

UNIVERZITET SINGIDUNUM
BEOGRAD
DEPARTMAN ZA POSLEDIPLOMSKE STUDIJE

DOKTORSKA DISERTACIJA

FIZIČKI I HEMIJSKI UTICAJI VEŠTAČKOG OBJEKTA NA
HIDROGEOLOŠKE SEGMENTE ŽIVOTNE SREDINE

MENTOR:

Prof. Dr Miroslav Popović

STUDENT: Marina Čokorilo Ilić

BROJ INDEKSA: 485036/2023

Beograd, 2024. god.

SADRŽAJ

I UVODNA RAZMATRANJA.....	1
1. Hidrogeološki sistemi	1
2. Veštački objekti - tuneli pod pritiskom (Hidrotehnički tuneli)	7
3. Međusobni uticaj tunela pod pritiskom i hidrogeoloških sistema	16
4. Problematika istraživanja.....	19
5. Hipoteze i ciljevi istraživanja.....	20
II EKSPERIMENTALNO PODRUČJE.....	21
1. Izbor reprezentativnog područja istraživanja	21
2. Karakteristike izabranog reprezentativnog područja	26
2.1. Klimatske karakteristike	26
2.1.1. Temperatura vazduha	26
2.1.2. Padavine	28
2.2. Hidrografske karakteristike	29
2.3. Geološke karakteristike istražnog područja	30
2.3.1. Tektonske karakteristike	30
2.3.2. Litostratigrafske jedinice	32
2.4. Hidrogeološke karakteristike istražnog područja	33
2.5. Detaljne geološke i hidrogeološke karakteristike duž tunela HE Pirot	37
III METODE ISTRAŽIVANJA.....	40
1. Uspostavljanje osmatračke mreže (monitoring)	41
2. Meteorološke i hidrološke metode	42
3. Hidrogeološke metode	45
3.1. Metode određivanja kvantitativnih karakteristika podzemnih voda.....	45
3.2. Metode određivanja kvalitativnih karakteristika podzemnih voda (hidrohemijske metode).....	48
4. Metoda određivanja sumarnih gubitaka u tunelu pod pritiskom	52
5. Metode određivanja stepena agresivnosti podzemnih voda na stanje betonske obloge tunela	52
IV REZULTATI I ANALIZA REZULTATA ISTRAŽIVANJA.....	53
1. Rezultati istraživanja.....	53
1.1. Rezultati meteoroloških i hidroloških istraživanja	53
1.1.1. Rezultati meteoroloških istraživanja	53
1.1.2. Rezultati hidroloških istraživanja	56
1.2. Rezultati hidrogeoloških istraživanja	61
1.2.1. Rezultati dobijenih kvantitativnih karakteristika podzemnih voda.....	61
1.2.1.1. Rezultati kvantitativnih karakteristika podzemnih voda na izvorima	62

<i>1.2.1.2. Rezultati kota gornje vode akumulacionog jezera i kvantitativnih karakteristika podzemnih voda u pijezometrima</i>	<i>65</i>
<i>1.2.1.3. Rezultati merenja sumarnih gubitaka u šahti tunelske zatvaračnice</i>	<i>67</i>
<i>1.2.1.4. Rezultati merenja nivoa i proticaja vode na kanalu izlazne građevine tunela</i>	<i>69</i>
<i>1.2.1.5. Rezultati merenja veličine dotoka u ispražnjen tunel</i>	<i>70</i>
1.2.2. Rezultati dobijenih kvalitativnih karakteristika podzemnih voda (hidrohemijske karakteristike podzemnih voda).....	71
<i>1.2.2.1 Rezultati kvalitativnih (hidrohemijskih) karakteristika podzemnih voda na izvorima</i>	<i>71</i>
<i>1.2.2.2. Rezultati kvalitativnih (hidrohemijskih) karakteristika podzemnih voda u pijezometrima</i>	<i>76</i>
<i>1.2.2.3. Rezultati merenja promene fizičko-hemijskih karakteristika voda u šahti tunelske zatvaračnice / period merenja sumarnih gubitaka.....</i>	<i>78</i>
<i>1.2.2.4. Rezultati sinhronih merenja promene temperature i elektroprovodljivosti podzemnih voda u pijezometrima u periodu merenja sumarnih gubitaka.....</i>	<i>80</i>
<i>1.2.2.5. Rezultati merenja fizičko-hemijskih parametara podzemnih voda u kanalu izlazne građevine</i>	<i>81</i>
<i>1.2.2.6. Rezultati kvalitativnih karakteristika voda uzorkovanih u tunelu</i>	<i>82</i>
1.3. Rezultati stepena agresivnosti podzemnih voda na stanje betonske obloge tunela.....	86
2. Analiza rezultata istraživanja	88
2.1. Analiza rezultata meteoroloških i hidroloških istraživanja	88
<i>2.1.1. Analiza rezultata meteoroloških istraživanja</i>	<i>88</i>
<i>2.1.2. Analiza rezultata hidroloških istraživanja</i>	<i>88</i>
2.2. Analiza rezultata hidrogeoloških istraživanja.....	90
2.2.1. Analiza rezultata dobijenih kvantitativnih karakteristika podzemnih voda	90
<i>2.2.1.1. Analiza rezultata kvantitativnih karakteristika podzemnih voda na izvorima</i>	<i>90</i>
<i>2.2.1.2. Analiza rezultata kota gornje vode akumulacionog jezera i kvantitativnih karakteristika podzemnih voda u pijezometrima</i>	<i>91</i>
<i>2.2.1.3. Analiza rezultata merenja sumarnih gubitaka u šahti tunelske zatvaračnice</i>	<i>99</i>
<i>2.2.1.4. Analiza rezultata merenja promene nivoa podzemnih voda u pijezometrima za vreme merenja sumarnih gubitaka</i>	<i>99</i>
<i>2.2.1.5. Analiza rezultata merenja nivoa i proticaja vode na kanalu izlazne građevine tunela</i>	<i>103</i>
<i>2.2.1.6. Analiza rezultata merenja veličine dotoka u ispražnjen tunel</i>	<i>106</i>
2.2.2. Analiza rezultata dobijenih kvalitativnih karakteristika podzemnih voda	111
<i>2.2.2.1 Analiza rezultata kvalitativnih (hidrohemijskih) karakteristika podzemnih voda na izvorima</i>	<i>111</i>
<i>2.2.2.2. Analiza rezultata kvalitativnih (hidrohemijskih) karakteristika podzemnih voda u pijezometrima</i>	<i>115</i>
<i>2.2.2.3. Analiza rezultata merenja promene fizičko-hemijskih karakteristika voda u šahti tunelske zatvaračnice / period merenja sumarnih gubitaka</i>	<i>120</i>
<i>2.2.2.4. Analiza rezultata sinhronih merenja promene temperature i elektroprovodljivosti podzemnih voda u pijezometrima u periodu merenja sumarnih gubitaka.....</i>	<i>122</i>
<i>2.2.2.5. Analiza rezultata merenja fizičko-hemijskih parametara podzemnih voda u kanalu izlazne građevine.....</i>	<i>122</i>
<i>2.2.2.6. Analiza rezultata kvalitativnih karakteristika voda uzorkovanih u tunelu</i>	<i>124</i>

2.2.2.6.1. Analiza fizičko-hemijskih karakteristika podzemnih voda u hidrotehničkom tunelu	124
2.2.2.6.2. Promene anjonskog i katjonskog sastava voda po stacionažama tunela	126
2.2.2.7. Komparativna analiza uzorakovanih voda u tunelu i pijezometrima u periodu remonta tunela	129
2.2.2.8. Komparativna analiza uzorakovanih voda zahvaćenih u tunelu, pijezometrima i izvorima	132
2.3. Analiza rezultata stepena agresivnosti podzemnih voda na stanje betonske obloge tunela	134
V DISKUSIJA	135
1. Definisanje konceptualnog modela sa pretpostavljenim granicama uticaja tunela pod pritiskom na geološku/hidrogeološku sredinu	135
2. Definisanje konceptualnog modela hidrogeoloških sistema na istražnom području.....	141
3. Definisanje konceptualnog modela uticaja tunela pod pritiskom na kompleksni hidrogeološki sistem	144
4. Diskusija	141
VI ZAKLJUČAK	156
LITERATURA	160

I UVODNA RAZMATRANJA

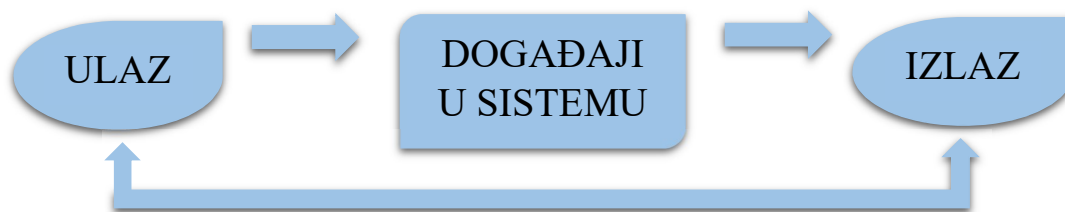
U ovom delu prikazane su teorijske podloge koje su korištene kao polazne osnove u disertaciji. Sam naziv doktorske disertacije „*Fizički i hemijski uticaji veštačkog objekta na hidrogeološke segmente životne sredine*”, uslovio je podelu teorijskog dela na tri celine:

- Hidrogeološki sistemi
- Veštački objekti - tuneli pod pritiskom (Hidrotehnički tuneli)
- Međusobni uticaj tunela pod pritiskom i hidrogeoloških sistema

1. Hidrogeološki sistemi

Hidrogeološki sistem predstavlja sistem koji je definisan određenim ulaznim elementima, karakteristikama sredine, procesima u posmatranoj sredini i izlaznim elementima, pri čemu su ulazni i izlazni elementi međusobno zavisni. Drugim rečima, to je sistem kome pripada jedna ili više hidrogeoloških jedinica u okviru nekog geološkog okruženja koje ohuhvata sve vidove prihranjivanja, isticanja, međusobne veze između susednih hidrogeoloških jedinica, kao i sve prirodne i antropogene procese koji mogu uticati na tok podzemnih voda u njima [24]. Sama definicija hidrogeološkog sistema ukazuje na kompleksnost procesa koji se u njemu odigravaju, pa je njegovo sagledavanje, kao i izučavanje u većini slučajeva veoma zahtevno i iziskuje temeljno proučavanje svih komponenti.

Kako bi se jasno definisao, a i razumeo hidrogeološki sistem, pre svega je neophodno definisati pojam sistema u širem smislu. Sistem predstavlja određeni skup međusobno povezanih pojava, u kome se međusobno delovanje odvija na pravilan način, odnosno prema određenim zakonima [42]. Jednostavnu šemu sistema i njegovog funkcionisanja prikazao je Miletić, et. al 1981. (slika I.1.) gde je sistem opisan kroz tri osnovne komponente: ulazne podatke, događaje u sistemu i izlazne podatke, tako da su ulaz u sistem i izlaz iz istog međusobno zavisni.



Slika I.1. Šematski prikaz funkcionisanja sistema

Prirodni hidrogeološki sistem definisan je svojim ulaznim i izlaznim parametrima, odnosno prirodnim zonama prihranjivanja i isticanja. To podrazumeva prirodan proces cirkulacije podzemnih voda, baziran na hidrogeološkom vodnom bilansu [82]:

$$U - I = R - (Q_{gw} + Et_{gw} + Q_{sub}) = \pm \Delta W_{gw}$$

gde je ulazna komponenta R infiltracija, dok su izlazne komponente Q_{gw} oticaj podzemnih voda, Et_{gw} isparavanje iz podzemnih voda i Q_{sub} oticaj u susedne ili dublje izdani.

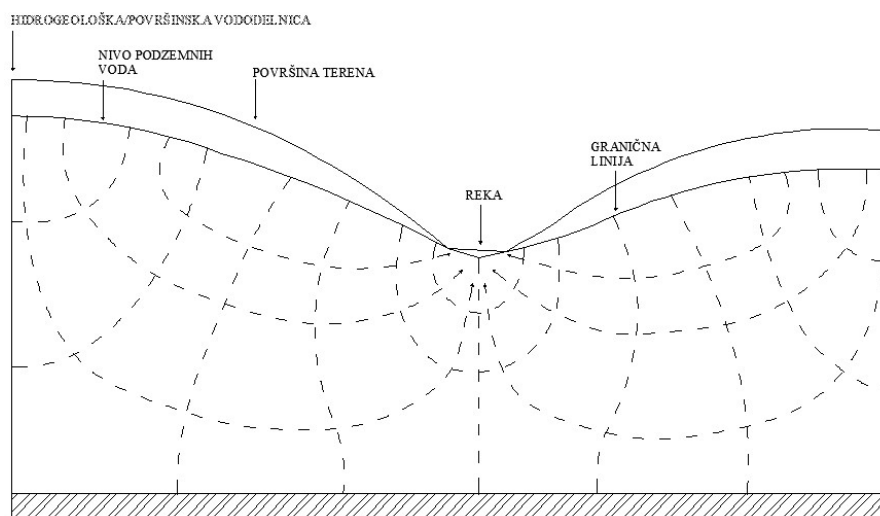
Cirkulacija podzemnih voda u hidrogeološkom sistemu odvija se unutar različitih tipova hidrogeoloških struktura. Geološko telo unutar čijih granica ostaje neprekidan karakter rasprostranjenja, uslova formiranja i hemijskog sastava podzemnih voda predstavlja hidrogeološku

strukturu [22]. Svaka hidrogeološka struktura uslovljena je tipom geološke sredine (litologijom), koja određuje karakter poroznosti stenske mase (tipovi izdani) i strukturama koje definišu granične uslove (granice geoloških tela).

