati stepen iskorišćenosti je veoma nizak, što ukazuje na daleko veće mogućnosti korišćenja vode iz bušotine B-4. Nakon iskorišćenja vode, to jeste njene temperature, voda se ispušta u Banjsku reku, pri temperaturi od 40°C. Ispuštanje voda visokih temperatura u površinske vodotoke ima negativan uticaj na postojeći biljni i životinjski svet.

Voda iz bušotine Gejzer koristi se za punjenje otvorenog bazena, napravljenog 2005. godine. Mineralna voda iz bušotine Aragon u količini od 2,97 l/s snabdeva blatna kupatila i kade u hotelu Gejzer. Oko bušotine Inhalator napravljena je kućica sa klupama, i voda se koristi samo za inhaliranje.

Na osnovu temperature (Lindal-ov dijagram, slika 53), vode temperatura do 78°C mogu da se koriste za:

- balneoterapiju;
- sanitarna voda;
- toplifikaciju (preko 40°C za topljenje snega, kalorifere, radijatore, zagrevanje vode, dok je za toplifikaciju toplotnim pumpama dovoljna i temperatura od 15°C);
- u agrikulturi (za pripremu stočne hrane, proizvodnju alkohola, proizvodnja hrane, staklene bašte), za zagrevanje zemljišta i uzgajanje ribe;
- u industriji (za proizvodnju nameštaja, pranje metalnih delova)

Termalne vode **Vranjske Banje** korišćene su u balneološke svrhe, kao sanitarna topla voda, za toplifikaciju banjско-turističkih objekata, pojedinih domaćinstava, ambulante, škole, živinarske farme, za staklenike gde su se uzgajale posebne vrste cveća, zatim u tehnologiji prerade pamuka kompanije Yumko (Zlokolica i saradnici, 1994, fond. dok.). Na taj način koristilo se oko 20% raspoloživih količina voda. Visoka temperatura voda, preko 100°C i količine voda od ukupno 100 l/s (Zlokolica i saradnici, 1994, fond. dok.) predstavljaju potencijal za proizvodnju električne energije. Postojao je plan da se deo grada Vranja greje na geotermalnu energiju Vranjske Banje, ali iako je naselje izgrađeno, takav vid grejanja nije zaživeo.

Studija geotermalnog topliosnabdevanja grada Vranja i Vranjske Banje (Rooss-Proekt, 1993, fond. dok.) rađena je na osnovu procene korišćenja 100 l/s termalne vode, temperature od 87-100°C iz postojećih objekata. Za zagrevanje banjских i hotelskih objekata i za balneoterapiju koristi se deo voda iz dubokih bušotina VG-2 i VG-3, dok se za zagrevanje objekata u naselju koristi deo voda preko zbirne šahte. Na osnovu raspoloživih podataka o količinama vode i temperaturama vode, toplotni potencijal termalnih voda Vranjske Banje iznosi 18,97 MWt, sa mogućnostima višestepenog iskorišćavanja toplote ovih voda. Usled različitih izlaznih temperatura toplotni potencijal Vranjske Banje je procenjen na 28,2 MWt (Zlokolica i saradnici, 1994, fond. dok.), odnosno na 15,39 MWt (Martinović and Milivojević, 2010).

Prema pomenutoj studiji (Rooss-Proekt, 1993, fond. dok.) korišćenjem termalnih voda omogućilo bi se zamena oko 15000 t mazuta godišnje za zagrevanje naselja i tehnologiju kod četiri potrošača u Vranju i oko $1,7 \times 10^6$ m³ vode za tehnološke potrebe fabrika Yumko i Simpo, što predstavlja oko 20-25% ukupne proizvodnje vode za vodosnabdevanje grada Vranja.

Procenom *mogućnosti korišćenja termalnih voda u Vranjskoj Banji* (Petrović i Ilić, 2005) u sadašnjem i budućem vremenu, pri korišćenju 54772 MWh/sezoni (tabela 24) ostvarila bi se ušteda mazuta od oko 5600 tona.

Tabela 24. Mogućnost korišćenja termalnih voda u Vranjskoj Banji (Petrović i Ilić, 2005)

Svrha upotrebe	Toplotni konzum (MW)	Veza sa distributivnom mrežom	Temperature termalne vode		Sezonska toplotna energija (MWh)	Ušteda mazuta po sezoni (kg)
			ulaz (°C)	izlaz (°C)		
Stambeni i poslovni objekti – zagrevanje i priprema sanitarne tople vode	10,3	indirektna	92	65,4	12925,03	1368530
Hoteli, stacionar, vile	4,0	indirektna	92	65,4	6776,23	717480
Grejanje staklenika i plastenika	12,3	direktna	65	36,0	23152,11	2452400
Zagrevanje proizvodnih hala, živinarska farma, proizvodnja mleka i sira	2,73	direktna	65	36,0	3425,76	362730
Akvakultura	3,23	indirektna	36	30,0	4869,85	515630
Proizvodnja el.en	5,92	indirektna	120 (105)	90,0	3623,04	191810
UKUPNO	35,13				54772,02	5607580 (5607580 m ³)

Prilikom potrošnje mazuta, emituju se znatne količine CO₂ u atmosferu. Grad Vranje u zimskoj sezoni za grejanje industrijskih objekata i stambenog naselja Novi dom (22000 m² poslovnog i 56000 m² stambenog prostora) potroši 1300 t mazuta (podaci iz 2010. godine). To je ista količina mazuta koja se koristi za stambene i poslovne objekte, kao i pripremu sanitarne vode u Vranjskoj Banji. Sagorevanjem 1300 t mazuta oslobađa se 4035 t CO₂ i dobija 15,08 GWh za 100 % efikasnost. Efikasnost sistema grejanja na mazut je max 35%, pa je dobijena korisna energija za grejanje Vranja 5,27 GWh, sa oslobađanjem 4035 t CO₂ (Petrović, 2010, fond. dok.). Pri uštedi 5600 t mazuta (tabela 24) za 35% efikasnost sistema, sprečilo bi se emitovanje 22715 t CO₂ i dobila korisna energija od 64,9 GWt.

Navedeni proračuni nesumnjivo ukazuju na veliki potencijal termalnih voda Vranjske Banje koji se neracionalno koristi. Pored direktnog korišćenja geotermalne energije, Vranjska Banja ima najveći potencijal u Srbiji za izgradnju prve geotermalne elektrane. U tom cilju istraživanja su započeta 2010. godine, ali su stala 2012. godine Proizvodnja električne energije moguća je već pri temperaturama višim od 85°C, izgradnjom binarnih postrojenja.

Pri korišćenju 207 TJ/god energije (tabela 25), omogućila bi se ušteda 4944,6 tone ekvivalentne nafte, odnosno ušteda 4370 t CO₂ (tabela 26), što svakako ukazuje na malo iskorišćen potencijal hidrogeotermalnog reursa.

Bujanovačka Banja je poznata po brojnim flaširanim vodama. Trenutno se flašira voda Heba i Bivoda, a nekad su flaširane vode pod nazivom Kristal i Prohor. Vode se flaširaju kao prirodne mineralne i koriste se za proizvodnju bezalkoholnih osvežavajućih napitaka.

Đajić i saradnici (2007) uradili su Studija izvodljivosti sa idejnim rešenjem korišćenja geotermalne energije u Bujanovačkoj Banji, gde su navedene sledeće mogućnosti korišćenja:

- Za pripremu sanitarne tople vode, pri čemu je potrebno dogrevati vodu na više temperature 50-60°C uz korišćenje električnih bojlera. Uvođenjem vode temperature 40°C umesto 15°C u električne bojlere postiže se znatna ušteda električne energije. Godišnje uštede su procenjene na 264,55 MWh/god korišćenjem vode iz bušotine BH-7, odnosno na 275,13 MWh/god korišćenjem vode iz bušotine A-2.
- za grejanje uz korišćenje toplotnih pumpi. Korišćenjem termalne vode iz bušotine BH-7 bi se smanjila potrošnja mazuta od 34,5 t/god, što je 25% od godišnje potrošnje u Bujanovačkoj Banji. Bušotina A-2 bi se mogla koristiti samo u periodu kada postoji preliv bazena. U tom slučaju procenjena je ušteda mazuta na 35,64 t/god.
- za hlađenje objekata pomoću toplotne pumpe.

Pri korišćenju 6,5 l/s vode temperature 46°C, oborene na 30°C iz bušotine A-2 ostvaruje se korišćenje energije od 13,72 TJ/god (tabela 25).

* * *

Na osnovu dostupnih podataka za sve analizirane banje na području Srpskog kristalastog jezgra proračunato je direktno korišćenje geotermalne energije (tabela 25), s tim što je u Prolom Banji instalisana i toplotna pumpa.

Posmatrajući hipotetički, korišćenjem maksimalnih količina termalne vode od 186 l/s (Prolom Banja - B-3, B-4 i B-5; Ribarska Banja - CRB-1, RB-3, RB-4 i RB-5; Sijarinska Banja – Raj, Spas, Borovac, Glavni izvor, Gejzir, Inhalator, A-2, Jablanica, Aragon, B-4;

Vranjska Banja - Stara kaptaža, VG-2, VG-3, B-1, B-1b, A-1 i šahta 5; Bujanovačka Banja – A-2, A-3 A-4, A-5, Yu-1 i Yu-2), prosečne temperature 50°C, sa višestepenim obaranjem temperature na 15°C ostvarila bi se energija od 858 TJ/god. U odnosu na korišćenje 298,82 TJ/god energije, jasno je da velike količine termalnih voda ostaju neiskorišćene.

Tabela 25. Korišćenje geotermalne energije na području Srpskog kristalastog jezgra, sa stanjem tokom 2012. godine

Lokaliteti/ bušotine	Qmax (l/s)	Qpr. (l/s)	t _{ul} (°C)	t _{iz} (°C)	Kapacitet (MWt)	Korišćenje (TJ/god)	Stepen iskorišćenosti	Vrsta korišćenja
Prolom Banja (B-3, B-4 i B-5)	5,77	1,5	31	24	0,17	1,38	0,26	B
CRB-1	9,5	6,0	38,7	28	0,43	8,47	0,63	B
RB-5	9,2	5,8	54	31	0,89	17,60	0,63	B, G
RB-4	3,3	1,4	41,5	25	0,23	3,05	0,42	B, R
RB-3	5,5	3,5	26	21	0,12	2,31	0,64	B, R
Ribarska Banja					1,65	31,42	0,58	
Aragon	3	1,5	65	30	0,44	6,92	0,50	B
Gejzir	4	2,8	71	30	0,69	15,14	0,70	B, R
B-4	33	5,5	72	40	4,42	23,21	0,17	B, G
Sijarinska Banja					5,54	45,28	0,46	
Šahta 5	56	15	80	50	7,03	59,36	0,27	G,S,A,I
Stara kaptaža	2	1	80	30	0,25	3,96	0,50	B
B-1	1,4	0,5	83	30	0,31	3,5	0,36	B
A-1	3,5	1	93	30	0,92	8,31	0,29	B
VG-2	26,5	10	100	50	5,54	65,95	0,38	G, B
VG-3	23,5	10	100	50	4,92	65,95	0,43	G, B
Vranjska Banja					18,97	207,02	0,37	
Bujanovačka Banja, A-2	7,8	6,5	46	30	0,52	13,72	0,83	B
UKUPNO					26,86	298,86	0,5	

Legenda: B-balneologija; G-direktno zagrevanje objekata; R-rekreacija; I-industrija; S-staklenici i grejanje zemljišta; A-agrikultura.

Direktno korišćenje geotermalnih resursa Srpskog kristalastog jezgra od ~300 TJ/god, odnosno 83 GWh, može se energetske predstaviti i kao 7138,15 tona ekvivalentne nafte ili 10197,35 tona ekvivalentnog uglja. Korišćenjem ove količine geotermalne energije umesto mazuta, godišnje se sprečava emitovanje 6307,5 t CO₂ u vazduh, dok se korišćenjem iste količine geotermalne energije umesto uglja, spreči emitovanje 6530,5 t CO₂ (tabela 26). Ovo ukazuje na značajnu prednost korišćenja geotermalne energije umesto fosilnih goriva i sa aspekta zaštite životne sredine.