Na osnovu karaktera geoloških/hidrogeoloških struktura i uslova njihovog rasprostranjenja izdavaju se dva tipa hidrogeoloških sistema: hidrogeološki sistemi formirani u basenskim strukturama i sistemi formirani u dubokim resednim strukturama.

Hidrogeološki basen predstavlja geološki prostor određene zapremine u kome podzemne vode cirkulišu iz zone prihranjivanja u pravcu zone dreniranja [29]. Ovakav geološki prostor, odnosno površina rasprostranjenja podzemnih voda ograničena je podzemnom vododelnicom i odgovara drenažnom sistemu, osim u slučaju karsta gde dolazi do značajnih odstupanja topografske i podzemne vododelnice [24]. Prostorno rasprostranjenje hidrogeološkog basena nije obavezno u saglasnosti sa neposrednim slivnim područjem, posebno kada je u pitanju duboka/regionalna cirkulacija podzemnih voda [42]. Iz navedenih definicija hidrogeološkog basena možemo zaključiti da se isti, sa aspekta cirkulacije podzemnih voda mora proučavati obazrivo, kao jedinstvena celina u određenoj geološkoj sredini i nikako uopšteno, postavljeno u određene okvire definicija. Pre svega, njegovo definisanje i razumevanje zahteva širok spektar proučavanja svih evidentnih faktora (topografija, zone prihranjivanja i isticanja, tipovi izdani, ...) koji u manjoj ili većoj meri mogu uticati na određene specifičnosti sistema i cirkulacije, sa ciljem rešavanja konkretnog problema.

U basenskim strukturama cirkulacija podzemnih voda se vrši od zona prihranjivanja do zona isticanja toka koja je pored litologije, direktno uslovljena i topografijom terena, odnosno reljefom. Hiscock 2005, šematski prikazuje strujanje podzemnih voda u dvodimenzionom vertikalnom preseku terena homogene slobodne izotropne izdani u rečnoj dolini sa simetričnom topografijom (slika I.2.).

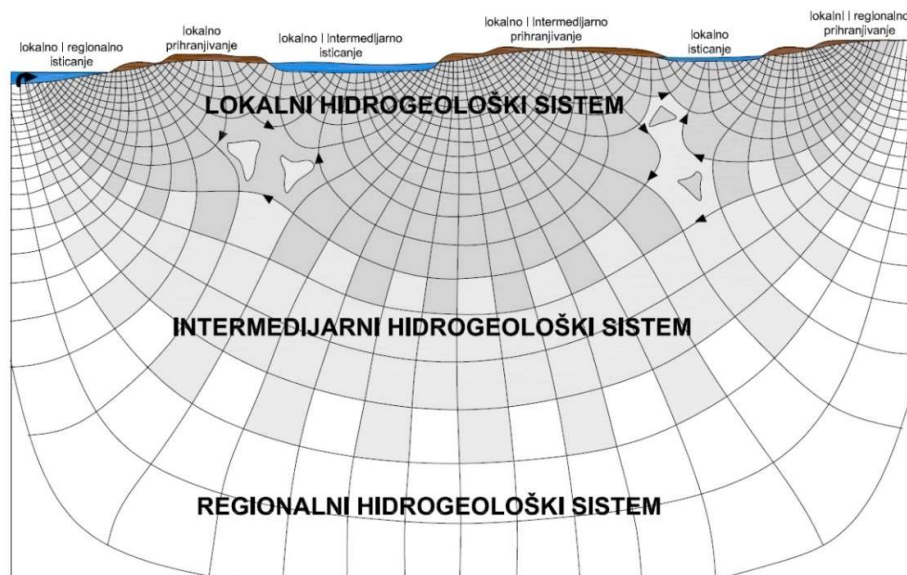


Slika I.2. Šematski prikaz strujanja podzemnih voda u dvodimenzionom vertikalnom preseku terena homogene slobodne izotropne izdani u rečnoj dolini sa simetričnom topografijom [36]

Rečna dolina je u ovom slučaju ograničena površinskom, odnosno hidrografskom vododelnicom i vodonepropusnom podinom. Cirkulacija podzemnih voda uslovljena je topografijom i odvija se iz zone prihranjivanja, koja je topografski na višem području, ka zoni dreniranja koja je uobičajno, na topografski nižim delovima terena. U zoni prihranjivanja strujnice su međusobno divergentne, dok u zoni dreniranja konverguju ka vodotoku ili izvoru [42]. Poseban uticaj topografije na proces

cirkulacije podzemnih voda vidljiv je na primeru izani sa slobodnim nivoom u uslovima humidne klime, gde se linija nivoa podzemnih voda u potpunosti prati sa topografskom linijom [29].

Topografija, kao jedan od najvažnijih faktora pri izučavanju hidrogeoloških sistema, ukoliko je izražena može usloviti formiranje više pojedinačnih lokalnih sistema cirkulacije podzemnih voda unutar hidrogeološkog basena. Formiranje serije lokalnih sistema posebno je izraženo u uslovima humidne/vlažne klime gde je ukupna godišnja količina padavina veća od sume isparavanja. U takvom slučaju, svaki lokalni sistem formira zonu prihranjivanja u hipsometrijski višim delovima terena, i zonu isticanja u hipsometrijski najnižim delovima. Formiranje više zona prihranjivanja i isticanja može usloviti postojanje kompleksnog hidrogeološkog sistema (slika I.3)



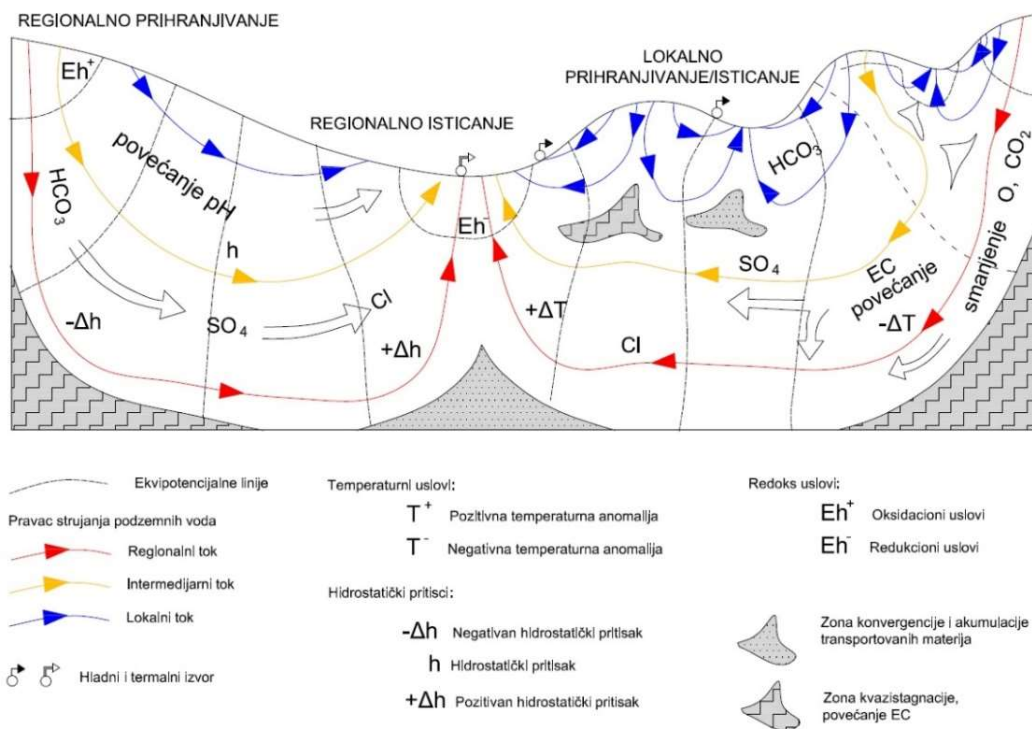
Slika I.3. Hidrogeološki sistemi sa zonama prihranjivanja i isticanja

Kompleksne hidrogeološke sisteme, pored lokalnih (plitkih) sistema, čine i/ili intermedijarni (prelazni) i regionalni (duboki) hidrogeološki sistemi. Lokalni (plitki) hidrogeološki sistemi nastaju u hipsometrijski višim delovima terena, uslovljeni su rasprostranjenjem strukturnih tipova poroznosti, dok su zone prihranjivanja i isticanja međusobno zavisne. Period zadržavanja podzemnih voda u ovakvim sistemima je relativno kratak, pa su i kvantitativne i kvalitativne karakteristike podzemnih voda direktno pod uticajem atmosferskih uslova.

U regionalnim (dubokim) hidrogeološkim sistemima formiranim u basenskim strukturama prihranjivanje sistema se odvija na hipsometrijski najvišim delovima terena, dok se isticanje odvija u najnižim delovima terena. Podzemna voda u ovim sistemima odlikuje se najstabilnijim kvantitativnim i kvalitativnim režimom, uglavnom zbog najdužeg vremena boravka u geološkoj sredini [85].

Interakcija lokalnog i regionalnog hidrogeološkog sistema može da se odvija u intermedijarnom (prelaznom) sistemu, u kom često dolazi do mešanja podzemnih voda različitih fizičko-hemijskih karakteristika [8]. Područja prihranjivanja i pražnjenja ovakvih sistema međusobno su nezavisna i odvojena su najmanje jednom litološkom jedinicom [90], što podrazumeva duži vremenski period zadržavanja vode u hidrogeološkoj sredini. Formiranje intermedijarnog sistema cirkulacije dosta je uslovljeno odnosom bočnog rasprostranjenja hidrogeološkog basena i njegove dubine. Pri povećanju vertikalne komponente (dubine do podine u basenu) u odnosu na bočno rasprostranjenje basena, dolazi do formiranja intermedijarnog sistema, koji ima najmanje jedan lokalni sistem cirkulacije između sopstvene zone prihranjivanja i zone isticanja [42].

Usled procesa cirkulacije i različitog vremena boravka podzemnih voda u geološkoj/hidrogeološkoj sredini dolazi do promene njihovog hemijskog sastava, odnosno kvalitativnih karakteristika (slika I.4). Dublja cirkulacija omogućava porast temperature podzemnih voda (usled povećanja dubine raste geotermni gradijent). Sa povećanjem dubine dolazi do porasta temperature za 1°C na svakih 33 metra dubine (geotermni gradijent), kao posledica postojanja spore cirkulacije voda u dubokoj izdani. Pored porasta temperature, sa dubinom, u podzemnim vodama se povećava i pH vrednost i elektroprovodljivost (EC). Iz tog razloga vode koje se formiraju u regionalnim/dubokim hidrogeološkim sistemima karakterišu visoke vrednosti jednog ili više navedenih fizičko-hemijskih parametara (temperature, pH vrednosti ili elektroprovodljivosti). Sa druge strane, oksidacioni uslovi (Eh^+/ORP) koji vladaju u lokalnim (plitkim) sistemima postepeno opadaju sa dubinom zaleganja podzemnih voda što uzrokuje smanjenja slobodnog kiseonika (O_2/DO) i stvaranje redukcionih uslova (Eh^-/ORP) u područjima isticanja podzemnih voda. U anjonskom sastavu, u plitkim zonama preovlađuju joni hidrokarbonata (HCO_3) koji se sa dubinom smenjuju sa sulfatima, a u najdubljim horizontima sa hloridima (sa dubinom i duž cirkulacije podzemnih voda dolazi do povećanja koncentracije SO_4 i Cl jona) [91]. Promena katjonskog sastava sa povećanjem dubine je manje izražena.

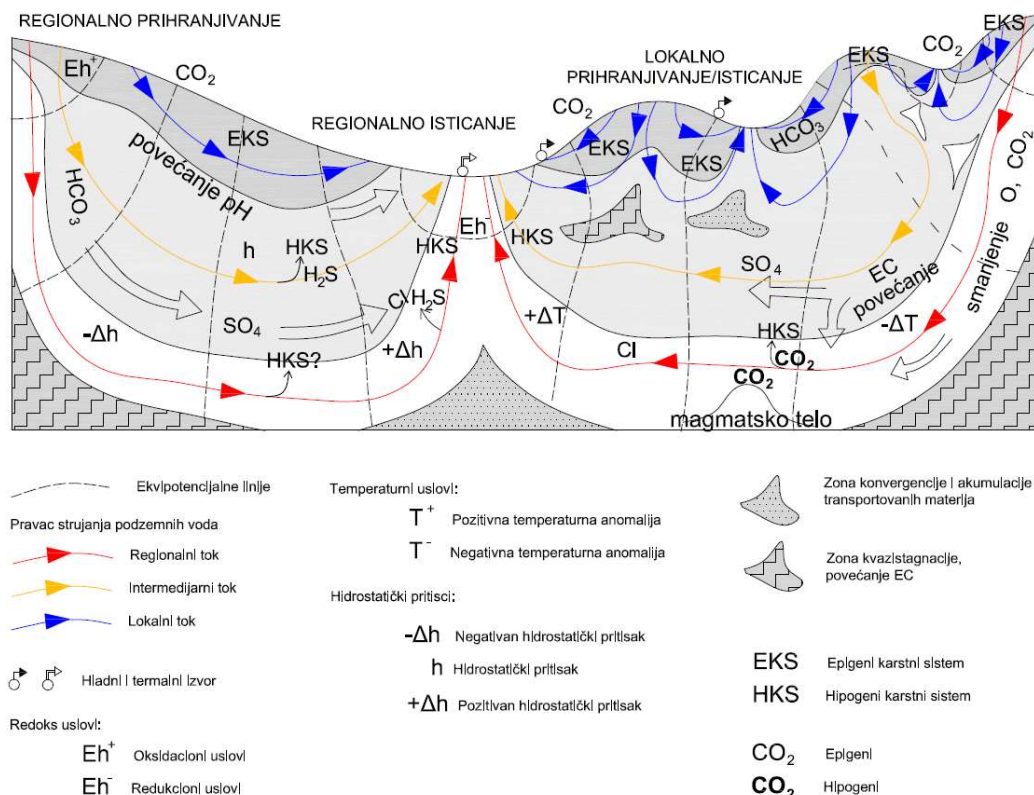


Slika I.4. Promene kvalitativnih karakteristika podzemnih voda u procesu cirkulacije kroz različite hidrogeološke sisteme (modifikovano po [89])

U plitkim (gornjim) zonama preovlađuju joni Ca i Mg , dok u najdubljim dominantno prisustvo imaju joni Na , kao direktna posledica hemijskog sastava stene i dužine boravka vode u geološkoj sredini [3]. Gornja zona je pod direktnim uticajem atmosferskih i površinskih voda ali i klimatskih faktora, što kao posledicu ima brzu promenu hemijskog sastava podzemnih voda. Usled intenzivnog procesa isparavanja dolazi do istaložavanja rastvorenih soli iz vode, posebno u sušnim periodima, i njihovog ponovnog rastvaranja u vlažnom/kišnom periodu. Pored toga, rastinje menja i sastav voda jer CO_2 koji se izdvaja iz korena biljaka ubrzava rastvaranje Ca i Mg jona [19]. Dublje zone više nisu pod uticajem spoljašnjih faktora, pa se hemijski sastav podzemnih voda u njima menja usled direktne veze sa stenom i zavisi od njenog litološkog sastava. Usled katjonske izmene, sa porastom dubine opada sadržaj Ca i Mg jona, a povećava se sadržaj Na [19].

Sa povećanjem dubine dolazi i do promena drugih komponenti hemijskog sastava kao što je sadržaj Fe, Mn, Si čija koncentracija se smanjuje, dok se sadržaj Br, K i Ra povećava. Akumuliranje transportovanih mineralnih materija, kao što su npr. HCO_3 joni vrši se u delovima gde dolazi do cirkulacije podzemnih voda u različitim smerovima ili na mestima gde dolazi do opadanja fluidnog potencijala u odnosu na transportovane fluide npr. CO_2 [91]. U ovakvim zonama konvergencije i akumulacije dolazi do taloženja jona metala u regionalnim hidrogeološkim sistemima koji se transportuju u vidu sulfatnih rastvora. U oblastima isticanja podzemnog toka sulfatni rastvori se redukuju pomoću sulfatoredukujućih bakterija, pri čemu dolazi do formiranja gasa vodonik-sulfida (H_2S). Sadržaj mikroelementa u podzemnim vodama, često može da ukaže na njihovo poreklo. Litijum i stroncijum se u malomineralizovanim podzemnim vodama nalaze u veoma malim koncentracijama, dok njihova povišena koncentracija u podzemnim vodama može da ukaže na prisustvo slanih voda. Sadržaj litijuma u morskoj/slanoj vodi iznosi oko 0.1 mg/L, dok sadržaj stroncijuma u okeanskoj vodi iznosi 8-8.5 mg/L. Stroncijum ima veliku migracionu sposobnost u hloridnim i hidrokarbonatnim vodama. Povišene koncentracije ovog jona primećene su u dubinskim hloridnim vodama, gde se obično njegove koncentracije prate sa povišenim koncentracijama Ca jona, što ukazuje na paragenezu ovih jona. Sa povećanjem mineralizacije vode, koncentracija ova dva jona se povećava, i u zoni rasprostranjenja hloridno-kalcijskih rasola sadržaj Sr dostiže 6-8 mg/L [19].

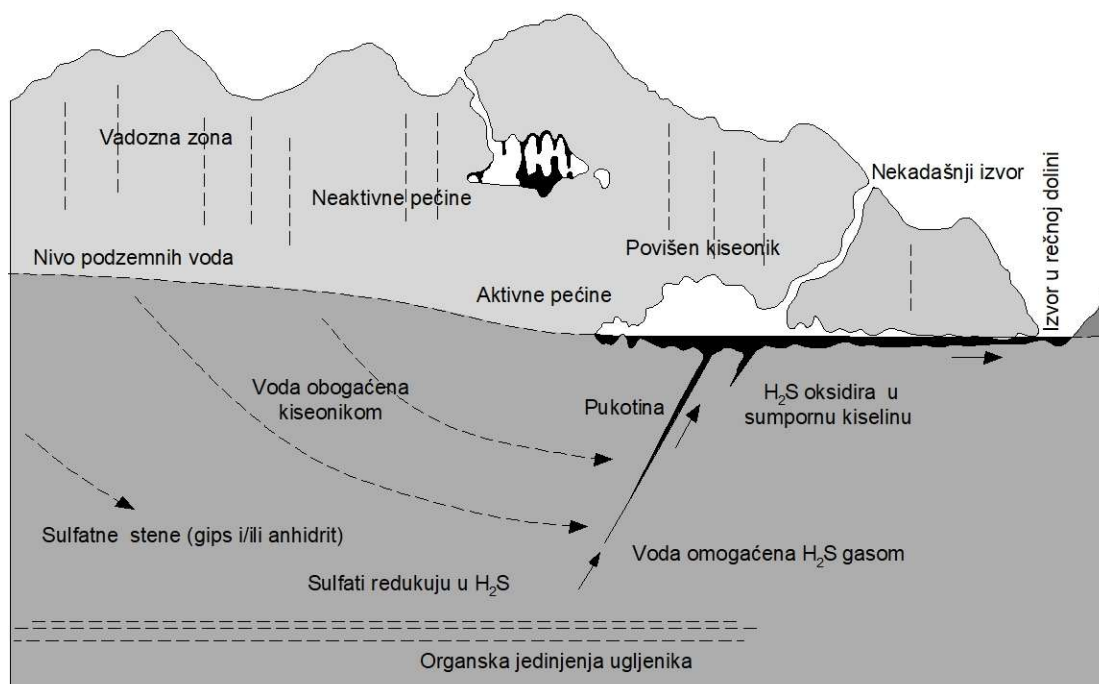
Ukoliko su hidrogeološki sistemi razvijeni u područjima sa dominantnim razvićem karbonatnih stena (karstna područja), cirkulacija podzemnih voda se odvija u dodatno složenim uslovima jer u okviru navedena tri sistema (lokalni, intermedijarni i regionalni) egzistiraju i dodatna dva karstna sistema (epigeni i hipogeni). Posmatrano kroz hidrogeološke sisteme formirane u basenskim strukturama, epigeni sistemi pretežno čine deo lokalnih sistema i/ili predstavljaju dopunjujući segment intermedijarnog (prelaznog) hidrogeološkog sistema, dok su hipogeni karstni sistemi povezani sa regionalnim ili intermedijarnim sistemom cirkulacije podzemnih voda [47] (slika I.5, slika I.6).



Slika I.5. Razlike epigenog i hipogenog karsta u okviru rasprostranjenja hidrogeoloških sistema u basenskim strukturama [89]

Epigeni karst se formira u pripovršinskim zonama terena gde se stvaranje karstnih kanala i pećina odigrava pod uticajem slobodnog ugljen-dioksida i vode, dok se stvaranje hipogenog karsta odigrava na većoj dubini. Termin hipogena speleogeneza je dosta nejasan u pogledu svog značenja. Generalno, postoje dva pristupa tumačenja ovog termina, pre svaga sa aspekta procesa formiranja hipogenih pećina:

- Ford & Williams (1989) i Worthington & Ford (1995) zalažu teoriju po kojoj se hipogene pećine formiraju usled rastvaranja karbonatnih stena pod dejstvom termalnih voda ili voda koje sadrže vodonik-sulfid (H_2S). Proces nastajanja vodonik-sulfata vezan je za prisustvo sulfatnih stena u geološkoj sredini, najčešće gipsa ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) i/ili anhidrita ($CaSO_4$) (slika I.6). U redukcionim uslovima koji su karakteristični za veće dubine, pri visokim temperaturama i pritiscima, dolazi do redukcije sulfata i izdavanja H_2S -a.
- Palmer (2000a) zalaže teoriju da hipogene pećine nastaju rastvaranjem karbonatnih stena pod dejstvom voda koje sadrže agresivne komponente nastale na većim dubinama, od CO_2 koji dolazi sa većih dubina (magmatskog porekla) ili nekog drugog bližeg kiselog izvora. Ova definicija se bazira na izvoru agresivnosti koji može biti prelazni atribut voda, i može biti transportovan iz dubljih slojeva ili stvoren unutar neke rastvorene formacije (npr. usled mešanja ili redoks procesa). Poznato je da CO_2 gas u Zemljinoj kori nastaje u procesu metamorfizma karbonatnih stena. Ugljen-dioksid koji je produkt metamorfizma ascendentno se kreće duž tektonskih zona ka površini Zemlje.



Slika I.6. Stvaranje gasa H_2S u uslovima hipogenog karsta (modifikovano po [47])

Značajno razviće hipogenog karstnog sistema, i postojanje dominantnog procesa speleogeneze u ovakvim sistemima može promeniti poroznost i vodopropusnost karbonatnih sedimenata. Kao posledica ovih procesa može doći do stvaranja zona visoke propusnosti (formiranja većih karstnih kanala i pećina) usled čega dolazi do formiranja novih zona pražnjenja, odnosno prihranjivanja.

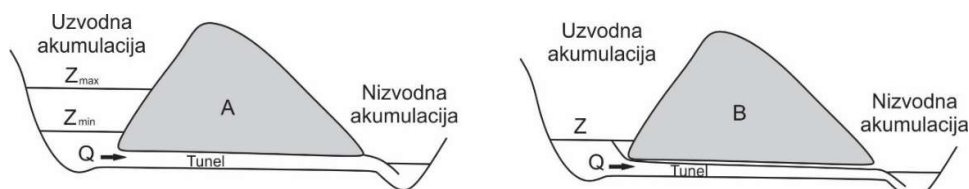
2. Veštački objekti - Tuneli pod pritiskom (Hidrotehnički tuneli)

Generalno, tuneli kao građevinski objekti, u fazi projektovanja, izgradnje i eksploatacije iziskuju detaljna geološka i hidrogeološka istraživanja i radove koji, u značajnoj meri, uslovljavaju samu tehnologiju njihove gradnje.

Tunel je reč engleskog porekla koja označava cevast podzemni prolaz koji ima veliku dužinu u odnosu na širinu poprečnog preseka, i ima uzlaz odnosno izlaz na dva kraja [88]. Grupisanje tunela se vrši na osnovu više kriterijuma (npr. nameni, dužini, poprečnom preseku, načinu izrade,...). Prema nameni dele se na saobraćajne, hidrotehničke, komunalne, specijalne namene.