Tabela 26. Procene energetske efikasnosti i uštede CO₂ koje se ostvaruje korišćenjem geotermalne energije na području Srpskog kristalastog jezgra

Lokaliteti	Korišćenje (TJ/god)	Tona ekvivalentne nafte	Tona ekvivalentnog uglja	Ušteda CO ₂ umesto korišćenja mazuta (t)	Ušteda CO ₂ umesto korišćenja uglja (t)
Prolom Banja (t.p)*	40	955,38	1364,83	844,36	874,17
Prolom Banja	1,38	32,96	47,08	29,11	47,08
Ribarska Banja	31,42	750,45	1072,07	663,48	686,66
Sijarinska Banja	45,28	1081,50	1545,00	955,32	989,57
Vranjska Banja	207,02	4944,60	7063,70	4370,00	4524,31
Bujanovačka Banja	13,72	327,70	468,14	289,56	299,85
UKUPNO	298,86	7138,15	10195,99	6307,47	6530,54

* toplotne pumpe

Pored finansijskog faktora, bitni faktori koji utiču na iskorišćenje geotermalne energije su i: blizina naseljenog mesta, broj stanovnika, regulisano vlasništvo nad objektima i istražnim prostorom, razvijenost industrije, poljoprivrede, pristupni putevi i topografija terena.

Na osnovu navedenih rezultata najveći potencijal imaju vode Vranjske Banje. Ovo područje je geološki i hidrogeološki najviše istraženo. Osim temperature, najveće količine voda dobijene su u ovoj banji. Vode Vranjske Banje imaju i najširu primenu, pri čemu se danas manje koriste u industriji u odnosu na prethodnih 30 godina. Iako su urađeni projekti u cilju korišćenja termalnih voda banje za grejanje i banje i dela grada Vranja, nakon dvadeset godina, stanovništvo banje se i dalje greje na struju, drva, mazut, dok neiskorišćena energija otiče u reku. Bujanovačka i Vranjska Banja, nalaze se pored autoputa E-75, koji povezuje

Srbiju sa Makedonijom i Grčkom, što ih, zbog odlične lokacije i pristupnih puteva, čini veoma perspektivnim za razvoj rekreativno-turističkih centara.

U Sijarinskoj Banji, za potrebe grejanja, meštani seku šumu i narušavaju prirodno okruženje, dok potencijal hidrogeotermalnih resursa ostaje neiskorišćen. Voda iz bušotine B-4 se nakon korišćenja u balneologiji i za toplifikaciju hotela Gejzer, ispušta u Banjsku reku, tako da voda temperature 40°C otiče neiskorišćena, a ugrožava se flora i fauna u vodotoku.

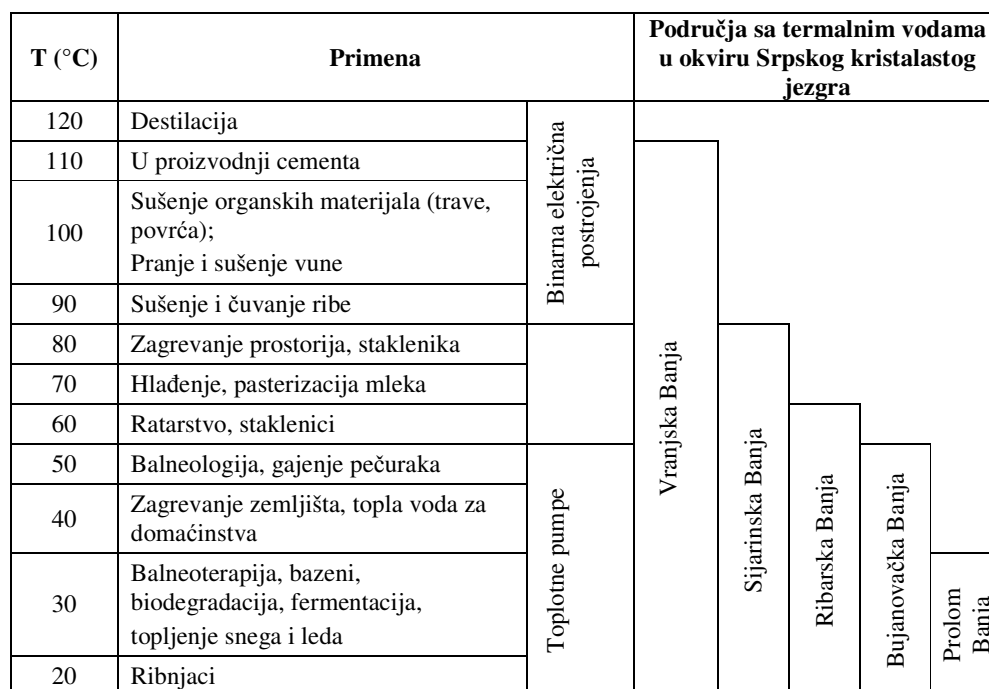
Deponovanje termalnih "otpadnih" voda može se rešiti izradom reinjektivnih bušotina, čime bi se voda ponovo vraćala u rezervoar.

Pozitivne promene u iskorišćavanju geotermalne energije zabeležene su u Ribarskoj Banji. Tokom 2011. izgrađen je novi Spa kompleks, u kome se termalne vode koriste za bazene, grejanje i za sanitarnu vodu. Iako su najniže temperature zabeležene u Prolom Banji, pomoću toplotnih pumpi omogućeno je zagrevanje objekata, pored već postojećeg korišćenja voda u balneologiji, za flaširanje i vodosnabdevanje.

Na području istraživanja podzemne vode sa temperaturom iznad 20°C i minimalnim kapacitetom od 0,1 l/s (hidrogeotermalni resursi) ističu iz 29 izvora i bušotina.

Dvadeset objekata koristi se za balneologiju i rekreaciju (bazeni), što čini 47,6% od svih izvora i bušotina. Osam objekata (19 %), uglavnom izvora sa vodom niže temperature i slabije izdašnosti, koristi se za piće i druge potrebe lokalnog stanovništva. Voda iz četiri bušotine se flašira (9,5%). Za staklenike, i za živinarsku farmu, koristi se samo voda iz šahte 5 u Vranjskoj Banji. Za direktno grejanje objekata koristi se voda iz pet bušotina, što čini 11,9 % od ukupnih objekata na području Srpskog kristalastog jezgra. Ne koristi se voda iz dve bušotine što čini 4,7 % od svih objekata na ovom području. Zbiranjem navedenih objekata dobija se veći broj od 29, zbog toga što se voda iz pojedinih objekata višenamenski koristi.

Hidrogeotermalni resursi na području Srpskog kristalastog jezgra mogu daleko više da se koriste za grejanje objekata, za staklenike, u industriji i agrikulturi. Međutim ova statistika obuhvatila je sve dostupne objekte, od kojih su mnogi sa niskim temperaturama ili sa niskom izdašnošću (brojni izvori u Sijarinskoj Banji), zatim brojne bušotine u Bujanovačkoj Banji koje su rađene u cilju utvrđivanja debljine litoloških jedinica Bujanovačke kotline.

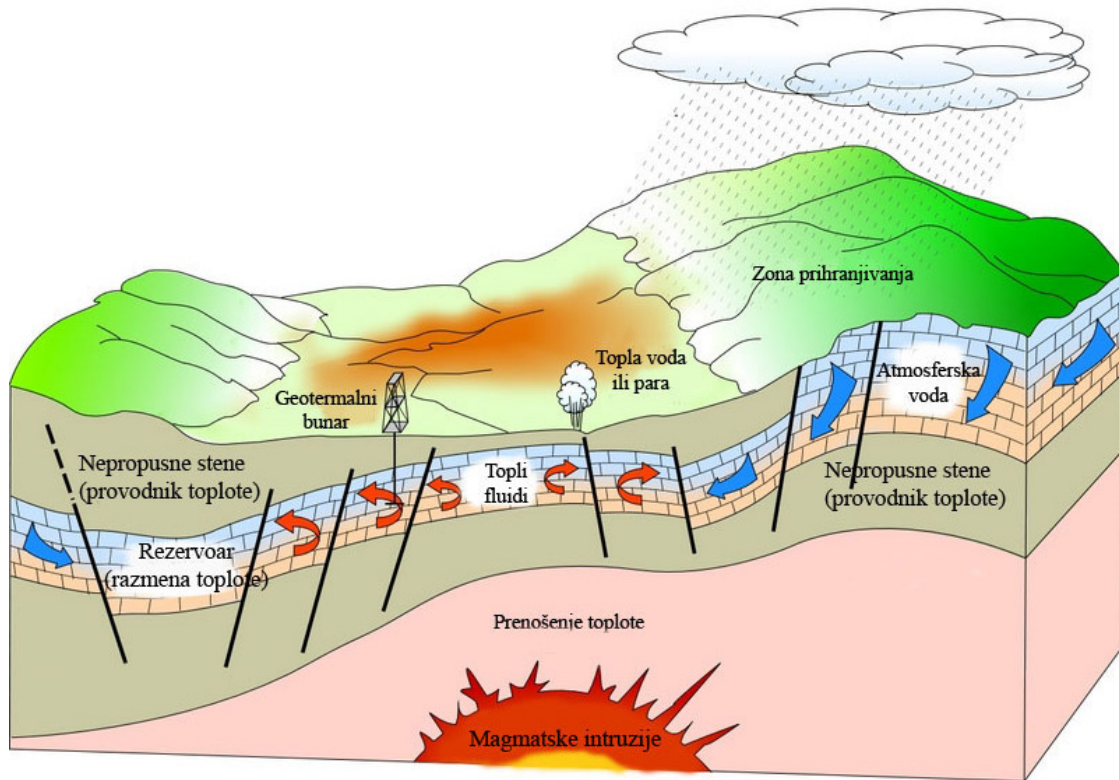


Slika 53. Lindal-ov dijagram korišćenja termalnih voda

(Lindal, 1973; izmenjeno)

**6. GEOTERMALNI SISTEMI SRPSKOG KRISTALASTOG
JEZGRA**

Geotermalni sistem je šematski opisan kao strujanje vode u kori Zemlje, koja u ograničenom prostoru prenosi toplotu od izvora toplote do zone isticanja (Hochstein, 1990). Glavni elementi sistema su: izvor geotermalne energije; rezervoar za akumuliranje geotermalne energije; barijera za zadržavanje akumulirane geotermalne energije; provodnik kojim se geotermalna energija dovodi od izvora do rezervoara; oblast prihranjivanja sistema vodom i zona isticanja fluida (Milivojević i Perić, 1990, fond. dok.). Šematski prikaz geotermalnog sistema dat je na slici 54.



Slika 54. Šematski prikaz idealnog konvektivnog geotermalnog sistema (Dickson and Fanelli, 2004; izmenjeno)

Prolom Banja

U okviru leckog vulkanskog kompleksa uočeni su ostaci tri kaldere, što svedoči o nekadašnjoj vulkanskoj aktivnosti (tercijarnoj). Termalne vode često se formiraju u širem području paleovulkanskih kaldera (Protić, 1995), kao posledica hlađenja magme.

Na osnovu ovih ispitivanja proračunata je radiogena toplota vulkanita leckog masiva od $1,97 \mu\text{W}/\text{m}^3$, koja je povišena u odnosu na prosečnu vrednost radiogene toplote vulkanita ($1,1$ do $1,5 \mu\text{W}/\text{m}^3$; Pollack, 1982). Pošto intruzivi imaju najveću radiogenu toplotu, vulkaniti kao njihovi izlivni ekvivalenti imaju niže vrednosti ove toplote. Tako da je povišena vrednost radiogene toplote leckog masiva, posledica magmatske intruzije u okviru nekadašnjeg vulkana, što je uticalo na povišene temperature voda u banji. Ceo proces je potpomognut neotektonskim izdizanjem terena i stvaranjem tenzionih pukotina. Magmatske intruzije iz dubljih delova terena su se pokretale kao površini terena, čime je omogućeno zagrevanje podzemnih voda usled lokalno povećanih geotermalnih gradijenata (Protić, 1995).