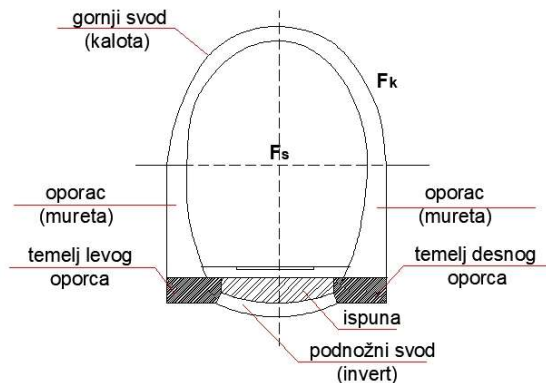
Hidrotehnički tuneli najčešće se formiraju iskopavanjem kroz stensku masu različitih karakteristika, dok se po potrebi vrši i njihovo oblaganje. U praksi, najveću primenu imaju hidrotehnički tuneli koji se grade u sastavu hidroelektrana i koriste za potrebe proizvodnje električne energije.

U hidrauličkom smislu razlikuju se dve vrste hidrotehničkih tunela: tuneli kojima se voda transportuje pod pritiskom (tuneli sa unutrašnjim pritiskom) i tuneli gde je tečenje vode sa slobodnim nivoom (gravitacioni tuneli) (slika I.7).



Slika I.7. Hidrotehnički tunel pod pritiskom - A i sa slobodnim nivoom tečenja - B

Poprečni presek tunela se sastoji od tunelske podgradne konstrukcije i svetlog otvora (slika I.8). Osnovni elementi tunelske konstrukcije su: gornji svod (kalota), oporci (mureta), temelji i podnožni svod (invert). Invert nije obavezni deo tunelske konstrukcije već se primenjuje samo kod tunela izgrađenih u lošijoj stenskoj sredini [88].



Slika I.8. Elementi poprečnog preseka podzemnog objekta/tunela [87]

Ukupna površina poprečnog preseka tunela se sastoji od površine konstrukcije (bruto površina) i površine svetlog otvora, odnosno:

$$F = F_k + F_s$$

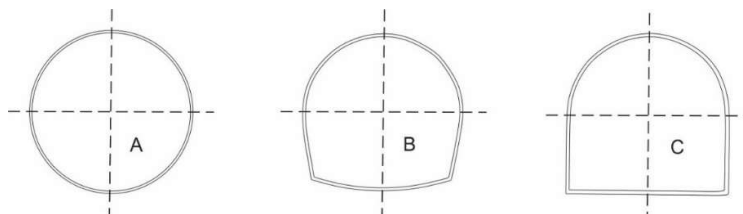
gde je:

F – ukupna površina poprečnog preseka

F_k – površina podgradne konstrukcije (gornji svod + oporci + temelji + podnožni svod + ispuna)

F_s – površina svetlog profila

Veličina i oblik poprečnog preseka pre svega zavisi od geoloških uslova terena, njegove namene i same metode gradnje. U praksi najčešće se grade tuneli kružnog, potkovičastog i uzdignuto potkovičastog oblika [49] (slika I.9).



Slika I.9. Oblici svetlog profila tunela za hidroelektrane, a-kružni, b-potkovičasti i c-uzdignuto potkovičasti [49].

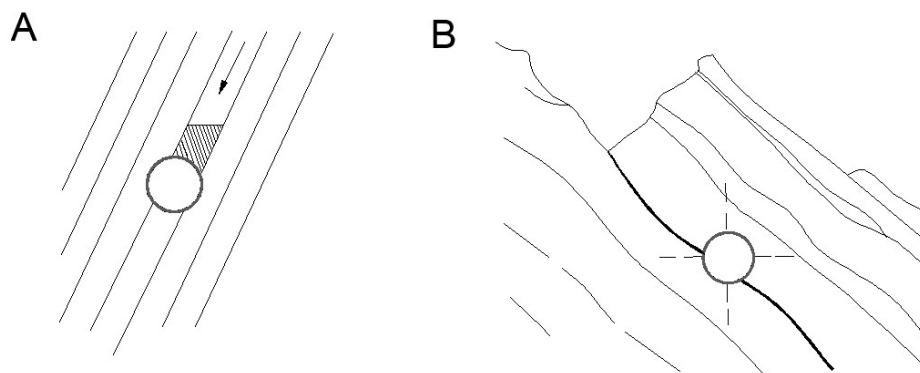
Kada se grade gravitacioni tuneli najpovoljniji je potkovičasti, dok je za tunele sa unutrašnjim pritiskom najpogodniji kružni oblik.

S obzirom da je predmetna problematika u ovom radu konkretno bazirana na hidrotehničke tunele koji se koriste u sastavu hidroelektrana i kojima se vrši transport voda pod pritiskom, akcenat je stavljen samo na ovaj tip tunela.

Tuneli kojima se transportuje voda pod pritiskom su kružnog preseka i izvode se najkraćom trasom, što u najvećem meri uslovljavaju geološki/hidrogeološki uslovi i geomehaničke karakteristike stena kroz koje prolazi. Geološki uslovi, uslovi izrade i eksploatacije tunela zavise uglavnom od geološkog sastava terena, strukturnih osobina masiva, hidroloških uslova i stepena raspadnutosti stena kroz koje treba izgraditi tunel [88]. Najveći problemi pri izgradnji, a kasnije eksploataciji hidrotehničkih tunela pored litologije, vezani su za samo oštećenje stena koje mogu biti mehaničke ili hemijske prirode. Od obima i karaktera ovih oštećenja zavisi težina izrade tunela, a kasnije i broj problema koji nastaju u fazi eksploatacije i troškova za njihovo održavanje.

Mehanička oštećenja stenske mase kod izgradnje tunela su od posebnog značaja, jer se ona javljaju u obliku pukotina duž kojih cirkuliše podzemna voda. U ovim zonama prodor većih količina podzemnih voda može izazvati ozbiljne probleme pri izgradnji tunela [60]. Mehanička oštećenja veoma često prate i hemijska oštećenja stenske mase koja nastaju usled hemijskog delovanja podzemnih voda, gasova ili temperature. Ovakva oštećenja se javljaju u rasednim zonama ili delovima terena koji su bliži površini, što predstavlja nepovoljne uslove za izgradnju tunela i treba ih izbegavati pri procesu trasiranja. Trasa tunela treba biti locirana u zdravoj i kompaktnoj stenskoj masi, što u praksi predstavlja uslov koji se često ne može postići.

Rasedne zone predstavljaju posebnu opasnost, jer duž rasednih linija postoji mogućnost da pojedini blokovi ili veća masa sklizne i ugrozi radove ili već izgrađen objekat (slika I.10 – A), dok duž raseda obično cirkulišu i veće količine podzemnih voda (slika I.10 – B). Upravo zato ovakve zone treba izbegavati i tunel locirati van njihovog uticaja [88].

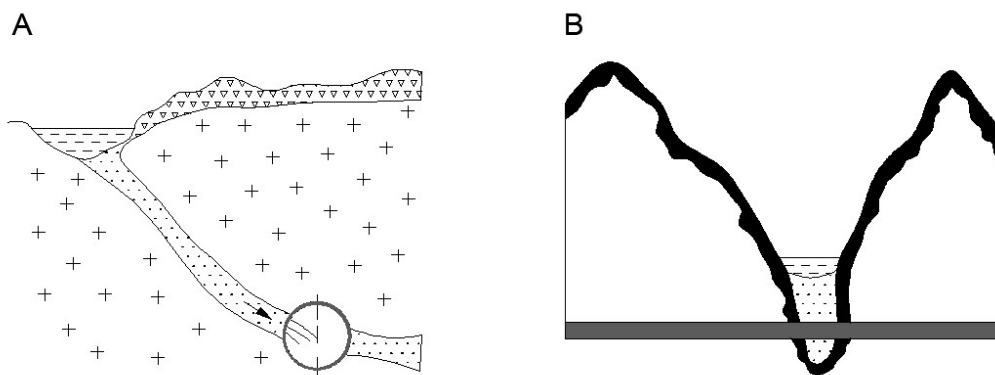


Slika I.10. A – Jednostrano opterećenje podgrade; B – Položaj tunela u odnosu na rased (Modifikovano po [88])

Probleme u toku gradnje, a posebno kasnije eksploatacije tunela, mogu izazvati i sekundarni procesi raspadanja stena. Ovi procesi su izazvani intenzivnijim kretanjem podzemnih voda koji nastaju kao posledica izgradnje samog objekta/tunela, koji u tom slučaju predstavlja podzemnu šuplinu/kanal. Vremenom, povećanjem stepena raspadanja, obično dolazi do povećanja podzemnog pritiska, prskanja podgradne konstrukcije i obrušavanja [88].

Pri izgradnji tunela, hidrogeološke karakteristike terena mogu prouzrokovati velike probleme, posebno kada se objekat gradi u heterogenoj stenskoj sredini i složenim geološkim i tektonskim uslovima. Međutim, veći problemi nastaju i u uslovima homogene i geološki mirne sredine, što je npr. slučaj gradnje tunela u glini i sredinama bogatim vodom. U fazi izgradnje tunela, kada nije pod hidrostatičkim pritiskom, objekat se ponaša kao drenaža, pa podzemna voda iz hidrogeološke sredine koja ga okružuje gravitira ka njemu. U tom slučaju, priliv vode u tunel može prouzrokovati ozbiljne probleme u fazi izgradnje [7], [37]. Najveću opasnost predstavljaju podzemne vode formirane u tektonski poremećenim zonama, jer se javljaju u velikim količinama i mogu izazvati naglo prodiranje voda u tunel.

Pored podzemnih voda, i površinske vode mogu izazvati određene probleme prilikom izgradnje tunela, posebno ako se zanemari njihova hidraulička zavisnost. Nagli prodori voda u tunel, ne tako retko onemogućavaju dalji rad i za sanaciju objekta, pored velikih materijalnih izdataka iziskuje i značajno dodatno vreme. Na slici I.11 A prikazan je slučaj kada je tunel presekao vodonosni sloj koji ima direktnu vezu sa jezerom na površini, a na slici II.11 B slučaj kada je tunel presekao zapunjeno korito reke [88].



Slika I.11. Nepovoljna – opasna situacija u kojoj tunel preseca: A – vodonosni sloj koji ima vezu sa jezerom na površini; B – zapunjeno rečno korito (Modifikovano po [88])

Izgradnja tunela u karstnim terenima predstavlja poseban izazov, pre svega zbog prisustva velikih karstnih kaverni i kanala ispunjenih podzemnom vodom, čije presecanje može izazvati velike izlive i prodore voda u tunel i tako oštetiti delove podgradne konstrukcije ili čitavih deonica [66]. Poseban problem karstnih terena jesu velika sezonska kolebanja količina podzemnih voda, kada u sušnim periodima godine (odsustva padavina) dolazi do isušivanja podzemnih kanala, dok u kišnim periodima i usled velike vodopropusnosti stenske mase dolazi do njihovog brzog „punjenja” i naglog podizanja nivoa podzemnih voda. U tom slučaju, prodor podzemnih voda u tunel može biti veoma brz, sa izuzetno velikim količinama.

Posebno problematična sredina, pri gradnji tunela predstavlja glina, glinoviti peskovi i slične stene, koje su sklone bubrenju. Kod ovakvih stena, usled bubrenja, podzemni pritisak ne samo da je veliki iz krova, već i iz bokova i poda, i vremenom se još i povećava. U takvim slučajevima podgradna konstrukcija mora biti veoma snažna i vodonepropusna. P. Milanović (2006) navodi primer problema pri izgradnji dovodnog tunela za PHE Čaplinu (Istočna Hercegovina) *kada je na jednoj deonici tunel prošao kroz veliku kavernu ispunjenu glinom, peskom i krečnjačkim blokovima, pa je na tom delu tunelska obloga znatno ojačana i oslonjena na krečnjake za koje se pretpostavljalo da su delovi osnovne stene. Puštanjem tunela u rad/eksploataciju na izvorima udaljenim oko 1300 m od mesta defekta pojavila se mutna voda, a na površini se formirao kolaps. Gubici u tunelu su porasli sa 50 l/s na oko 1000 l/s. Istražnim radovima, utvrđeno je da je u dužini 16 m tunelska cev ostala bez oslonca jer se, zbog ispiranja i sleganja glinovitog materijala, formirao veliki prazan prostor širine oko 7 m i dubine 8 do 15 m. Blokovi na koje je tunelska konstrukcija oslonjena potonuli su zajedno sa glinom. Ispiranje i sleganje materijala je izazvalo formiranje kolapsa na površini i prolom tunelske obloge u kaloti.*

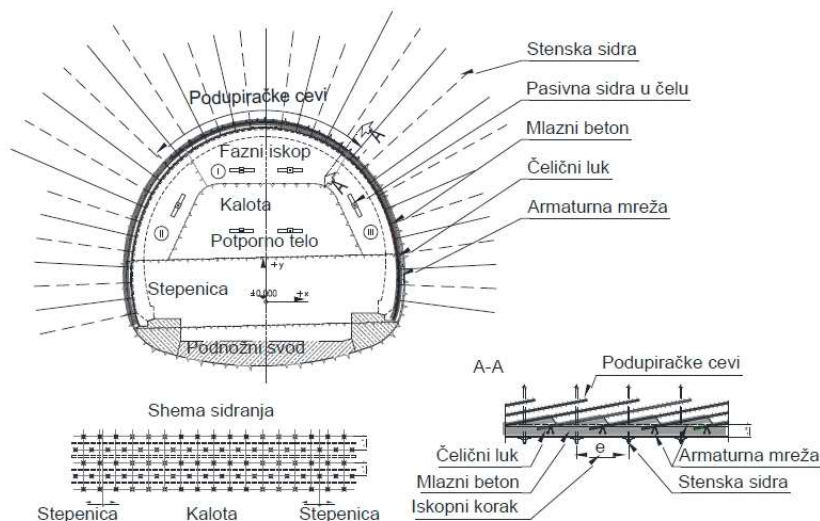
Pri gradnji tunela mogu se koristiti tri osnovne metode, odnosno načina/tehnologije izgradnje: miniranje (laki tunelski iskopi), iskopavanje tunelskom mašinom za bušenje u punom profilu TBM (Tunnel Boring Machine) (srednje teški uslovi iskopa) i iskopavanje mehanizovanim otvorenim i zatvorenim štitom (teški i vrlo teški uslovi iskopa) [88]. Izbor metode gradnje tunela, određuje i način i vrstu podgradne konstrukcije, odnosno obloge tunela, što u najvećoj meri diktira tip stenske mase.