Prihranjivanje voda je na Radan planini (lecki andezitski masiv) od atmosferskih voda, što su potvrdile izotopske analize $\delta^2\text{H}$ i $\delta^{18}\text{O}$. Zapravo izotopske analize su potvrdile da se vode Prolom Banje prihranjuju na najvišim kotama u okviru Srpskog kristalastog jezgra, pa je zona prihranjivanja definisana iznad 1200 m.n.v, odnosno 10-15 km jugozapadno od banje.

Mala udaljenost od zone prihranjivanja, maksimalna dubina cirkulacije voda do 1km, kao i niska mineralizacija vode, ukazuju da su vode Prolom Banje *mlade* vode. Na osnovu izotopa $\delta^{14}\text{C}$ starost voda Prolom Banje je 1350 ± 90 godina (Milivojević i Perić, 1990, fond. dok.)

Glavne provodnike geotermalnih voda predstavljaju brojni sistemi međusobno povezanih pukotina i raseda, različitih dimenzija i oblika u okviru andezita. Brojne pukotine nastale su nakon hlađenja i očvršćavanje stenskih masa. Poniranjem voda duž razloma do zagrejanih stena obrazuje se konvektivni hidrotermalni sistem, pri čemu zagrejane vode duž razlomnih zona izbijaju na površinu terena. Andeziti provode toplotu u geotermalnom sistemu Prolom banje, dok barijere čine hidrotermalno promenjeni andeziti, vulkanske breče i tufovi i vulkanogeno-sedimentne stene. Najveće količine termalnih voda zahvaćene su istražnim bušotinama od 100 do 190 m iz ispucalih andezita.

Ribarska Banja

Izvor toplote geotermalnog sistema Ribarske Banje je jastrebački granitoid (Milovanović, 1980). Razlog za to je položaj granitoida u odnosu na pojave termalnih voda, pa se geotermalni sistem Ribarske Banje naziva i jastrebački hidrogeotermalni sistem. Na osnovu analiza K/Ar ustanovljena je eocenska starost granitoida od 37 miliona godina (Červenjak et al, 1963). Brojne pojave žičnih stena u širem oreolu Jastrepca ukazuju na prostranstvo granitoida ispod sedimentnih naslaga.

Na osnovu geomagnetnih ispitivanja na području Petine severozapadno od Ribarske Banje, registrovana je prostrana geomagnetna anomalija, elipsaste forme. Anomalija je prouzrokovana granitoidnim intruzivom, na dubini od oko 2000 m ispod gornjekredno-paleogenih i neogenih sedimenata. Ovaj intruziv je utisnut u postpaleogenu, odnosno u poslednjoj fazi magmatizma (Vukašinović, 2010). Intruziv je sačinjen od bazičnih i ultrabazičnih stena, moguće gabra, čiji se manji delovi pružaju u vidu apofiza u domenu Lomnica – Petina i Ribarska Banja (Milojević, 2004, fond. dok.). Pošto je reč o mlađem magmatskom telu, kao i da sedimenti iznad njega sprečavaju rasipanje toplote, ovaj intruziv može biti izvor toplote geotermalnih voda. Na ovu pretpostavku ukazuju i negativne vrednosti Bugeovih anomalija na potezu od Petine do Ribarske Banje, kao posledica deponovanje tektonski razlomljenog granitoida u rovu ili verovatnije kao posledica neotkrivenih apofiza koje predstavljaju deo granitoida Velikog Jastrepca (Milojević, 2004 fond. dok.).

Kontaktno-metamorfne stene oko Jastrebačkog granitoida, ukazuju da je granitoid preneo toplotu na okolne stene (termokontaktni metamorfizam), što je dovelo do hlađenja samog granitoida. Na osnovu merenja toplotne provodljivosti stena sa područja Ribarske Banje (Perović i saradnici, 1978), metapeščari i sericitski škriljci (gornjo-kredne metamorfne stene) predstavljaju najbolje provodnike toplote ($\lambda=3,87 \text{ W/m}^\circ\text{C}$). U okviru ovih stena javljaju se prsline, klivaži, međuslojne i gravitacione pukotine, tako da se u okviru većih pukotina koje seku kompletan paket i duž kojih je bilo i diferencijalnog kretanja blokova, javljaju povoljni uslovi za akumuliranje i cirkulaciju podzemnih voda (Špadijer i saradnici, 2003, fond. dok.). Temperature voda na isticanju su od 26 do 54°C, dok se u rezervoaru očekuju temperature od 90 do 97°C. Dubina cirkulacije termalnih voda su na ~1,9 km.

Barijeru geotermalnog sistema Ribarske Banje predstavljaju stene donjeg i srednjeg kredno-paleogenog kompleksa, gnajsevi, kao i škriljci visokog stepena metamorfizma. Toplotna provodljivost ovih stena je od 2,14 do 3,18 W/m°C (Perović i saradnici, 1978).

Izotopskim analizama, utvrđeno je da se geotermalni sistem Ribarske Banje prihranjuje na Velikom Jastrepcu, tj. iznad 1000 m.n.v., u okviru K-Pg kontaktno metamorfnih stena.

Sijarinska Banja

Izotopskim analizama utvrđeno je prihranjivanje termalnih voda Sijarinske Banje od atmosferskih padavina, iznad 1000 m.n.v. Visine iznad 1000 m.n.v uočavaju se u okviru leckog andezitskog masiva, na minimalnoj udaljenosti od Banje 25 km. Na veliku udaljenost od zone prihranjivanja potvrđuje i starost podzemnih voda, koja iznosi 40,000 godina (Milanović i saradnici, 2012).

Akumuliranje, cirkulacija i isticanje velikih količina termomineralnih voda, vezano je za rasede i pukotine sistema tupalske dislokacije, formirane u okviru tektonski oštećenih kristalastih škriljaca i andezita (Petrović Pantić i Zlokolica-Mandić, 2012b)

Tupalska diskolacija, proteže se u okviru kristalastih škriljaca, koji su dobri provodnici toplote (Petrović Pantić i Zlokolica-Mandić, 2012b). Toplotna provodljivost paleozojskih škriljaca je 3,21 W/mK, dok je toplotna provodljivost tercijarnih andezita 2,17 W/mK (Milivojević i Perić, 1990, fond. dok.). Pored funkcije provodnika kristalasti škriljci sa većim sadržajem glinovite komponente imaju i funkciju barijere za zadržavanje akumulirane geotermalne energije, odnosno predstavljaju vodonepropusnu granicu (Petrović Pantić i Zlokolica-Mandić, 2012b). U hidrogeološkom smislu, kristalasti škriljci svrstavaju se u uslovno bezvodne delove terena u okviru kojih se javljaju izvori izdašnosti do 0,1 l/s. Međutim termomineralne vode su najvećim delom zahvaćene baš iz ovih formacija, čime se dovodi u pitanje bezvodnost kristalastih škriljaca (Stanković i Zlokolica, 1993, fond. dok.). Kompaktni škriljci sa većim sadržajem glinovite komponente predstavljaju vodonepropusne stene, međutim često su izrasedani i ispucali, kad se u okviru njih formira pukotinski tip izdani.

Zagrevanje voda je pod dejstvom intruziva u okviru leckog masiva i pretpostavljenih intruziva duž tupalske dislokacije, kao i pod dejstvom pritisaka na velikim dubinama. U

plićim delovima terena (bušotina A-2, 100 m) vode se zahvataju iz andezita, dok u dubljim delovima terena (B-4, 1232 m) vode se zahvataju iz kristalastih škriljaca, pri čemu je isticanje voda vezano za pukotinske i rasedne zone u banji, odnosno isticanje je vezano za Banjski rased.

Izotopskim analizama je demantovano da su vode Sijarinske banje, Viče i Tulara formirane u okviru istog geotermalnog sistema sa rezervoarom u mermerima koji se prihranjuju na području Prokuplja (Milivojević i Perić, 1990, fond. dok.). Prihranjivanje voda u Tularu je iznad 500 m.n.v. u okviru andezita i hidrotermalno promenjenih andezita, dok se vode Viče prihranjuju u okviru klastita i mermera iznad 400 m.n.v.

Usled nedovoljnog obima podataka geotermalni sistem Viče i geotermalni sistem Tulara nisu jasno definisani. Vode Viče se zahvataju iz ispucalih kristalastih škriljaca, a velika mineralizacija, prisustvo CO₂ i prisustvo mikroelemenata i elemenata u tragovima ukazuju na sporu vodozamenu i duboke strukture. Vode na području Tulara vezuju se za rasednu zonu tupalske dislokacije, dok andeziti predstavljaju rezervoar sistema.

Vranjska Banja

Vranjska Banja nalazi se na geotermalno perspektivnom području. Istočno od banje utisnut je surdulički granitoid, a severozapadno su ostaci kaldera i prisustvo vulkanogenih stena kao dokaz tercijarnih vulkanskih aktivnosti na datom području.

Prihranjivanje termalnih voda Vranjske Banje vrši se u okviru ispucalih i razlomljenih granita Surdulice, na visinama iznad 800 m.n.v. Najveće vrednosti radiogene toplote na Surduličkom masivu imaju kvarclatiti (3,56 $\mu\text{W}/\text{m}^3$), u odnosu na granitoide (3,19 $\mu\text{W}/\text{m}^3$) i dacite (2,8 $\mu\text{W}/\text{m}^3$), dok su znatno niže vrednosti dobijene iz jezgra bušotine VG-2 (do 1,44 $\mu\text{W}/\text{m}^3$). Izvor toplote su intruzivna tela, utisnuta u poslednjoj fazi magmatizma, čiji su izlivni ekvivalenti kvarclatiti, koji se uočavaju u okviru granodiorita Surdulice. Toplotni provodnici su granodioriti i škriljci. Mikašisti i leptinolititi imaju funkciju barijere, a eocenski sedimenti predstavljaju bočnu barijeru vodama iz obodnih delova vranjskog rova. Duž rasedne zone pravca pružanja SI-JZ (Surdulica - Vranjska Banja - Bujanovac) došlo je do intenzivnog pucanja i drobljenja u granodioritima i kristalastim škriljcima. Za ovu zonu se vezuju pojave

termalnih voda u Vranjskoj Banji, tako da su najveće količine voda dobijene iz tektonski oštećenih gnajsganita.

Postojanje vulkanskih nekova i geomagnetnih anomalija, severozapadno od Vranjske Banje, ukazuju da pored granodiorita postoji još jedan izvor toplote u neposrednoj blizini banje. Rased pravca pružanja SZ-JI (slika 23) koji preseca Vranjsku Banju, može predstavljati toplotni provodnik, čime je najveća toplota skoncentrisana baš na području banje.

Bujanovačka Banja

Termalne vode Bujanovačke Banje prihranjuju se atmosferskim padavinama iznad 900 m.n.v., petnaestak kilometara severno od banje. Zona prihranjivanja nalazi se u okviru gnajseva i granitoida Bujanovca. Graniti su intenzivno ispucali i tektonski oštećeni što omogućava dobru hidrauličku povezanost i cirkulaciju podzemnih voda. Na osnovu temperature, mineralizacije, dominantno anjonsko-katjonskog sastava $\text{HCO}_3\text{-Na}$ i prisustva mikrokomponenti, potvrđeno je da graniti predstavljaju primarnu izdan u okviru koje se formiraju termomineralne vode, dok sekundarnu izdan, iz koje se zahvataju termalne vode, predstavljaju tercijarne naslage. U okviru sedimenata tercijarne starosti izdvaja se bazalni deo (granitni grus) i smena peskovitih slojeva sa glinovito-laporovitim sedimentima.

Paleozojski škriljci predstavljaju podinske i bočne barijere geotermalnog sistema, a glinoviti sedimenti laporci, peščari i glinci tercijarne starosti predstavljaju povlatne i bočne barijere.

Na osnovu geologije terena, graniti deluju kao očigledan izvor energije. Međutim Bujanovački granitoid je variscijske starosti, ispucao i izrasedan pa se ne očekuje se da je zadržao značajnije izvore toplote u sebi. Mlađa magmatska aktivnost na ovom području usloвила su povišeni toplotni tok. Na postojanje mlađeg granitoida ukazuju rezultati elektromagnetnih sondiranja terena (Burazer, 1993, fond. dok.) kao i geomagnetne anomalije otkrivene u samoj zoni Bujanovačke Banje (Vukašinović, 2010). Osim geofizičkih istraživanja, i hemijske analize tj. prisustvo pojedinih elemenata kao što su B i Ge, sugerišu na postojanje mlađih magmatskih izliva, dok se i na geološkoj karti uočavaju brojne pojave žičnih ekvivalenata i pegmatita. Prema zapažanjima Dimitrijevića (1958) graniti su utisnuti u dve faze, prvo je utisnuto centralno granitsko telo, a potom u mlađoj fazi su utiskivani žični graniti u obliku silova i dajkova. Najmlađe stene pojavljuju se posle pegmatitskog stadijuma i to u povlatnom delu šire obodne zone granitoida. Postojanje mladih bazaltoida

miocensko/pliocenske starosti (Cvetković et al, 2004a) na 8 do 20 km jugozapadno od Bujanovačke banje, svakako ukazuje na povišeni toplotni tok ovog područja.

* * * * *

Zbog složene geologije terena, može se reći da je svaki geotermalni sistem jedinstven. Ono što je zajedničko za svaki sistem, jeste da izvor toplote čine mlađa, neotkrivena intruzivna tela u okviru otkrivenih magmatskih formacija. Intruzivna tela su utisnuta u toku poslednje faze magmatizma, u doba mladjeg tercijara (oligocen, miocen) i zbog svoje starosti i pokrivenosti još uvek predstavljaju značajne izvore toplote. Rezervoar čine sistemi raseda i pukotina u okviru škriljaca, andezita i granitoidnih stena. Količine voda akumulirane u pukotinama i rasedima u zavisnosti su od njihove ispunjenosti raspadnutim i izlomljenim stenskim materijalom, kao i od sadržaja glinovitih minerala. Geotermalni sistemi se prihranjuju od atmosferskih padavina, kiše, snega, na okolnim masivima. Provodnici toplote, kao i barijere detaljnije su dati u tabeli 27.

Tabela 27. Pregled elemenata geotermalnih sistema Srpskog kristalastog jezgra (Petrović, 2010; dopunjeno)

Geotermalni sistem	Izvor toplote	Provodnik	Rezervoar	HGT barijera	Prihranjivanje	Isticanje
Prolom Banja	tercijarni (Tc) intruzivi u okviru leckog masiva	andeziti	izlomljeni andeziti	hidrotermalno promjenjeni andeziti, vulkanske breče i tufovi i vulkanogeno-sedimentne stene	na Radan planini, >1200 m.n.v	iz andezita
Ribarska Banja	Tc intruziv kod Petine	sericitski škriljci i metapeščari	stene gornjeg paketa kristalastih škriljaca, sericitski škriljci	stene donjeg i srednjeg paketa kristalastih škriljaca i gnajsevi	K-Pg kontaktno metamorfne stene >1000 m.n.v	iz metapeščara, sericitskih škriljaca
Sijarinska Banja	Tc intruzivi u okviru leckog masiva i intruzivi utisnuti duž tupalske dislokacije	gnajsevi, leptinoliti i mikašisti	rasedi i pukotine sistema tupalske dislokacije u okviru andezita i gnajseva	kristalasti škriljci sa većim sadržajem glinovite komponente	u okviru leckog masiva >1000 m.n.v	iz gnajseva i andezita
Vranjska Banja	Tc intruzivi u okviru Surduličkog masiva	granodiorit, kristalasti škriljci	rasedne i pukotinske zone u okviru granodiorita, gnajseva, mikašista, leptinolita	gnajsevi, mikašisti, leptinoliti na površini terena + eocenski sedimenti kao bočna barijera	Surdulički granodiorit, >800 m.n.v.	iz gnajseva i gnajsganita
Bujanovačka Banja	Tc intruzivi u okviru granodiorita Bujanovca	graniti, škriljci	pukotine i rasedi u okviru granita i tercijarne naslage	Pz škriljci, laporci, glinci, peščari	gnajsevi i graniti Bujanovca 900 m.n.v	tercijarne naslage (granitni grus i smena peskovitih slojeva sa glinovito-laporovitim sedimentima)

7. KRITIČKI OSVRT NA PODATKE RANIJIH ISTRAŽIVANJA

Problem izrade doktorata prvenstveno predstavlja mali broj bušotina i izvora na jednoj lokaciji. U Prolom Banji postoje tri bušotine, u Ribarskoj četiri, dok je u ostalim banjama nešto bolja situacija.

Drugi problem je nedostatak podataka, kao i nedostatak pouzdanih podataka. Bušotine su izrađene uglavnom 70-ih, 80-ih i 90-ih godina dvadesetog veka, a o izradi mnogih bušotina nađeni su samo osnovni podaci, dubina, dobijena količina vode, vodonosni sloj. Podaci se uglavnom zasnivaju na Elaboratima o hidrogeološkim istraživanjima, dok su oskudni podaci o bušenju, geofizičkim istraživanjima, nedostaju termokarotaži bušotina, nema podataka o petrološkim, mineraloškim analizama, pri čemu mnoge bušotine nisu rađene sa jezgrovanjem. Ove analize i istraživanja uglavnom se rade prilikom izrade bušotina, tako da nije bilo moguće uraditi date analize za potrebe doktorata.

Neujednačenost analiza naročito se odrazila na litološki sastav bušotina. To je problem koji se susreće u bušotinama koje su rađene sa jezgrovanjem, ali su jezgra determinisana od različitih autora ili u različitom periodu, pa je problem na koje podatke da se oslonimo. Na primer, analizirajući litološke stubove bušotine RB-4 i RB-5 u Ribarskoj Banji, problem je različita determinacija, verovatno, istih litoloških jedinica. Kristalasti škriljci, odnosno zeleni škriljci su teško raščlanjivi, pa su ih autori različito definisali. Takvi podaci otežavaju realno sagledavanje litologije terena.

U Sijarinskoj Banji skoro sve bušotine rađene su kroz andezite, jedino u bušotini B-4 andeziti nisu registrovani ni u plićim horizontima. Na 10-15 m od bušotine B-4 je bunar Aragon koji je ceo urađen kroz andezite do 40 m. Ovakva situacija ukazuje i na problematičnost litoloških interpretacija i na ovom lokalitetu. Dati problem bi mogao da se prevaziđe u slučaju da postoje sačuvana jezgra bušotina. Na žalost, usled neadekvatnog skladištenja, ovim jezgrima se gubi trag.

Zbog svoje kompleksnosti, područje Srpskog kristalastog jezgra je pravi izazov za proučavanje. Navedeni problemi jesu otežali izradu ove disertacije, ali su nove analize i primenjene metode pri proučavanju hidrogeotermalnih resursa, omogućili da se ovi problemi značajno nadomeste.

8. ZAKLJUČAK

Geotermalna energija danas zauzimaju značajno mesto u celom svetu. Pripada grupi obnovljivih izvora energije (pored energije vetra, Sunca, vode, biomase...), čime se akcentuje na smanjeno emitovanje štetnih gasova u odnosu na fosilna goriva. Hidrogeotermalni resursi se koriste u balneologiji, za toplifikaciju, staklenike, ribnjake, farme, u industriji... kao i za proizvodnju električne energije.

Za područje hidrogeološkog rejona Srpskog kristalastog jezgra, sprovedena su geološka i hidrogeološka istraživanja, urađene brojne analize i proračuni u cilju određivanja: dostupnih količina voda i temperatura, maksimalno očekivane temperature u rezervoaru, dubine na kojoj se mogu očekivati maksimalne temperature, hemijskog sastava voda, radioaktivnosti vode, porekla voda, visine prihranjivanja, izvora toplote, zatim određena je zasićenost vode mineralima, geotermalni potencijal, inkrustrativna i korozivna svojstva vode, korišćenje vode i kao najkompleksniji zadatak, na osnovu dobijenih rezultata istraživanja, definisano je pet geotermalnih sistema na ovom području.

Ukupno procenjeni hidrogeotermalni resursi ($>20^{\circ}$) iznose 186 l/s, računajući količine vode iz tri bušotine u Prolom Banji (B-3, B-4 i B-5), četiri u Ribarskoj Banji (CRB-1, RB-3, RB-4 i RB-5), deset u Sijarinskoj (Borovac, Glavni, Gejzir, Inhalator, A-2, Jablanica, Aragon, B-4), sedam pojava u Vranjskoj Banji (Stara kaptaza, VG-2, VG-3, B-1, B-1b, A-1 i šahta 5) i sedam u Bujanovačkoj Banji (A-2, A-2, A-4, A-5, BH-7, Yu-1 i Yu-2).

Hemijske analize voda, pored ukaza na kvalitativna svojstva, pokazale su se veoma korisnim u cilju identifikacije porekla voda. Kvalitet analiziranih voda svakako je bitan, naročito zbog toga što se pojedine vode koriste za piće. Vode su pretežno $\text{HCO}_3\text{-Na}$, dok se sulfati javljaju u vodama Ribarske i Vranjske Banje. Po pH vrednosti vode su neutralne do alkalne, dok su prisutne i malomineralizovane i mineralne vode, što ukazuje i širok raspon elektroprovodljivosti voda od 200 do 5880 $\mu\text{S/cm}$. Obogaćivanje mineralima posledica je duboke cirkulacije voda, dugog vremenskog perioda od prihranjivanja do isticanja, odnosno interakcije između voda i stena. Od gasova ugljen-dioksid je najzastupljeniji, nastao u uslovima visokih pritisaka i temperatura, pri metamorfozi sedimentnih i magmatskih stena. Mikroelementi koji se pojavljuju u analiziranim vodama uglavnom ukazuju na interakciju voda i kiselih magmatskih stena. Elementi F, B, Ge, Rb, W i Cs poreklom su od granita ili

pegmatita kao krajnjih derivata granitskih intruzija. Izuzetak predstavljaju vode Prolom Banje u kojima je povišen sadržaj U i V poreklom od vulkanita.

Glavni izvor geotermalne energije je prirodno raspadanje radioaktivnih elemenata U, Th i K. U tom cilju proračunata je radiogena toplota granitoida Jastrepcu, vulkanita i granotoidnih stena Surdulice i vulkanita leckog masiva.

Prosečne ili niže vrednosti radiogene toplote granitoida Jastrepcu ($2,28 \mu\text{W}/\text{m}^3$) od radiogene toplote granitoida u svetu ($2,5 \mu\text{W}/\text{m}^3$; Pollack, 1982), ukazuju da otkrivena tela nisu primarni izvor toplote, tako da je neotkrivena intruzija na širem području jastrebačkog granitoida glavni nosilac toplote Ribarske Banje. Na osnovu radiogene toplote vulkanita i granodiorita Surdulice ($3,11-3,19 \mu\text{W}/\text{m}^3$), zaključuje se da su izlivi vulkanita u okviru granodiorita doveli do povišenog toplotnog toka šireg područja, sa manifestacijama tople vode u Vranjskoj Banji. Radiogena toplota vulkanita leckog masiva ($1,97 \mu\text{W}/\text{m}^3$) je povišena u odnosu na prosečnu vrednost vulkanita ($1,1$ do $1,5 \mu\text{W}/\text{m}^3$; Pollack, 1982). Najviše vrednosti radiogene toplote imaju stene surduličkog masiva, zatim jastrebačkog granitoida, pa vulkaniti leckog masiva. Ovi podaci odgovaraju i temperaturama voda na datim lokalitetima, pa je najviša temperatura voda na isticanju zabeležena u Vranjskoj Banji (do 105°C), zatim u Ribarskoj Banji (do 54°C), dok je najniža temperatura voda zabeležena u Prolom Banji (do 33°C).