Pri samom iskopu tunela i procesu podgrađivanja, važno je definisati stanje napona oko podzemnog otvora. Prirodna stenska masa se nalazi pod uticajem gravitacije, tj. sopstvene težine i njena napregnutost, odnosno primarno naponsko stanje je bitna karakteristika pri praćenju interakcije stenske mase sa procesom iskopa i podgrađivanja jer može doći do određenih deformacija/pomeranja. Uporedno sa iskopom, formira se podgradna konstrukcija (obloga tunela) koja ograničava deformaciju stenke mase, a preuzima sile koje se obično definišu kao pritisak stenske mase na podgradu konstrukciju. Određivanje veličine sila koje deluju na podgradnu konstrukciju predstavlja kompleksan problem koji zavisi od više faktora, kao što su npr. veličina iskopa, dubina na kojoj se nalazi iskop, krutost podgradne konstrukcije, geometrijski odnosi nepodgrađenog i podgrađenog dela iskopa, sposobnost stenske mase da mobiliše otpornost na lom [88].

Primarna/inicijalna podgrada tunela postavlja se odmah ili vrlo kratko nakon iskopavanja i pre svega treba da stabilizuje deformacije tla, odnosno obezbedi stabilnost tunela. Međutim, pored primarne obloge, obično se projektuje i sekundarna (unutrašnja) obloga kojom se povećava sigurnost sistema obloga tunela i poboljšava vodonepropusnost objekta.

Primarna podgrada se sastoji od pojedinačnih nosećih elementa koji su konstrukcioni i kao takvi samostalno ili u različitim kombinacijama treba da trajno obezbede stabilnost tunela. Zbog toga, pri samom planiranju ugradnje ovih elemenata potrebno je definisati tipski načini podupiranja, koji uključuju kombinacije standardnih nosećih elemenata [77]. Standardno podupiranje mora biti

definisano za svaki tip stenske mase a elementi treba da se odaberu shodno promenama geoloških uslova duž trase tunela, tj. prilagode uslovima sredine.



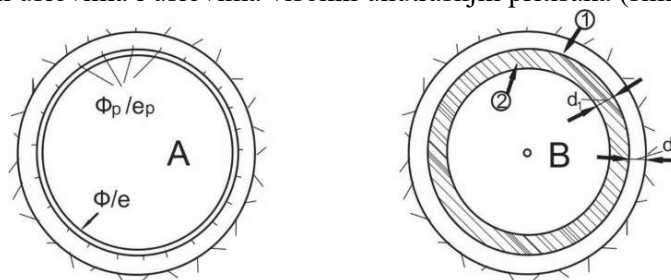
Slika I.12. Primer standardnih tipova podgrade u nepovoljnim geološkim uslovima [77]

Glavni noseći elementi primarne obloge mogu biti: mlazni cementni beton (nearmirani, armirani), stenska sidra (od čelika ili drugih odgovarajućih materijala), čelični lukovi ili pojedinačni elementi konstrukcije od drugih materijala. Izvođenje primarne obloge se obavlja brzo kako bi se sprečile, odnosno smanjile deformacije tla.

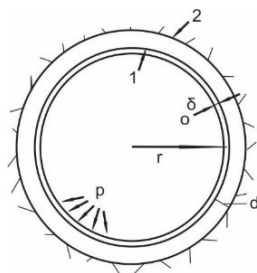
Iako se stabilnost tunela postiže primarnom podgradom, sekundarna obloga tunela značajno povećava njegovu stabilnost i vodonepropusnost. Oblaganje tunela se vrši radi preuzimanja spoljnog pritiska, dela pritiska transportovane vode i sprečavanja gubitaka vode iz tunela. Obloga zajedno sa stenskom masom kroz koju je formiran tunel čine spregnutu i složenu konstrukciju. Hidrotehnički tuneli kroz koje se transportuje voda pod pritiskom se gotovo uvek oblažu sekundarnom oblogom. Izvode se tri tipa obloga:

1. betonske (jednoslojne),
2. armirano-betonske (jednoslojne, dvoslojne, prednapregnute) i
3. kompozitne.

Betonske (jednoslojne) obloge se izvode u kvalitetnoj stenskoj masi, armirano-betonske obloge izvode se kod stena slabijih deformacionih karakteristika a kompozitne obloge (čelik i beton) se primenjuju u složenim uslovima i uslovima visokih unutrašnjih pritisaka (slika I.13 i I.14).



Slika I.13. Armirano betonske obloge: A- Jednoslojna obloga i B-dvoslojna obloga
1-beton, 2-armirani beton ili armirani prskani beton



Slika I.14. Kompozitna obloga

- 1- čelični lim
2- sekundarna betonska obloga

Zavisno od debljine unutrašnje obloge, potrebno je izvršiti odabir veličine zrna i maksimalne veličina zrna. Kod armiranih unutrašnjih obloga, preporučena maksimalna veličina zrna je 32 mm. Koristi se Portland Cement, sa prosečnom specifičnom površinom od 3.500 do 5.000 cm²/g. Zahtevi za beton (specifikacija betona, dostava svežeg betona, kontrola usklađenosti i proizvodnje) moraju da ispunjavaju zahteve određenog standarda [77].

Betonske obloge se prave od cementa, agregata (uglavnom šljunka ili peska) i vode. Mešanjem cementa sa vodom nastaje plastična masa - cementna pasta koja vremenom počinje da menja agregatno stanje i prelazi u čvrstu supstancu. Cement predstavlja mineralno hidrauličko vezivo koje nastaje mlevenjem takozvanog portland cementa, odnosno veštačkog kamenog materijala koji se dobija mešanjem pečenog krečnjaka i gline u odnosu masa 3:1. Pored krečnjaka i gline, u cementu je redovno prisutna i manja količina gipsa, uglavnom do 5% koja se dodaje za potrebe kontrole vremena vezivanja cementa. Hemijski sastav portland cementa je dosta kompleksan ali i konstantan:

Tabela I.1: Prosečni hemijski sastav Portland Cementa [6]

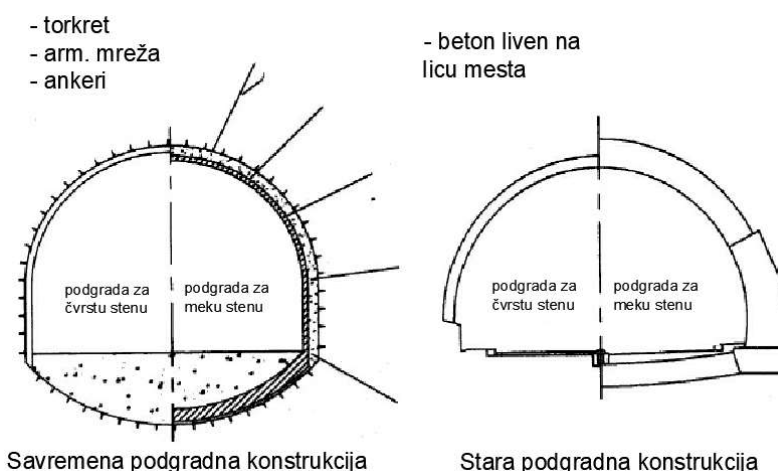
Sastav	Procenat zastupljenosti (mas%)
SiO ₂	20-26
Al ₂ O ₃	4-8
Fe ₂ O ₃	2-3
CaO	58-67
MgO	1-5
SO ₃	1-3
Na ₂ O	0-1
K ₂ O	0-1

Važna karakteristika betonske obloge jeste njena vodonepropusnost, koja konkretno u slučaju tunela pod pritiskom treba da spreči interakciju podzemnih i transportovanih tunelskih voda. Iako je u fazi izgradnje važno sprečiti dotok podzemnih voda u tunel, dosta važniji je momenat sprečavanja gubitaka vode iz tunela kada se isti stavi u radni pritisak (eksploataciju). Unutrašnje obloge se smatraju vodonepropusnim samo ako se na njima detektuju lokalna područja vlaženja. U slučaju pojave jačeg curenja vode problem se rešava procesom injektiranja.

Kao što je već prethodno rečeno, pored karakteristika stenske mase i izbor metode izgradnje tunela u velikoj meri određuje tip podgradne konstrukcije. Tako kod izrade lakih tunelskih iskopa koristi se postupak miniranja a podgrađivanje se vrši mestimično sa ciljem obezbeđivanja lokalnih ispadanja komada ili blokova stena i to sa primenom prskanog betona i lokalnog sidrenja [88].

Srednje teški tunelski iskopi koji se vrše tunelskom mašinom TBM i miniranjem kao pomoćnom operacijom, podrazumevaju sukcesiono podgrađivanje u fazama koje treba da se usklade sa fazama u kojem se izvršeni iskop održava u stabilnom stanju [37]. Podgrađivanje se vrši prskanim betonom,

armaturnim mrežama i ankerima. U slučaju ovakvih iskopa često se koristi NATM (New Austrian Tunneling Method) podgradna konstrukcija, kao racionalnija i savremenija (postiže preraspodelu napona u stenskoj masi), jer stenska masa primenom ovog postupka preuzima znatno veće sile u odnosu na tradicionalno primenjivanu oblogu od betona livenog na licu mesta. Komparacija podgrada prema NATM (savremena) i staroj (konzarvativnoj) metodi prikazana je na slici I.15 [88].

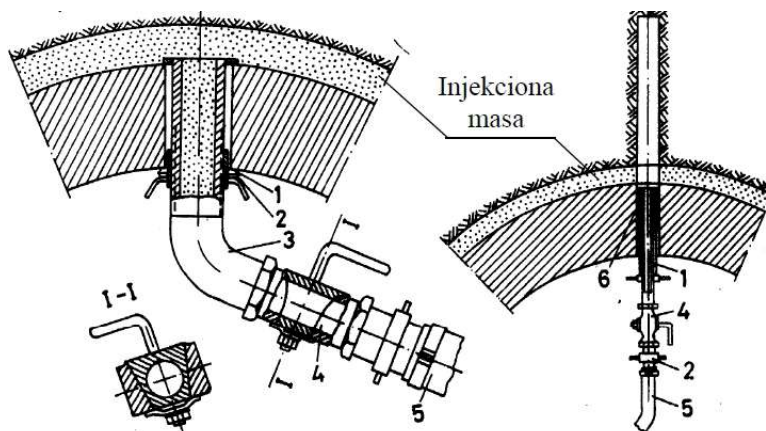


Slika I.15. Uporedni prikaz nove i stare podgradne konstrukcije [88]

U slučaju teških i vrlo teških iskopa primenjuje se metoda iskopavanja otvorenog i zatvorenog štita i montažne podgradne konstrukcije. Ovakva metoda iskopa primenjuje se u stenama male čvrstoće i gde postoji nepovoljno delovanje podzemnih voda. Podgradna konstrukcija se sastoji od montažnih elemenata (tjubinga), a otkopna mašina je najčešće tkz. krtica, odnosno mašina sa cikličnim štitom i otkopnim sistemom. Ovom metodom se postiže kontrolisano i usklađeno pomeranje štita sa količinom otkopanog tla i izbegava sleganje površine terena iznad trase tunela. Primena ovakve metode iskopa zahteva primenu montažne podgradne konstrukcije, gde su segmenti obloge izgrađeni od livenog gvožđa i armiranog betona.