U skladu sa vrednostima radiogene toplote, primenom silicijumskih geotermometara proračunato je da se najviše temperature očekuju u Vranjskoj Banji do 146°C , zatim u Ribarskoj do 97°C , dok se u Prolom Banji ne mogu očekivati temperature veće od 55°C , što je i najniža očekivana temperatura na području Srpskog kristalastog jezgra. Maksimalno očekivane temperature u vodama Sijarinske Banje su 115°C , dok se u Bujanovačkoj Banji očekuju temperature od 90 do 123°C .

Na širem području Sijarinske Banje nema granotoidnih intruzija koje bi objasnile visoku temperaturu voda u ovoj banji. Postojanje utisnutih intruziva duž tupalske dislokacije predstavljaju glavni izvor toplote voda Sijarinske Banje, dok nije isključeno da su vode zagrevane i u okviru leckog masiva.

Zbog velike otkrivenosti i starosti, Bujanovački granitoid nije izvor toplote termalnih voda Bujanovačke Banje. Ovakve temperature mogu opravdati mlađi, izlivni ekvivalenti duž ovog granitoida, čije poreklo potvrđuju i mikroelementi u vodama (F, B, Ge, Rb), kao i postojanje mlađih tercijskih bazaltoida južno i jugoistočno od banje.

Geotermalni gradijent, određen u dubokim bušotinama (>1000 m) je od 0,05 do 0,07 °C/m. U skladu sa geotermalnim gradijentom i toplotnom provodljivošću stena, geotermalna potencijalnost Srpskog kristalastog jezgra, odnosno gustina toplotnog toka, je od 136,6 (Sijarinska Banja) do 191,5 mW/m² (Vranjska Banja) sa prosečnom vrednošću od oko 163,8 mW/m², koliko je i proračunato u Ribarskoj Banji.

Temperature dobijene pomoću geotermometara, očekuju se na dubinama od ~1 km (Prolom Banja) pa do 2,3 km (Sijarinska Banja). Na području Srpskog kristalastog jezgra stene su sa dubinom kompaktnije, pa su manji prilivi voda na velikim dubinama. U cilju dostizanja ovih temperatura, nije poznato kolike bi se količine voda, datih temperatura, zahvatile.

Izotopske analize ($\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$) su dokazale da se analizirane vode prihranjuju od atmosferskih padavina, uglavnom topljenjem snega nakon zimskih meseci, od 800 m.n.v. (donja visinska granica prihranjivanja termalnih voda Vranjske Banje), pa sve do 1200 m.n.v. (vode Prolom Banje). U okviru leckog masiva (Radan) prihranjuju se termalne vode Prolom Banje i termalne vode Sijarinske Banje (>1000 m.n.v.). Termalne vode Ribarske Banje prihranjuju se na Jastrepču u okviru K-Pg kontaktno-metamorfne stena (>1000 m.n.v.), termalne vode Vranjske Banje imaju veliku zonu prihranjivanja na širem području surduličkog masiva (>800 m.n.v.), što opravdava velike količine voda u banji. Prihranjivanje termalnih voda Bujanovačke Banje vrši u okviru granitoida i gnajseva severno od banje, na visinama iznad 900 m.n.v.

Sadržaj izotopa u vodama Viče i Tulara ukazuje na niže zone prihranjivanja, tako da se vode iz Viče prihranjuju u okviru M,Pl klastita i Pz mermera (>400 m.n.v.), dok se vode iz Tulara prihranjuju u okviru andezita (>500 m.n.v.).

Za korišćenje termalnih voda, naročito za projektovanje cevi i opreme, korozija i inkrustracija su veoma važni parametri. Za procenu ovih svojstava vode korišćen je dijagram log (Q/K) u odnosu na promenu temperature, Langelier-ov indeksa zasićenja i Ryznar-ov indeksa stabilnosti. Termalne vode Sijarinske, Vranjske, Bujanovačke Banje, kao i vode iz Viče i Tulara imaju inkrustrativna svojstva, odnosno zasićene su kalcitom. Prema Langelier-ovom indeksu zasićenja najveća inkrustracija javlja se u dubokim bušotinama Vranjske Banje (VG-2 i VG-3) i Sijarinske Banje (B-4 i Aragon). U vodama Prolom i Ribarske Banje, kao i u hladnijim vodama Sijarinske i Bujanovačke Banje, ne očekuje se inkrustracija, ali može se očekivati manja do teška korozija. Na ova svojstva utiče vrednost mineralizacije, sadržaj HCO_3 , sadržaj CO_2 i alkalitet voda.

Složena geologija i tektonika Srpskog kristalastog jezgra uslovile su formiranje termalnih voda, različitih po temperaturi, hemijskom sastavu, kapacitetima, samim tim i po mogućnostima iskorišćavanja.

Na analiziranom području, geotermalna energija se najviše koristi u Vranjskoj Banji (207 TJ/god), u balneologiji, za toplifikaciju banjskih objekata, domaćinstava, škole, ambulante, živinarske farme, za uzgoj cveća...dok postoje i istraživanja u cilju izgradnje geotermalne elektrane s binarnim ciklusom. Svakako bitno je pomenuti i ekonomski faktor, tako da cena električne energije dobijena od geotermalne energije iznosi 7,5 c/kWh (evrocenta po kilovat-satu), dok je cena električne energije dobijene od fosilnih goriva (0,2-2 MW) od 8,2 do 10,4 c/kWh (Sl. glasnik RS, br. 99/2009).

U balneološko-rekreativne svrhe i za grejanje banjskih objekata, u Sijarinskoj Banji se koristi 45,28 TJ/god, a u Ribarskoj Banji 31,42 TJ/god. Za balneologiju se koriste termalne vode Bujanovačke (13,72 TJ/god) i Prolom Banje (1,38 TJ/god), pri čemu je za potrebe zagrevanja banjskih objekata u Prolom Banju omogućeno korišćenje 40 TJ/god pomoću toplotnih pumpi. U ove dve banje voda se značajnim delom koristi za flaširanje. Ukupno korišćenje geotermalne energije u ovih pet banja iznosi 298,82 TJ/god, odnosno 7137 tona ekvivalentne nafte ili 101196 tona ekvivalentnog uglja. Ekološki aspekt korišćenja ove količine geotermalne energije umesto mazuta, ogleda se u sprečavanju emitovanje 6307,46 t CO_2 u vazduh, dok se korišćenjem iste količine geotermalne energije umesto uglja, sprečava emitovanje 6530,5 t CO_2 .

Analizirane lokacije su veoma perspektivne u pogledu iskorišćavanja geotermalne energije. Najznačajnija korist bi se dobila korišćenjem termalnih voda za toplifikaciju naselja, a potom izradom staklenika, ribnjaka, u industriji... Ako bi se iskoristilo svih 186 l/s hidrogeotermalnih resursa, prosečne temperature 50°C, i omogućilo višestepeno obaranje temperature do 15°C, ostvarilo bi se korišćenje energije od 858 TJ/god.

Iako Srbija raspolaže sa brojnim hidrogeotermalnim resursima zavidnih količina i temperatura, prisutno je neracionalno gazdovanje njima. Velike količine toplotne energije ostaju neiskorišćene, usled nedovoljne istraženosti resursa, zatim zbog političkih, pravnih i društvenih odnosa, zakonske politike, procedure dobijanja dozvola i nejasno rešenih stavova oko vlasništva nad resursima.

U Beogradu,

mr Tanja M. Petrović Pantić

januar, 2014

LITERATURA

Publikovana

- Allen, D.M., Grasby, S.E. and Voormeij, D.A. (2006). Determining the circulation depth of thermal springs in the southern Rocky Mountain Trench, south-eastern British Columbia, Canada using geothermometry and borehole temperature logs. *Hydrogeol J* 14.159–172
- Aljtovski, M.E. (1973). *Hidrogeološki priručnik*. Beograd: Građevinska knjiga.
- Anderson, D.N. and Lund J.W. (1979). *Direct Utilization of Geothermal Energy: A Technical Handbook*. Special Report No. 7, Geothermal Resources Council, Davis, CA, 250 p.
- Antonović, A. (2002). Torijum u Srbiji. *Vesnik-geologija, hidrologija i inženjerska geologija*, br. 52, 157-181
- Armannsson, H. (2007). Application of geothermal methods in geothermal exploration. *Geothermal training programme*. Kenya, 1-9.
- Arnórsson, S., Gunnlaugsson, E., and Svavarsson, H. (1983). The chemistry of geothermal waters in Iceland III. Chemical geothermometry in geothermal investigations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47, 567-577.
- Arnórsson, S. and Bjarnason, J.O. (1993). *Icelandic Water Chemistry Group presents the chemical speciation programme WATCH*. Science Institute, University of Iceland, Orkustofnun, Reykjavik, 7 pp.
- Arnórsson, S. (2003). Arsenic in surface and up to 90°C ground waters in a basalt area, N-Iceland: processes controlling its mobility. *Applied Geochemistry*, 18, 1297-1312.
- Appelo, C.A.J. (1996). Multicomponent ion exchange and chromatography in natural systems. In P.C. Lichtner, C.I. Steefel, and E.H. Oelkers (Eds.), *Reactive Transport in Porous Media. Reviews in Mineralogy* 34, 193-227.
- Babović, M. i Cvetković, D. (1968). *OGK 1:100.000, list Trgovište sa Radomirom K 34-57*. Beograd: Savezni geološki zavod.

- Babović, M., Roglić, Č., Avramović, V. i Marić, S. (1977). *OGK 1:100.000, Tumač za list Trgovište sa Radomirom K 34-57*. Beograd: Savezni geološki zavod.
- Beaucaire, C. and Michard, G. (1982). Origin of dissolved minor elements (Li, Rb, Sr, Ba) in superficial waters in a granitic area. *Geochemical Journal, Vol. 16 (No. 5)*, p.247
- Bernstein, L. R. (1985). Germanium geochemistry and mineralogy. *Geochimica et Cosmochimica Acta 49*, 2409–2422.
- Birke, M., Reimann, C., Demetriades, A., Rauch, U., Lorenz, H., Harazim, B., and Glatte, W. (2010). Determination of major and trace elements in European bottled mineral water - analytical methods. In M. Birke, A. Demetriades, and B. De Vivo (Guest Eds.), *Mineral Waters of Europe. Special Issue, Journal of Geochemical Exploration*, 107(3): 217-226
- Brunt, R., Vasak, L. and Griffioen, J. (2004). Fluoride in groundwater: Probability of occurrence of excessive concentration on globe scale. *IGRAC, Report nr. SP 2004-2*
- Bullard, E. C. (1939). Heat Flow in South Africa. *Proceedings of the Royal Society A-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 173, 474-502
- Carrier Air Conditioning Company (1965). *Handbook of Air Conditioning System Design*. New York: McGraw-Hill Books.
- Chelnokov, G. (2004). Interpretation of geothermal fluid composition from Mendeleev volcano, Kunashir, Russia, *Geothermal Training Programme, Iceland, Number 5*, 57-82.
- Clark, S.P., Peterman, Z.E. and Heier, K.S. (1966). Abundances of uranium, thorium and potassium, sec 24 of handbook of physical constants (revised ed.). *Geological Society of America Memoir 97*, p.521-541
- Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702-1703.
- Cvetković, V., Karamata, S., Balogh, K., Fedkin, V., Milanović, D. (1995). Petrology of medium-grade gneisses from the Batocina area (Serbo-Macedonian Massif, Yugoslavia). *Proceedings XV Congress of the Carpatho-Balkan Geological Association, Athens*, 590-595.
- Cvetković, V., Knežević, V., Pecskey, Z. (2000). Tertiary igneous formations of the Dinarides, Vardar zone and adjacent regions: From recognition to petrogenetic

- implications. In: S. Karamata and S. Janković (eds). *Geology and Metallogeny of the Dinarides and the Vardar zone*. The Academy of Sciences and Arts of the Republic of Srpska, Banja Luka-Srpsko Sarajevo, Collections and Monographs 1, Dpt. of Natur., Math. and Techn. Sci. 1, 245-253.
- Cvetković, V., Prelević, D., Downes, H., Jovanović, M., Vaselli, O., Pécskay, Z. (2004a). Origin and geodynamic significance of Tertiary postcollisional basaltic magmatism in Serbia (central Balkan Peninsula)
- Cvetković, V. (2004b). Zlatibor iz doba Jure, *Planeta, magazin za nauku, istraživanja i otkrića*, 10.
- Červenjak, Z., Ferrara, G. and Tongiorgi, E. (1963). Age Determination of Some Yugoslav Granites and Granodiorites by the Rubidium-Strontium Method. *Nature*, 197 (4870), 893
- Ćirić, B. (1968). *Neotektonska karta SFR Jugoslavije, 1:500,000*. Beograd: Savezni geološki zavod.
- Ćirić, B. (1996). *Geologija Srbije, građa i razvoj Zemljine kore*. Beograd: Geokarta.
- D'Amore, F., Scandiffio, G. and Panichi, C. (1983). Some observations on the chemical classification of ground waters. *Geothermics* 12(2/3), 141–148
- D'Amore, F., and Arnórsson, S. (2000). Geothermometry. In S. Arnórsson (ed.). *Isotopic and Chemical techniques in Geothermal Exploration, Development and Use, Sampling Methods, Data Handling, Interpretation*, International Atomic Energy Agency, Vienna, 152-199.1.
- Dangić, A. and Protić, D. (1995). Geohemija mineralnih i termalnih voda Srbije: sadržaji i raspodela fluora. *Radovi Geoinstituta, knjiga 31*, str. 315–323.
- Davies, J. H. and Davies, D. R. (2010). Earth's surface heat flux. *Solid Earth* 1, 5-24.
- De Vos, W. and Tarvainen, T. (chief eds), (2006). *Geochemical Atlas of Europe. Part 2 - Interpretation of Geochemical Maps, Additional Tables, Figures, Maps, and Related Publications*. Geological Survey of Finland, Espoo, 692 pp.
- Dickson, M.H., Fanelli, M. (2004). *What is Geothermal Energy?* Pisa, Italy: Istituto di Geoscienze e Georisorse, <http://www.geothermal-energy.org/>, 13.6.2012.

- Dimitrijević, M. (1958). *Geološki sastav i struktura Bujanovačkog granitskog masiva*. Beograd: Zavoda za geološko i geofizičko istraživanje N.R. Srbije, sveska VII.
- Dimitrijević, M., Petrović, B., Čikin, M., Babović, A., Srdić, A. i Atin, B. (1964). *OGK SFRJ, list Leskovac 1 : 100 000, sekcije Leskovac 54 i 52 (južni deo)*. Beograd: Zavod za geološka i geofizička istraživanja
- Dinelli, E., Lima, A., De Vivo, B., Albanese, S., Cicchella, D. and Valera, P. (2010). Hydrogeochemical analysis on Italian bottled mineral waters: effects of geology. In M. Birke, A. Demetriades, and B. De Vivo (Guest Eds.), *Mineral Waters of Europe. Special Issue, J. Geochem. Explor. 107 (3)*, 317-335
- Dragišić, V. i Polomčić, D. (2009). *Hidrogeološki rečnik*. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.
- Đajić, N., Ivezić, D. i Tanasković, T. (2007). Mogućnost korišćenja geotermalne energije u Bujanovačkoj Banji. *KGH*, 3, p.35-41
- Ellis, A.J. (1959). The solubility of calcite in carbon dioxide solutions. *Am. J. Sci.*, 257, 354-365.
- EPA – Environmental Protection Agency (1999). Radon in drinking water: questions and answers. Washington
- Fersman, A.E. (1953). *Izbrannie trudi*. Tom II. A N SSSR, Moskva.
- Filipović, B., Krunić, O., Lazić, M. (2005). *Regionalna hidrogeologija Srbije*. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.
- Fournier, R.O. and Truesdell, A.H. (1973). An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, 1255-1275.
- Fournier, R.O. (1977). Chemical geothermometers and mixing model for geothermal systems. *Geothermics*, 5, 41-50.
- Fournier, R.O. (1978). oral commun., In Brook, C.A., Mariner, R.H., Mabey, D.R., Swanson, J.R., Guffanti, M. and Muffler, L.J.P. Hydrothermal Convection Systems With Reservoir Temperatures $\geq 90^{\circ}\text{C}$. In Muffler, L.J.P. (ed.), *Assessment of Geothermal Resources of the United States-1978*, Geological Survey Circular 790.

- Fournier, R.O. (1979). A revised equation for the Na-K geothermometer. *Geoth. Res. Council Transactions*, 3, 221-224.
- Fournier, R.O. (1981). Application of water geochemistry to geothermal exploration and reservoir engineering. In L. Rybach and L.J.P. Muffler (eds.), *Geothermal systems: Principles and case histories* (109-143). Chichester, U.K: John Wiley & Sons Ltd.
- Fournier, R.O. and Potter, R.W. (1982). A revised and expanded silica (quartz) geothermometer. *Geothermal Resources Council, Bull.*, 11, 3-9.
- Fournier, R.O. (1989). Lectures on geochemical interpretation of hydrothermal waters. *UNU Geothermal Training Programme, Reykjavik, Iceland, Report 10*, pp 66
- Fritschle, T., Daly, J.S. and McConnell, B.J. (2012). Geothermal potential of the buried Drogheda and Kentstown granites, co. Meath, Ireland. *Geophysical research abstracts, Vol. 14. EGU 2012-9731-2*
- Giggenbach, W.F. (1988). Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52(12), 2749-2765.
- Giggenbach, W.F. (1991). Chemical techniques in geothermal exploration. In F. D'Amore, (ed.), *Applications of geochemistry in geothermal reservoir development* (119-142). Rome: UNITAR/UNDP publication.
- Grahame, J.H.O. (2009). *Geothermal Energy Concept for Singapore*. Singapur: Dept of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapur. web source <http://www.academia.edu/>, 02.11.2012.
- Hadžišehović, M., Miljević, N., Šipka, V., Golobočanin, D. and Popović, R. (1993). Isotopic analysis of groundwater and carbonate system in the Surdulica geothermal aquifer. *Radiocarbon, Vol. 35, No. 2*, 277-286.
- Hadžišehović, M., Dangić, A., Miljević, N., Šipka, V. and Golobočanin, D. (1995). Geothermal Water Characteristics in the Surdulica Aquifer. *Ground Water, Vol.33, No.1*, 112-123
- Hedrick, J.B. (2004). REE Handbook -- The ultimate guide to Rare Earth Elements *Rare Metal Blog*. Toronto, Canada. <http://www.reehandbook.com>, 20.11.2013.

- Hem, J.D. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*. Second Edition. United States: United States Geological Survey Water Supply Paper, vol. 2254. p 129.
- Hochstein, M. P. (1990). Classification and assessment of geothermal resources. In M.H. Dickson, and M. Fanelli (eds.) *Small geothermal resources: A Guide to Development and Utilization* (31-57) New York: UNITAR.
- Hurlbut Jr., C.S. and Klein, C. (1977). *Manual of Mineralogy*, 19th ed. John Wiley and Sons, New York.
- Imtiaz A. (1997). Exploration of geothermal fluids in the Reykholt area, Borgarfjordur, W-Iceland. *Geothermal training programme, Num. 8*.
- Kalenić, M., Marković, B., Pantić, V. i Hadži-Vuković, M., (1974). Gornji proterozoik i stariji paleozoik u profilu Resavskih Visova-Batočinska Straževica-selo Botunje. *Zaspisnici SGD, Beograd, 35-39*
- Karamata, S. (1967). *Petrogeneza*, Beograd: Građevinska knjiga.
- Karamata, S. (1970) u Malešević, M. i dr. 1974. *OGK 1:100.000. Tumač za list Kuršumlja K 34-31*, Beograd: Savezni geološki zavod.
- Karingithi, C.W. (2009). *Chemical geothermometers for geothermal exploration*. Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources, UNU-GTP, KenGen and GDC, Lake Naivasha, Kenya, November, 1-22.
- Kendall, C., Sklash, M. G., Bullen, T. D. (1995). Isotope Tracers of Water and Solute Sources in Catchments. In: *Solute Modelling in Catchment Systems*, J. Wiley & Sons, New York, pp. 261- 303.
- Krajnov, S. R. and Švec V. M. (1987). *Geochemija podzemnih voda*. Moskva: Nedra, p. 237.
- Krstić, B., Rakić, B., Veselinović, M., Dolić, D., Rakić, M., Anđelković, J. i Branković, V. (1974). *OGK SFRJ, 1:100000, list Aleksinac*. Beograd: Savezni geološki zavod.
- Krunić, O., Parlić, S., Polomčić, D., Jovanović, M. and Erić, S. (2013). Fluorine in Mineral Waters of Bujanovac Valley (Serbia, Europe). *Geochemistry International*, 51, No. 3, 205-220.

- Leonard, R. and Janzer, V. Natural radioactivity in geothermal waters, Alhambra hot springs and nearby areas, Jefferson county, Montana, Journal Research U.S. Geological Survey, vol 6, No 4, 529-540
- Lindal, B. (1973). *Industrial and Other Applications of Geothermal Energy*. In Geothermal Energy, ed. Armstead, H.C.H. Earth Science, v.12, UNESCO, Paris, p.135-148
- Lund, J.W., Freeston, D.H. and Boyd, T.L. (2011). Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review. *Geothermics*, 40, 159-180
- Mainza, D. (2006). The chemistry of geothermal waters of SW Uganda. *Geothermal training program, Iceland, Reports 12*, 219-244
- Malešević, M., Vukanović, M., Brković, T., Obradinović, Z., Karajičić, Lj., Stanisavljević, R., Dimitrijević, M. i Urošević, M. (1974). *OGK 1:100.000. list Kuršumljija K 34-31*, Beograd: Savezni geološki zavod.
- Malešević, M., Vukanović, M., Obradinović, Z., Dimitrijević, M., Brković, T., Stefanović, M., Stanisavljević, R., Jovanović, O., Trifunović, S., Karajičić, Lj., Jovanović, M. i Pavlović, Z. (1980). *OGK 1:100.000. Tumač za list Kuršumljija K 34-31*, Beograd: Savezni geološki zavod.
- Malešević, Z., Đuković, J., Gligorić, M. i Kešelj, D. (2011). Istraživanje mogućnosti izdvajanja sumpor vodonika iz oligomineralnih hipertermalnih voda. *Ecologica*, vol. 18, br. 61, 73-79.
- Marinković, G., Papić, P., Stojković, J. i Dragišić, V. (2012). Faktori formiranja sistema ugljikiselih mineralnih voda Srbije. *XIV Srpski simpozijum o hidrogeologiji, Zlatibor*, 239-244.
- Marović, M., Đoković, I., Toljić, M., Spahić, D. and Milivojević, J. (2007). Extensional Unroofing of the Veliki Jastrebac Dome (Serbia). *Geološki anali Balkanskog poluostrva*, 68. 21-27.
- Martinović, M. and Milivojević, M. (2010). Serbia Country Update. *Proceedings World Geothermal Congress 2010 Bali, Indonesia, paper no. 164*
- Martinović M. and Magazinović, S. (2010). Hydrogeothermal Potentiality of Surdulica Granitoid Massif in Serbia. *Proceedings, World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, paper no. 1172*