Injektiranje u tunelima predstavlja izuzetno važan postupak koji treba da obezbedi dobru vodonepropusnost tunela, u delovima gde je nakon ugradnje podgradne konstrukcije/obloge detektovano veće curenje podzemnih voda. Injektiranje se vrši radi zapunjavanja zazora između obloge i stenske mase i zapunjavanja šupljina u samoj stenskoj masi, pomoću injekcionih bušotina.

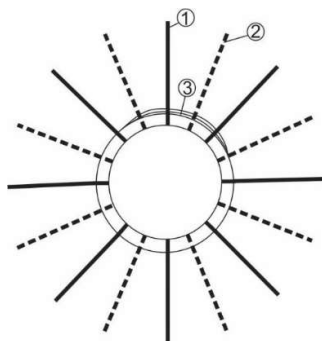
Zapunjavanjem zazora između obloge tunela i stenske mase, pored postizanja boljeg sadejstva stene i obloge, postižu se ravnomerniji pritisci na oblogu i smanjuje vodopropusnost. U ovom slučaju injeksiona bušotina prodire samo kroz oblogu tunela, dok se u slučaju zapunjavanja šupljina u samoj steni produžava do željene zone (Slika I.16), čime se postižu njene bolje fizičko-mehaničke osobine.



Slika I.16. Šema injektiranja: (1) – otvor u oblozi, (2) – muf, (3) – cev, (4) – ventil, (5) – crevo, (6) – gumeni zaptivač (2,3,4 ima naziv „paker”) [88]

Postupak injektiranja uključuje niz aktivnosti od kojih su ključne: bušenje obloge, ispiranje bušotine vodom, postavljanje pakera, testiranje vodopropustljivosti, priprema injekcione smeše (mase) i njeno utiskivanje pod pritiskom, održavanje pritiska do momenta očvršćavanja injekcione mase.

Injekciona masa se priprema u injektorima, specializovanim mašinama i sastoji se od mešavine vode, cementa, aditiva i dodataka (pesak, mleveni agregat). U tunelogradnji, generalno, koriste se 4 osnovne vrste injektiranja, zavisno od svrhe i efekata koji se žele postići: kontaktno, vezno, konsolidaciono i naponsko injektiranje. *Kontaktno* injektiranje koristi se za popunjavanje šupljina između obloge i stene, pri čemu se najčešće koristi gusta injekciona masa a injektiranje se vrši pod pritiskom od 3-4 bara. *Vezno* injektiranje primenjuje se u slučaju potrebe povezivanja obloge i stenske mase u konstruktivnu celinu, a pritisak injektiranja iznosi oko 8 bara. *Konsolidaciono* injektiranje služi za poboljšanje mehaničkih karakteristika stenske mase. Obavlja se kroz bušotine odgovarajuće dubine u stenskoj masi. *Naponsko* injektiranje najčešće se primenjuje kod hidrotehničkih tunela pod pritiskom, kada je potrebno izvršiti prenaprezanje obloge (uvećati tangente napona u oblozi) kako bi se „poništilo” dejstvo unutrašnjeg pritiska u tunelu u fazi eksploatacije [49].

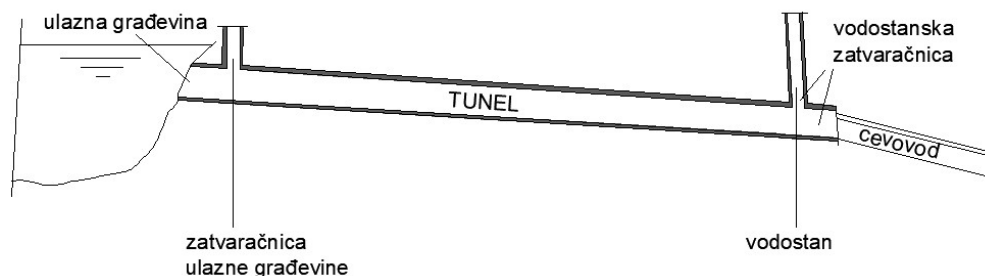


Slika I.17. Raspored injekcionih bušotina za naponsko injektiranje (1-parni profil, 2-neparni profil, 3- kontaktno injektiranje)

Injektiranje se obavlja pod pritiskom većim od 3-4 bara, između obloge i stenske mase, radi postizanja prethodnog naprezanja obloge. Prenaprezanje konstrukcije injektiranjem stenske mase injekcionom smesom oko tunela pod pritiskom vrši se pritiskom željenog inteziteta koji se prenosi i u dubinu stenske mase. Ti pritisci istovremeno deluju i na konstrukciju i u njoj proizvode naponske pritiske.

Pored injektiranja, ovim postupkom se postiže i konsolidacija i veća krutost stenske mase u okolini, smanjuje heterogenost i anizotropija stene i smanjuje vodopropusnost stene.

Izuzetno važan segment tunela pod pritiskom, pored obložene tunelske konstrukcije jesu i njegova dva prateća objekta – zahvatna (ulazna) građevina i vodostan. Zahvatne (ulazne) građevine su objekti koji služe za zahvatanje vode iz akumulacije i njeno uvođenje u tunel [21] dok vodostan ima ulogu amortizacije nepovoljnih uticaja koji nastaju usled nestacionarnog rada hidroelektrane, odnosno sprečava prenošenje vodnog udara u tunel [20]. Kako bi se obezbedila funkcionalnost tunela pod pritiskom, protok vode kroz ovaj objekat kontroliše se sistemom zatvarača. U okviru zatvaračnice ulazne građevine postoje sledeći elementi: *osnovni (glavni) zatvarač* koji se pokreće elektomotornim pogonom; *remontni (pomoćni) zatvarač* koji se nalazi ispod osnovnog zatvarača i treba da omogući montažu i demontažu osnovnog zatvarača; *aeracioni otvor* iza osnovnog zatvarača, čiji zadatka je da omogući ovazdušenje prostora nizvodno od osnovnog zatvarača u slučaju njegovog zatvaranja, čime se umanjuje opasnost od pojave kavitacije [21]. Vodostanski zatvarači se često postavljaju u okviru samog vodostana, ali je češći slučaj da se smeštaju u njegovoj neposrednoj blizini, odnosno na samom početku cevovoda. Zadatak ovih zatvarača je da brzim zatvaranjem spreče težu havariju celog hidroenergetskog postrojenja u slučaju oštećenja cevovoda [21]. Kod vodostanskih zatvarača postoje sledeći elementi: *brzi (havarijski) zatvarač* sa pogonskim uređajima koji omogućavaju automatsko zatvaranje zatvarača; *obilazna cev („by-pass“)* sa zatvaračem koja služi za punjenje praznog cevovoda pri zatvorenom havarijskom zatvaraču; *vazdušni ventil (aeracioni otvor)* u slučaju da se zatvarač realizuje neposredno u samom vodostanu.



Slika I.18. Šema osnovnih objekata tunela pod pritiskom

Neobloženi tuneli pod pritiskom izvide se vrlo retko, samo u slučajevima kada se grade u terenima izgrađenih od kompaktnih stenskih masa, kod kojih se mehaničke karakteristike, stepen ispucalosti i primarno stanje napona dobro poznati. Ako pri iskopu punog profila rotacionim mašinama ne dođe do oštećenja stenske mase na konturi u velikoj meri, neobloženi tuneli pod pritiskom mogu predstavljati prihvatljivo rešenje. Međutim, i pored ovih činjenica, pre donošenja odluke da li će tunel biti bez zaštitne konstrukcije neophodno je sprovesti i postupak merenja gubitaka vode.

3. Međusobni uticaj tunela pod pritiskom i hidrogeoloških sistema

Izgrađeni hidrotehnički tuneli kojima se vrši transport vode pod pritiskom, i pored činjenice da su opsežno sprovedeni injekcioni radovi i oblaganje samog objekta, mogu doći u interakciju sa prirodno formiranim podzemnim vodama, odnosno veštački objekat može uticati na hidrogeološke segmente žvotte sredine. Problematika interakcije podzemnih voda i ovakvih veštački formiranih objekata postaje složenija kada je tunel izgrađen u sredini složenih geoloških i hidrogeoloških uslova. Složeni hidrogeološki uslovi zahtevaju dosta veći akcenat detaljnosti pri proučavanju, posebno ako je tunel trasiran i kao takav izveden u sredini gde postoji više tipova hidrogeoloških sistema (kompleksni hidrogeološki sistemi). Definisanje tipova hidrogeoloških sistema (lokalni, intermedijarni i regionalni) su od izuzetnog značaja za sam proces funkcionisanja tunela, (eksploatacije) s obzirom na činjenicu da podzemne vode različitih fizičko-hemijskih karakteristika koje karakterišu određeni sistem mogu negativno uticati na stabilnost i vodopropusnost objekta.

Pored toga, ukoliko na istražnom području dominiraju karbonatne stene, odnosno imamo dominantano razviće karstnog sistema, cirkulacija podzemnih voda iz različitih hidrogeoloških sistema može negativno uticati na osnovnu stensku masu (rastvaranje) čime se narušava njena stabilnost, a samim tim i ugrožava stabilnost tunela. Veštačke intervencije u ovakvim terenima mogu prouzrokovati brojne probleme ekološke prirode, kao što su promene kvaliteta i kvantiteta voda, režima podzemnih i površinskih tokova [65], ne samo u fazi izgradnje već i u fazi njihove eksploatacije.

Međutim, i pored svih intervencija kojima se želi obložiti veštački izgrađen objekat –tunel pod pritiskom, nije moguće izvršiti njegovu potpunu izolaciju pa je objekat u stalnoj (manjoj ili većoj) interakciji sa geološkom/hidrogeološkom sredinom. Na koji način i u kojoj meri se odvija interakcija hidrogeološke sredine i tunela moguće je definisati samo analizom velikog broja različitih podataka, prikupljenih u fazi detaljno sprovedenih istraživanja. Pre svega to podrazumeva razmatranje sa više različitih aspekata, odnosno analizu geoloških i hidrogeoloških uslova, analizu porekla i sastava podzemnih voda, njihov uticaj na hidrogeološke segmente životne sredine i samu betonsku oblogu tunela, hidrauličkih uslova koji vladaju u takvom sistemu, priliva podzmenih voda u tunel i gubitaka vode iz tunela, itd. Proučavanjem i analizom ovakvih i sličnih problema bavili su se brojni naučnici kroz svoje radove: [90], [96], [70], [46], [1], [94], [100], [35], [55].

Ahmad & Kumar (2013) izučavali su migraciju Cl jona kroz beton, jer isti u kontaktu sa vodom može pretrpeti ozbiljna oštećenja. Tako Lin et al (2016) u svom radu ukazuje na važnost prisustva specifičnih jona u podzemnim vodama i njihov negativan uticaj na betonsku oblogu. Isti autori na osnovu simulacionih modela ukazuju da je glavni uzrok degradacije betona prisustvo geohemijski aktivnih jona kao što su joni vodonika (pH), sulfata i hlorida. Tako hloridni jon iz podzemnih voda dovodi do rastvaranja Portland Cementa. Portland Cement u reakciji sa sulfatima formira gips i tako uzrokuje dekalifikaciju cementne mase, a samim tim i gubitak njegove čvrstoće. Elgettafi (2012) ispituje poreklo slanosti podzemnih voda, i zaključuje da je glavni izvor saliniteta rastvaranje sedimenata gipsa i halita. Khaska (2013) se takođe bavi poreklom saliniteta podzemnih voda u priobalnom karstnom području južne Francuske na osnovu izotopa Sr i Cl. Izuzetno slane vode mogu ozbiljno narušiti stanje betonske obloge, odnosno degradirati je i samim tim ugroziti stabilnost tunela. Lin et al (2016), Hassani et al (2016), Yang & Wang (2011) izučavali su problematiku priliva podzemnih voda u tunel primenom različitih prognoznih modela, sa ciljem sprečavanja ozbiljnih oštećenja objekta, posebno u fazi izgradnje. Najafi & Nabipour (2012) na osnovu numeričkih modela određuju gubitke transportovane tunnelske vode, kroz metod držanja više stepenica nivoa vode u tunelu (različiti unutrašnji pritisci) u procesu pražnjenja i/ili punjenja objekta.