- Martinović M., Zlokolica Mandić, M., Vukićević, M. (2010). *Geotermalni atlas Vojvodine*, Pokrajinski sekretariat za energetiku i mineralne sirovine, Automna pokrajina Vojvodina, Republika Srbija
- Mazor, E. (2004) *Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology*. Third Edition. New York, USA: Marcel Dekker
- McLaren, S., Sandiford, M. and Hand, M. (1999). High radiogenic heat-producing granites and metamorphism- An example from the western Mount Isa inlier, Australia. *Geology*, v.27, no.8, 679-682
- Milanović, S., Vasić, Lj, Milanović, D., Stratimirović, S. (2012). Prilog poznavanju termomineralnih voda Sijarinske banje, *XIV Sprski simpozijum o hidrogeologiji*, Zlatibor, 233-337
- Milivojević, M., Ravnik, D., Kolbah, S., Jelić, K., Miošić, N., Tonic, S & Rajver, D., (1992). Yugoslavia. In: E. Hurtig, V. Čermak, R. Haenel and V. Zui (Editors), *Geothermal Atlas of Europe*. Geoforschungszentrum, Potsdam Publ., 1. Potsdam.
- Milivojević M. (2001). *Geotermijska karta, br. 11*. U Dimitrijević, M., *Geološki atlas Srbije 1:2.000.000*, Ministarstvo rudarstva i energetike Republike Srbije
- Milivojević, M. (2003). Carbogaseous mineral water in Serbia and BiH as indicator of deep hydrogeothermal resources. *European Geothermal Conference, Szeged, Hungary*.
- Milivojević, M. (2012). *Geotermologija i geotermalna energija*, Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.
- Milovanović, B. (1980). Neki aspekti metodike i rezultata geotermiskih istraživanja na primeru geotermiskog lokaliteta Ribarska Banja u Srbiji. *Zbornik referata 6. jugoslovenskog simpozijuma o hidrogeologiji i inženjerskoj geologiji, knj. 1, Portorož* 363-373.
- Milovanović, B., Stanković, S., Komatina, M., Hadžišehović, M., Zupančić, M., Miljević, N., Stepić, R. and Obelić, B. (1989). Isotopic investigation of the Surdulica geothermal system. *Radiocarbon 31(3): 893-901*.
- Misund A., Frengstad, B., Siewers, U. and Reimann, C. (1999). Variation of 66 elements in European bottled mineral waters. *Sci. Total Environ. 243/244*, 21–41.

- Mladenović, M. (1982). Najveći dovodni kanali tercijarnih magmatita-direktni donosioci geotermalne energije. *X jubilarni Kongres geologa Jugoslavije, Budva.*
- Mnjokava, T. T. (2007). Interpretation of exploration geochemical data for geothermal fluids from the geothermal field of the Rungwe volcanic area, SW-Tanzania. *Geothermal training programme, Reports 2007, Number 14, Iceland.*
- Muller, M., Jones, A., Fullea, J., Yeimans, C., Loewer, M., Ayres, L., Desissa, M. and Reay, D. (2012). *Geophysics (mostly electromagnetic and thermal modelling) in (high- and low-enthalpy) geothermal energy investigations.* Seminar on Environmental Geophysics, Geophysical Association of Ireland, Dublin, 15 February.
- Muffler, L.P.J. and Cataldi, R. (1978). Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics, v. 7, 53-89*
- Nieva, D. and Nieva, R. (1987). Developments in geothermal energy in Mexico. XII A cationic composition geothermometer for prospection of geothermal resources. *Heat Recovery Systems & CPH, Vol. 7, 243-258*
- Nieva, D., Verma, M. P., Santoyo, E., Portugal, E. and Campos, A. (1997). Geochemical exploitation of the Chioilapa geothermal field, El Salvador. *Geothermics 26 (5/6), 589-612.*
- Nikolov, J., Todorović, N., Bikit, I., Petrović Pantić, T., Forkapić, S., Mrdja, D., Bikit, K., (2013). Radon in Thermal Waters in South-Eaast Part of Serbia, Book of abstracts, 7th International Conference on Protection Against Radon at Home and at Work, Prague, Czech Republic (ISBN: 978-80-01-05324-9)
- Norden, B. and Forster, A. (2006). Thermal conductivity and radiogenic heat production of sedimentary and magmatic rocks in the Northeast German Basin. *AAPG Bulletin, v. 90, no. 6, 939-962*
- O'Brien, J.M. (2010). *Hydrogeochemical characteristics of the Ngatamariki geothermal field and a comparison with the Orakei Korako thermal area, Taupo Volcanic Zine, New Zealand,* Master thesis. New Zealand: University of Canterbury.
- Oerter, E.J. (2011). *Geothermometry of Thermal Springs in the Rico, Dunton, and West Fork Dolores River Areas, Dolores Country.* Denver, Colorado: Colorado Geological Survey, Department of Natural Resources, p.56

- Omaljev, V. (1994). Raspodela urana, torijuma i kalijuma u vulkanitima Surdulice. *Radovi Geoinstituta, knjiga 30*, 79-94.
- Omaljev, V. (1995). Raspodela alkalnih komponenti, urana i torijuma u granitoidnim stenama Surdulice. *Radovi Geoinstituta, knjiga 31*, 143-153.
- Omaljev, V. (1996a). Radioaktivni elementi u stenama, sa osvrtom na magmatske stene Srbije. *Radovi Geoinstituta, knjiga 32*, 5-24
- Omaljev, V. (1996b). Raspodela alkalnih komponenti, urana i torijuma u vulkanitima Surdulice. *Radovi Geoinstituta, knjiga 32*, 109-118.
- Omaljev, V. (1997). Raspodela urana, torijuma i kalijuma u vulkanitima leckog masiva. *Radovi Geoinstituta, knjiga 34*, 111-122.
- Papić, P. (1991). Scaling and corrosion potential of selected geothermal waters in Serbia. *Geothermal Training Programme, Reykjavik, Iceland, Report 9*, pp. 47
- Parlić, S., Krunić, O. (2005). Karta: Geološka građa Srpskog kristalastog jezgra 1:1.000.000 u B. Filipović, O.Krunić i M. Lazić (ed). *Regionalna hidrogeologija Srbije*. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.
- Pasquale, V., Verdoya, M., Chiozzi, P., Cabella, R. and Russo, D. (1997). Thermophysical properties of the Lipari lavas (Southern Tyrrhenian Sea). *Annali Di Geofisica, vol. XL, Num 6*, 1493-1503
- Perović, N., Životić, S., Maglić, K. i Milovanović, B. (1978). Toplotne osobine uzoraka stena sa geotermalnih lokaliteta u SR Srbiji. *Termika br. 3*.
- Petrović, D. i Ilić, G. (2005). Mogućnosti korišćenja energije geotermalne vode u Vranjskoj Banji. 36. *Kongres o KGH*, Beograd, 139-147
- Petrović, T., Zlokolica-Mandić, M., Veljković, N. and Vidojević, D., (2010). Hydrogeological conditions for the forming and quality of mineral waters in Serbia. In M. Birke, A. Demetriades, B. De Vivo (Guest ed). *Mineral Waters of Europe. Special Issue, Journal of Geochemical Exploration, 107(3)*, 373-381.
- Petrović, T., Zlokolica, Zlokolica-Mandić, M., Veljković, N., Papić, P., Poznanović, M., Stojković, J., Magazinović, S. (2012). Makro i mikroelementi u flaširanim vodama i vodama iz javnih vodovoda u Srbiji, *Hemijska industrija 66 (1)* 107-122

- Petrović Pantić, T. i Zlokolica-Mandić, M. (2012a). Kakvu vodu pijemo? *XIV Sprski simpozijum o hidrogeologiji, Zlatibor*, p. 329-333
- Petrović Pantić, T. i Zlokolica-Mandić, M. (2012b). Hidrogeotermalni sistem Sijarinske Banje. *IV Kongres banja, Vrnjačka Banja*, p. 154-164
- Pešut, D. (1976). *Geološki sastav, tektonska struktura i metalogenija leckog masiva*. Beograd: Zavod za geološka i geofizička istraživanja, Rasprava XIV, vol XIV, p.59
- Piper, A. M. (1953). *A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water Analysis*. Washington D.C., United States Geological Survey.
- Pollack, H. (1982). The heat flow from the continents, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci Volume 10*, 459-81.
- Pollard, P.J. (1989). Geochemistry of granites associated with tantalum and niobium mineralization. In P. Moller, P. Černý, and F. Saupe (ed.), *Lanthanides, Tantalum and Niobium* (142-165). Berlin: Springer.
- Polyak, B. G. and Smirnov, YA. B. (1968). Relationships between terrestrial heat flow and tectonics of continents. *Geotectonics*, v. 4, 205-213.
- Popović, R. (1993). Rezultati ispitivanja mineralizacije plemenitih metala u vulkanitima kod Sijarinske Banje (Južna Srbija), *Radovi Geoinstituta, knjiga 28, vol. 28*, 81-98
- Protić, D. (1995). Mineralne i termalne vode Srbije. Beograd: Geoinstitut.
- Rafferty, K. (1999). *Scaling in geothermal heat pump systems*. U.S. Department of Energy, Idaho Operations Office, p.63
- Raimann, C. and Birke, M. (ed) (2010). *Geochemistry of European Bottled Water*, Stuttgart: Borntraeger Science Publisher.
- Rakić, M.O., Hadži-Vuković, M., Kalenić, M., Marković, V. i Milovanović, Lj. (1969). *OGK 1:100.000, list Kruševac*. Beograd: Savezni geološki zavod.
- Rakić, M.O., Hadži-Vuković, M., Dimitrijević, M., Kalenić, M. i Marković, V. (1976). *OGK 1:100.000, Tumač za list Kruševac*. Beograd: Savezni geološki zavod., p. 63.
- Reed, M.H. and Spycher, N.F. (1984). Calculation of pH and mineral equilibria in hydrothermal water with application to geothermometry and studies of boiling and dilution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48, 1479-1490

- Rybach, L. (1986). Amount and significance of radioactive heat sources in sediments. In J. Burrus (ed.), *Thermal Modeling in Sedimentary Basins* (311-322), Paris: Editions TECHNIP.
- Schoeller, H. (1955). *Geochemie des Eaux Souterraines. Rev. Inst. Franc. Petrole, Paris, v.10, no 3, 181-213 and v.10, no 4., 219-246*
- Sl. glasnik RS br. 99/2009. *Uredba o merama podsticanja za proizvodnju električne energije korišćenjem obnovljivih izvora energije i kombinovanom proizvodnjom električne i toplotne energije.*
- Sl. list SRJ br.42/98 i 44/99. *Pravilnik o higijenskoj ispravnosti vode za piće.*
- Sl. list SCG br. 53/05. *Pravilnik o kvalitetu i drugim zahtevima za prirodnu mineralnu vodu, prirodnu izvorsku vodu i stonu vodu.*
- Smedley, P L. (2008). Sources and distribution of arsenic in groundwater and aquifers. In: *Arsenic in Groundwater: a World Problem.* Appelo, C A J (editor). Proceedings of an IAH Seminar, Utrecht, November 2006, pp 4–32.
- Soleša, M., Đajić, N. i Parađanin, Lj. (1995). *Proizvodnja i korišćenje geotermalne energije.* Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu
- Stanić, N., Pavlović, R. i Marković, M. (1996). Rupturni sklop i tercijarni vulkanizam Vranjskog basena. *Radovi Geoinstituta, knjiga 32, 189-198*
- Stauffer, R. E. and Thompson, J.M. (1984). Arsenic and antimony in geothermal waters of Yellowstone National Park, Wyoming, USA, *Geochimica et Cosmochimica Acta 48, 2547-2561*
- Stevanović, B. (1994). Hidrotermalne promene u vulkanitima Sijarinske Banje. *Radovi Geoinstituta, knjiga 30, 73-78*
- Šarin, A. (1988). *Uputstvo za izradu osnovne hidrogeološke karte SFRJ.* Beograd: Savezni geološki zavod.
- Terzin, V., Rakić, M.O., Bodić, D., Vukanović, M., Dimitrijević, M., Dimitrijević, M.N. i Karajičić, Lj. (1976). *OGK 1:100 000, list Vranje K 34-56.* Beograd: Savezni geološki zavod.

- Vaska, M. and Kellogg, N. (1988). Calcium carbonate scale control in geothermal wells. *Geothermal Resources Council Bulletin. vol.18, no.6*, 8-12
- Vasković, N. i Tasić, Z. (2000). *Geologija granodioritskog masiva Surdulice sa obodom*. Beograd: Savezno ministarstvo za privredu.
- Vinogradov, A. P. (1962). Srednje soderžanija himičeskih elementov v glavnih tipah izverženih porod zemnoj kori. *Geohimija, No. 7*, 555-571.
- Vukanović, M., Dimitrijević M, Dimitrijević, M.N., Karajičić, Lj. i Rakić, M.O. (1977). *OGK 1:100.000, Tumač za list Vranje K 34-54*. Beograd: Savezni geološki zavod.
- Vukanović, M., Karajičić, Lj., Dimitrijević, M., Možina, A., Gagić, N. and Jevremović, M. (1973). *Tumač za list Leskovac K 34-44*. Beograd: Savezni geološki zavod.
- Vukašinović, S. (2010). *Prikaz i interpretacija aeromagnetske karte Republike Srbije 1 : 100.000 (tumač)*. Beograd: Geoinstitut
- Vukićević, M. (1996). Radioaktivnost termalnih voda ofiolitskog pojasa zapadne Srbije, *Radovi Geoinstituta, knjiga 32*, 273-278.
- Wood, S.A. and Samson, I.M. (2000). The hydrothermal geochemistry of tungsten in granitoid environments. I. Relative solubilities of ferberite and scheelite as a function of T, P, pH, and mNaCl. *Econ. Geol.* 95, 143–182.
- WHO-World Health Organization (2011). Guidelines for drinking water quality, 4th ed. http://whqlibdoc.who.int/publications/2011/9789241548151_eng.pdf
- Živanović, V., Dragišić, V., Krmpotić, M., Tadić, D. i Atanacković, N. (2010). Hydrogeothermal Resources of Ribarska Banja Spa. *II kongres banja sa međunarodnim učešćem. Zbornik radova Vrnjačka Banja*, 149-160.
- <http://www.lenntech.com/> od 04.07.2013.
- ribarskabanja.org od 05.06.2013.
- www.prolomvoda.com od 05.06.2013.

Fondovska

- Backović, B. (1996). *Studija: Metalogenija urana Vranjskog tercijarnog basena*. Beograd: Geoinstitut.
- Burazer, M. (1993). *Izveštaj o elektromagnetnom sondiranju u području bujanovačke magnetne anomalije*. Novi Sad: NIS-Naftagas.
- Ćebić, B. (1990). *Konačni izveštaj o geološko-petrološkom i geohemijskom izučavanju tercijarnog magmatskog kompleksa Surduličke oblasti*. Beograd: Geoinstitut.
- Đoković I. i Marović M. (2003). *Izveštaj o geološkim istraživanjima šireg područja Ribarske Banje*. Beograd: Fondovski materijal, Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu
- Jovanović, M. (2008). *Elaborat o rezervama mineralnih i termomineralnih voda Bujanovačke kotline*. Beograd: Natural Mineral Waters d.o.o.
- Jovanović, M. (2012). *II Elaborat o rezervama malomineralizovanih voda izvorišta "Heba B" u Bujanovcu*. Beograd: Natural Mineral Waters d.o.o
- Martinović, M. (2009). *Hidrogeotermalna potencijalnost Mačve, magistarska teza*, Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.
- Milanović, G. (2009). *Elaborat o rezervama izvorišta termo-mineralnih voda Prolom Banje – SO Kuršumlija*. Beograd: Izdan
- Milivojević, M. i Perić, J. (1990). *Studija: Geotermalna potencijalnost teritorije SR Srbije van teritorija SAP*. Beograd: Fond Rudarsko-geološkog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.
- Milojević, M. (1991). *Izveštaj o radiometrijskim analizama bušotine VG-3 u Vranjskoj Banji*. Beograd: Geoinstitut.
- Milojević, M. (2004). *Izveštaj o rezultatima studijskih proučavanja podataka regionalnih geofizičkih ispitivanja šireg područja Ribarske Banje*. Geo-explorer, Beograd u S. Špadijer, I. Đoković, M. Marović, M. Milojević, M. Toljić, V. Živanović, 2005. *Elaborat o izvedenim hidrogeološkim istraživanjima termalnih voda Ribarske Banje u 2004. godini*. Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu.

- Milovanović, B. (1978). *Elaborat o osnovnim geotermalnim istraživanjima u području Ribarske Banje*. Beograd: Zavod za geološka, hidrogeološka, geofizička i geotehnička istraživanja.
- Milovanović, B. (2001). *Elaborat o rezervama geotermalnih voda nalazišta Ribarska Banja*. Beograd: Geozavod, p.26
- Obrenović, D. (1990). *Izveštaj o geofizičkom karotažu bušotine B-4 u Sijarinskoj Banji*. Beograd: D.P. Nafta-gas i Geofizički institut.
- Papić, P. (1994). Izveštaj o hemijskim ispitivanjima. U M. Zlokolica, Ž. Radenković, M. Mandić, P. Papić, 1994. *Elaborat o rezervama termalnih voda dela ležišta Vranjska Banja*. Geozavod – HIG, Beograd
- Petrović, T. (2010). *Termalne vode tercijarnih magmatita jugoistočne Srbije*, magistarska teza, Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.
- Protić D. (1982). *Hidrogeološka istraživanja termalnih voda Prolom banje 1981-82.*, Beograd: Geoinstitut
- Rooss-Proekt. (1993). *Sistem geotermalnog toplonabdevanja grada Vranja i Vranjske Banje*. Moskva.
- Spahić, D. (2006). *Geologija istočnog dela Velikog Jastrepca*, magistarska teza. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.
- Stanković, S. (1985). *Rezultati hidrogeoloških istraživanja termomineralnih voda Sijarinske Banje i Tulara*. Beograd: Geozavod, biro Leskovac.
- Stanković, S. (1988). *Elaborat o rezervama mineralnih i termalnih voda*. Bujanovačke kotline. Beograd: Geozavod.
- Stanković, S. i Zlokolica, M. (1993). *Elaborat o eksploatacionim rezervama termomineralnih voda izvora Sijarinske Banje*. Beograd: Geozavod.
- Špadijer, S., Dragišić, V., Đoković, I., Marović, M. i Milojević, M., Toljić, M. i Živanović, V. (2003). *Aneks Projektu osnovnih hidrogeoloških istraživanja u Ribarskoj Banji*. Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu

- Špadijer, S., Dragišić, V., Đoković, I., Marović, M., Milojević, M., Toljić, M. i Živanović, V. (2005). *Elaborat o izvedenim hidrogeološkim istraživanjima termalnih voda Ribarske Banje u 2004. godini*. Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu.
- Tasić, S. (2006). *Drugi elaborat o rezervama mineralnih voda koje se mogu eksploatisati preko bunara Yu-1 i Yu-2 u Rakovcu (SO Bujanovac)*. Beograd, Geozavod.
- Trivić, B. (2002). *Izveštaj o strukturno-tektonskim istraživanjima Ribarske Banje*. Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu.
- Vasković, N. (1998). *Petrologija kontaktno-metamorfnih stena oko granitoidnog masiva Surdulice, doktorska disertacija*. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.
- Zlokolica, M. i Ilić, B. (1994). *Aneks elaborata o eksploatacionim rezervama termomineralnih voda izvora Sijarinske Banje*. Beograd: Geozavod.
- Zlokolica, M., Radenković, Ž., Mandić, M. i Papić, P. (1994). *Elaborat o rezervama termalnih voda dela ležišta Vranjska Banja*. Beograd: Geozavod – HIG.

BIOGRAFIJA

Tanja Petrović Pantić je rođena 17.08.1981. godine u Zrenjaninu. Nakon završene Zrenjaninske gimnazije 2000. godine, upisala je Rudarsko-geološki fakultet, Univerziteta u Beogradu, smer za hidrogeologiju. U septembru 2005. godine diplomirala je na temu „*Hidrohemijske karakteristike miocenskih krečnjaka centralnog dela Beograda*“ (mentor: Prof. dr Petar Papić) sa ocenom 10 i potom upisuje postdiplomske studije u oblasti hidrogeologije.

Magistarsku tezu „*Termalne vode tercijarnih magmatita jugoistočne Srbije*“ (mentor: Prof. dr Veselin Dragišić) odbranila je jula 2010. godine.

Kao stipendista WUS-Austrija gostovala je na Department of Environmental Geosciences, University of Vienna na projektu „*Impacts of gravel ponds on the surface and groundwater quality*“ u aprilu 2009. godine.

Od 2005. do 2007. godine radila je na Katedri za primenu računara, Rudarsko-geološkog fakulteta, a potom nastavlja da radi u Geološkom institutu Srbije, danas Geološkom zavodu Srbije.

U periodu od 2005. do 2008. učestvovala je na Projektu Ministarstva nauke i zaštite životne sredine "Razvoj, GPS podržanog, sistema za nadzor i praćenje energetskih i tehnoloških parametara u površinskoj eksploataciji i sličnim privredno-tehnološkim celinama".

Od 2011. učestvuje na projektu Ministarstva nauke „*Simultana bioremedijacija i soilifikacija degradiranih prostora za očuvanje prirodnih resursa biološki aktivnih supstanci i razvoj i proizvodnju biomaterijala i dijetetskih proizvoda*“.

Dobitnik je nagrade „Milan Milićević-inženjer geologije“ za 2010. godinu.

Glavne oblasti naučnog i stručnog rada Tanje Petrović Pantić su geotermalna energija i hidrohemija.

Autor je i koautor više naučnih radova, publikovanih u časopisima međunarodnog značaja, kao i u zbornicima sa domaćih i međunarodnih kongresa.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Тања М. Петровић Пантић

број досијеа Г 308

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Хидрогеотермални ресурси Српског кристаластог језгра

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 27. 01. 2014.

Тања Петровић Пантић

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора	Тања М. Петровић Пантић
Број досијеа	Г 308
Студијски програм	хидрогеологија
Наслов рада	Хидрогеотермални ресурси Српског кристаластог језгра
Ментор	Проф. др Петар Папић

Потписани/а Тања М. Петровић Пантић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања 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 докторанда

У Београду, 27.01.2014.

Тања Петровић Пантић

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Хидрогеотермални ресурси Српског кристаластог језгра

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

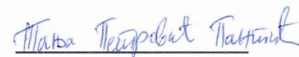
Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 27.01.2014.



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 прераде. 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 прераде. 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.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Тања М. Петровић Пантић

број досијеа Г 308

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Хидрогеотермални ресурси Српског кристалоног језгра

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 27. 01. 2014.

Тања Петровић Пантић

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора	Тања М. Петровић Пантић
Број досијеа	Г 308
Студијски програм	хидрогеологија
Наслов рада	Хидрогеотермални ресурси Српског кристаластог језгра
Ментор	Проф. др Петар Папић

Потписани/а Тања М. Петровић Пантић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања 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 докторанда

У Београду, 27.01.2014.

Тања Петровић Пантић

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Хидрогеотермални ресурси Српског кристаластог језгра

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 27.01.2014.

Марија Петровић Петровић

1. Ауторство - Дозвољавање 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. Дозвољавање 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 прераде. Дозвољавање 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. Дозвољавање 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 прераде. Дозвољавање 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. Дозвољавање 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.