Rad hidrotehničkog tunela pod pritiskom može da prouzrokuje veći niz promena u prirodnoj geološkoj/hidrogeološkoj sredini. Pre svega pod utiskivanjem/pritiskom transportovanih tunnelskih (akumulacionih) voda u hidrogeološku sredinu može doći do izmene prirodnih kvalitativnih i kvantitativnih karakteristika podzemnih voda. U određenim zonama može doći do veštačkog punjenja izdani i izdizanja nivoa podzemnih voda. Mešanjem akumulacionih i podzemnih voda može doći do izmene hemijskih karakteristika prirodnih izdanih voda. Ovakav uticaj rada hidrotehničkog tunela može prouzrokovati promene izdašnosti i kvaliteta pojedinih izvora koji se nalaze u zoni mogućeg uticaja rada tunela, posebno ako se oni nalaze u karstnim područjima [15] i pripadaju lokalnim i intermedijalnim hidrogeološkim sistemima. To može ugroziti lokalno ili šire stanovništvo sa aspekta vodosnabdevanja.

Sa druge strane, podzemne vode mogu imati negativne posledice po rad i funkcionalnost tunela, u prvom redu kroz svoje agresivno dejstvo na betonsku oblogu tunela. Podzemne vode mogu sadržati veću koncentraciju rastvorenih hlorida koji izuzetno nepovoljno utiču na beton, ali i na armaturu koju korodiraju. Pored hlorida, sulfati iz podzemne vode mogu imati negativan efekat na betonsku oblogu i prouzrokovati narušavanje njene strukture. Međutim, i podzemna voda bez povišenih koncentracija određenih agresivnih jona (meke vode) može hemijski da rastvori kalcijum iz krečnjaka (agregata) i tako degradirati beton [92].

Pokazatelji na osnovu kojih se određuje moguća agresivnost podzemnih voda na betonsku oblogu tunela su [48]:

- karbonatna tvrdoća ($^{\circ}\text{dH}$)
- sadržaj vodonika, odnosno pH vrednost
- sadržaj slobodnog (agresivnog) CO_2 (mg/l)
- sadržaj magnezijuma Mg (mg/l)
- sadržaj sulfata SO_4 (mg/l)

Isti autor, vode koje imaju tvrdoću manju od 7°dH smatra agresivnim. Sadržaj vodonika, odnosno pH vrednost vode takođe određuje da li je podzemna voda agresivna po betonsku oblogu i ako je vrednost $\text{pH} < 7$ onda ona ima kiselu reakciju i spada u agresivne. Količina agresivnog (slobodnog) CO_2 , ograničava se zavisno od stepena tvrdoće vode. Kod tvrdih voda, gornja granica je 15 mg/l. Za stanje betonske obloge štetnije su tekuće u odnosu na stajanje podzemne vode. Sadržaj magnezijuma preko 60 mg/l i sulfata preko 250 mg/l u podzemnim vodama se smatra agresivno po betonsku oblogu.

Povišeni sadržaj hlorida u podzemnim vodama mogu značajno uticati na porast korozivnih proseca u betonu [32] i utiču na pojavu naponske i vodonične korozije tako što uzorkuju smanjenje pH vrednosti [76], [87]. Detektovanje agresivnog dejstva podzemnih voda na betonsku konstrukciju može se odrediti na osnovu niza indikatora [49]:

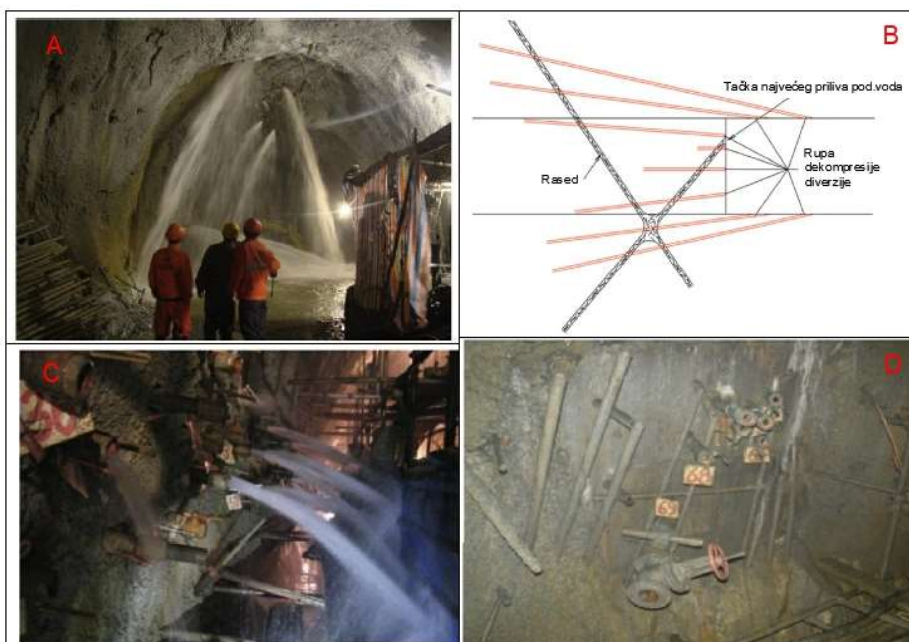
- ako dolazi do izlučivanja mekih voda kada dolazi do rastvaranja kalcijumovih jedinjenja u cementu pri filtriranju vode kroz beton;
- opštekisele agresivnosti koja nastaje u prisustvu različitih slobodnih kiselina koje rastvaraju krečnjačke agregate i kalcijumova jedinjenja u cementu.
- ugljikisele agresivnosti koja nastaje uticajem ugljene kiseline koja vrši rastvaranje kalcijumovih jedinjenja u cementu i njihovo ispiranje iz betona;
- sulfatne agresivnosti koju uzrokuje različite sulfatne soli, pod čijim delovanjem se stvaraju kristali kalcijumsulfoaluminata (hidrant gipsa), praćeno povećanjem zapremine novonastalih jedinjenja. Usled toga dolazi do mehaničkog razaranja strukture betona, sa ili bez vidljivih znakova na površini betonske konstrukcije;
- magnezijumske agresivnosti koja nastaje usled magnezijumovih kalcijumovih jedinjenja što izaziva bubrenje, razaranje i ispiranje strukture betona;

Generalno, sve podzemne vode se prema stepenu agresivnosti na betonsku oblogu tunela mogu podeliti na: slabo, umereno, jako i veoma jako agresivne. U zavisnosti od stepena i karaktera agresivnosti podzemnih voda vrši se poboljšavanjem otpornosti i postojanosti betona dodavanje posebnih vrsta cementa, odgovarajućim sastavom mineralnog agregata, hemijskim dodacima, boljom gustoćom svežeg cementa i vodonepropusnošću.

Dosadašnja ispitivanja agresivnih svojstava podzemnih voda uglavnom su bazirana na određivanju stepena agresivnosti prema kalcijum karbonatu. Za ispitivanje potencijalne agresivnosti podzemnih voda najčešće se koriste Langelier-ov indeks zasićenja (LSI) i Ryzner-ov indeks stabilnosti (RSI) [80], [56]. U specifičnim uslovima sredine, veoma često se za određivanje stepena agresivnosti podzemnih voda koriste i Larson-Skold-ov indeks (LSkl) i Indeks Agresivnosti (AI) [2], [54]. Na osnovu EU standarda EN 206-1 [31] stepen agresivnosti podzemnih voda se definiše na osnovu parametara pH, sadržaja Mg i SO_4 jona.

Pored navedenog, presecanjem većih rasednih zona duž kojih cirkulišu podzemne vode dolazi do naglih prodora vode, pod pritiskom u tunel. Kako bi se smanjio pritisak podzemne vode na tunelsku konstrukciju često se izvode sanacioni radovi sa ciljem omogućavanja njenog direktnog uticanja u tunel. Na primeru tunela Semnam (Iran) [99] ovakve sanacione radove bilo je potrebno izvršiti na deonici tunela gde je presečen veći rased u okviru karbonatnih sedimenata, usled čega je izmereni priliv podzemnih voda iznosio 750 l/s.

Zheng et al (2016) na primeru izgradnje tunela pod pritiskom Jingping II prikazan je način izvođenja sanacionih radova usled prodora podzemnih voda visokog pritiska i velike zapremine. Sanacioni radovi su vršeni injektiranjem presečenih pravaca cirkulacije podzemnih voda duž rasednih zona u kombinaciji sa kontrolisanim ispuštanjem podzemnih voda i injektiranja u povoljnom trenutku. Primenjena je tehnika diverzije (preusmeravanja) dekompresijskog injektiranja radi redukcije (smanjenja) pritiska i brzine dotoka podzemnih voda u tačkama cirkulacije (dotoka) kao i smanjenja pritiska u blizini tačaka dotoka. Na ovakav način može se postići postepeno blokiranje tačaka dotoka, dok se završno injektiranje može koristiti za potpuno blokiranje većih zona cirkulacije podzemnih voda (slika I.19).



Slika I.19.
A – Dotok podzemnih voda pod pritiskom u toku iskopa tunela.
B – Diverzija (preusmeravanje) dekompresijskim injektiranjem radi blokiranja dotoka podzemnih voda.
C – Primer koncentrisanih tačaka dotoka podzemnih voda pre i posle (D) tretmana [101].

4. Problematika istraživanja

Predmet istraživanja ove disertacije su fizički i hemijski uticaji veštačkog objekata na hidrogeološke segmente životne sredine. Veštačke objekte – tunele koji su izvedeni u čvrstim stenskim masama i sredinama različitih geoloških i hidrogeoloških karakteristika nekada je u praksi veoma teško u potpunosti izolovati. Uglavnom se u različitim vremenskim okvirima kontinuirano odvija proces interakcije veštačkog objekata sa geološkom/hidrogeološkom sredinom [21], [66], [49], [88] i tako narušava životna sredina. Posebno je teško postići efekat izolovanosti objekta u slučaju hidrotehničkih tunela kojima se vrši transport vode pod pritiskom, kod kojih se dodatno intenzivira proces interakcije sa hidrogeološkom sredinom, odnosno može doći do neželjenih efekata po životnu sredinu. Problematika postaje još složenija u slučajevima kada su navedeni objekti formirani u kompleksnim hidrogeološkim sredinama [89] duboko ispod nivoa podzemnih voda, gde su pored „plitkih“ podzemnih voda (lokalni sistemi) prisutni i/ili intermedijarni i/ili regionalni hidrogeološki sistemi koje često karakterišu podzemne vode povišene mineralizacije i/ili temperature [62]. Ukoliko su hidrogeološki sistemi razvijeni u terenima sa dominantnim razvićem karbonatnih stena (karstna područja) cirkulacija podzemnih voda se može odvijati u još složenijim uslovima, jer pored postojećih sistema (lokalni, intermedijarni i/ili regionalni) egzistiraju i dodatna dva karstna sistema - epigeni i hipogeni [47].

Složenost hidrogeoloških uslova značajno utiče na stepen rizika u pogledu razvoja negativnih efekata, koji se mogu odnositi na životnu sredinu ali i na samu funkcionalnost tunela. Vode koje se transportuju hidrotehničkim tunelom pod pritiskom se mogu injektirati u geološku sredinu, što izaziva narušavanje prirodnog stanja podzemnih voda. Pre svega može doći do izmene prirodnih pravaca cirkulacije podzemnih voda pri čemu dolazi do promene njihovih kvalitativnih i kvantitativnih karakteristika, odnosno potencijalno negativnih posledica po prirodnu geološku/hidrogeološku sredinu, tj. hidrogeološke segmente životne sredine.

Negativni efekti na kvantitativne karakteristike se pre svega odnose na izmenu prirodnog režima podzemnih voda, izdizanjem u odnosu na prirodno stanje nivoa podzemnih voda, kao i njihovim bočnim „potiskivanjem“, što stvara potpuno novi hidraulički režim. U kvalitativnom pogledu, negativni efekti se ogledaju u „razređivanju“, odnosno mešanju podzemnih voda sa vodama iz tunela, koje su najčešće niže mineralizacije u odnosu na podzemne vode. Vode povišene mineralizacije mogu biti prvi indikator prisustva voda koje sadrže povišen sadržaj Cl i/ili SO₄ jona koje mogu imati agresivno dejstvo kako na hidrogeološku sredinu tako i na sam veštački objekat.

Pored navedenog, sam režim rada hidrotehničkog tunela, odnosno radni pritisak koji se postiže u datom trenutku, dodatno intenzivira procese interakcije sa hidrogeološkom sredinom. S jedne strane, usled naglih promena pritisa vode u tunelu u zonama sa izraženom hidrauličkom vezom sa podzemnim vodama može doći do utiskivanja voda iz tunela u hidrogeološku sredinu kao i prodora podzemnih voda u tunel. S druge strane, u uslovima mirovanja vode, odnosno stabilnog pritiska, prethodno utisnute vode povišene mineralizacije dodatno mogu agresivno uticati na životnu sredinu, odnosno geološku/hidrogeološku sredinu ali i betonsku oblogu tunela.

5. Hipoteze i ciljevi istraživanja

Opšta hipoteza od koje se krenulo u istraživanje predmetne problematike je: *"Fizički i hemijski uticaji veštačkog objekta na hidrogeološke segmente životne sredine"*.

Posebna hipoteza koja proizilazi iz opšte je: *„Hidrotehnički tuneli mogu uticati na prirodno stanje podzemnih voda, odnosno da podzemne vode mogu imati uticaj na hidrotehničke tunele (u interakciji su)“*.

Pojedinačne hipoteze koje su korištene u disertaciji su:

- Voda transportovana kroz hidrotehnički tunel veštački prihranjuje prirodne izdani, što izaziva promenu kvantitativnih i kvalitativnih karakteristika podzemnih voda.
- Podzemne vode prodiru u hidrotehnički tunel, što potencijalno utiče na stanje betonske obloge i stabilnosti tunela.

Cilj istraživanja je definisanje i uspostavljanje osnovnih principa istraživačkog procesa kojima je moguće izvršiti procenu i prognozu rizika uticaja veštačkog objekata na hidrogeološke segmente životne sredine, ali i geološke/hidrogeološke sredine na objekat/tunel. Na osnovu detaljno uspostavljene monitoring mreže na svim osmatračkim pojavama i objektima, i prikupljenih podataka o kvalitativnim i kvantitativnim karakteristikama podzemnih voda i voda koje se transportuju tunelom cilj je:

- Definisanje zavisnosti veštačkog objekta i životne sredine sa aspekta promena kvantitativnih i kvalitativnih karakteristika voda u periodima kada je tunel bio u različitom režimu rada, odnosno u funkciji/pod pritiskom i tokom njegovog remonta/prazan kako bi se detektovane zone koje su direktno pod antropogenim uticajem.
- Definisanje pretpostavljenih granica uticaja tunela na životnu sredinu kako bi se markirao radijus dejstva tunela u radnom pritisku na hidrogeološku sredinu, odnosno odredila potencijalna poroznost stenske mase u koju se tunnelska voda utiskuje.
- Definisanje tipova hidrogeoloških sistema zbog definisanja kompleksnog hidrogeološkog sistema na istražnom području, odnosno detektovanja lokalnih (plitkih), intermedijarnih (prelaznih) i regionalnih (dubokih) hidrogeoloških sistema.
- Uspostavljanje konceptualnog modela hidrogeoloških sistema na istražnom području kao i analiza kvalitativnih karakteristika podzemnih voda radi definisanja uslova u kojima je u okviru karbonatnih sedimenata potencijalno došlo i do razvika hipogenog karsta sa ciljem utvrđivanja antropogenog uticaja na intenzivnije razvike ovog procesa (hipogene speleogeneze) u „plićim“ delovima terena pod uticajem pritiska transportovane tunnelske vode.
- Definisanje konceptualnog modela uticaja tunela pod pritiskom na kompleksni hidrogeološki sistem radi prikaza sveobuhvatne analize svih prikupljenih podataka o geološkim, hidrogeološkim karakteristikama terena, kao i kvantitativnim i kvalitativnim karakteristikama podzemnih voda kako bi se prikazao stepen interakcije transportovane tunnelske vode i podzemnih voda, u periodima radnog režima tunela i periodu kada je objekat van funkcije. Stepem interakcije definiše i najkritičnije zone hidrogeološke sredine ali i tunela, koje zahtevaju sanaciju i ublažavanje negativnih posledica kako bi životna sredina i objekat bili održivi.

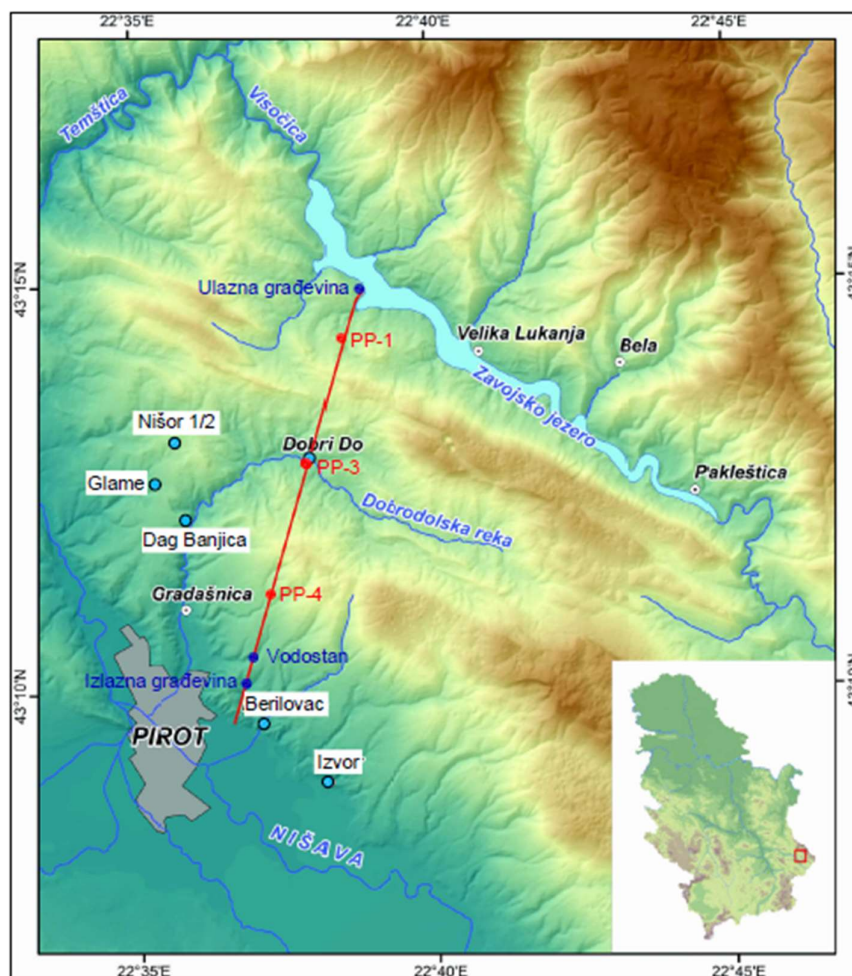
Pored navedenih osnovnih ciljeva doktorske disertacije, poseban cilj istraživanja je vezan za prisustvo podzemnih voda jedinstvenog tipa Na-Cl-SO₄ tipa na istražnom području. Poreklo ovog tipa voda vezuje za prisustvo evaporita: halita, anhidrita i/ili gipsa koji nisu otkriveni na površini terena kao ni u procesu gradnje tunela, tokom iskopa i po svom hemijskom sastavu spadaju u visoko agresivne vode.

II EKSPERIMENTALNO PODRUČJE

U cilju definisanja stepena interakcije podzemnih i akumulacionih voda koje se transportuju tunelom pod pritiskom i analize njihovog međusobnog uticaja, u eksperimentalnom delu doktorske disertacije primenjen je niz različitih metodoloških postupaka. Metodologija istraživanja primenjena je na istražnom području složenih geoloških i hidrogeoloških karakteristika, gde pored tunela pod pritiskom HE Pirot egzistira i kompleksni hidrogeološki sistem. Uspostavljene su i procedure koje su podrazumevale uključivanje više metodskih postupaka i istraživačkih principa. Postavljanjem osnovnih principa istraživačkog rada bilo je moguće utvrditi stepen interakcije podzemnih voda i voda transportovanih tunelom pod pritiskom u cilju smanjenja rizika negativnog uticaja kako na samu prirodnu životnu sredinu, odnosno hidrogeološku sredinu, tako i na veštački objekat/tunel.

1. Izbor reprezentativnog područja istraživanja

Istražno područje smešteno je u jugoistočnoj Srbiji, u centralnom delu Stare planine i teritorijalno pripada opštini Pirot. Odlučujući kriterijum za odabir ovog područja kao reprezentativnog za izučavanje problematike interakcije podzemnih voda i voda transportovanih tunelom pod pritiskom, u osnovi je bila činjenica da je hidrotehnički tunel HE Pirot trasiran i izveden u sredini složenih geoloških i hidrogeoloških uslova (slika II.1). Istraživanja koja su vršena tokom 2014.godine sa ciljem utvrđivanja stanja hidrotehničkog tunela HE Pirot i njegovog uticaja na podzemne vode, od strane prof. dr Igora Jemcova i saradnika bila su dobra polazna osnova za sprovođenje detaljnih istraživanja na razmatranom području sa zadatkom izučavanja predmetne problematike [39].



Slika II.1. Geografski položaj istražnog područja sa prikazom trase tunela HE Pirot i njegovih pratećih objekata

Analizirano područje istraživanja obuhvatilo je zonu hidrotehničkog tunela HE Pirot i zonu potencijalnog uticaja ovog objekta na prirodni hidrogeološki sistem.

Prirodni hidrogeološki sistem, kao što je već navedeno u Poglavlju I, definisan je svojim ulaznim i izlaznim parametrima, odnosno prirodnim zonama prihranjivanja i isticanja. Na razmatranom području, definisanje prirodnog režima podzemnih voda vršeno je na 7 izvora (Berilovac, Izvor, Nišor 1/2, Glame, Dobri Do, Dag Banjica), Dobrodolskoj reci, 3 pijezometra duž trase tunela ali i u samom hidrotehničkom tunelu, u periodu kada je objekat bio van funkcije (period remonta). Najreprezentativniji podaci dobijeni osmatranjima na svim hidrogeološkim objektima i pojavama, za utvrđivanje prirodnog stanja hidrogeološkog sistema predstavljao je kraj perioda kada je tunel bio van funkcije, odnosno period neposredno pre ponovnog punjenja objekta. S obzirom na činjenicu da je tunel u funkciji još od 1990. godine i da pre njegove izgradnje nisu vršena (ili nisu bila dostupna) osmatranja na većini razmatranih hidrogeoloških pojava i objekta, definisanje prirodnog režima hidrogeološkog sistema moguće je bilo jedino analiziranjem svih osmotrenih podataka u periodu kada je tunel u funkciji i van funkcije, posmatrano u istom osmatračkom vremenskom periodu. Prethodno sprovedena geološka i hidrogeološka istraživanja tokom 2014. godine od strane prof. Jemcova i saradnika, pokazala su da razmatrano područje, smešteno na kontaktu dve tektonske jedinice regionalnog značaja (Getikuma i Danubikuma) složenih tektonskih i geoloških karakteristika, predstavljene sistemima navlaka ukazuju i na postojanje dosta složenih hidrogeoloških uslova.

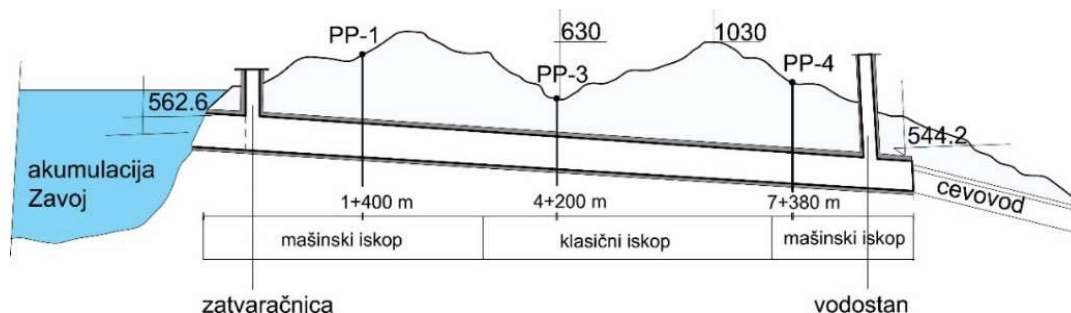
Hidrogeološka istraživanja ukazala su na prisustvo različitih hidrohemijskih tipova voda, što je svakako bio indikator postojanja kompleksnog hidrogeološkog sistema na istražnom području.

Veoma važan segment u procesu razumevanja i jasnijeg sagledavanja eksperimentalnog područja, sa prikazom prostornog položaja svih osmatranih hidrogeoloških pojava i objekata kao i samog tunela pod pritiskom (slika II.1) jeste njihov visinski položaj, odnosno nadmorska visina/kota terena na kojoj se analizirani objekat ili pojava nalazi. Iz navedenih razloga dat je tabelarni prikaz sa z koordinatama svih objekata i pojava koji su razmatrani na ovom istražnom području (tabela II.1).

Tabela II.1: Prikaz apsolutnih kota terena (mnm) svih razamtranih objekata i pojava (plavo – hipsometrijski ispod srednje kote tunela, crveno - hipsometrijski iznad srednje kote tunela)

RB	Vrsta objekta/pojave	Naziv	Apsolutna kota terena (m)
1	izvor	Izvor	409
2	izvor	Berilovac	406
3	izvor	Nišor 1	776
4	izvor	Nišor 2	734
5	izvor	Glame	691
6	izvor	Dobri Do	623
7	izvor	Dag Banjica	469
8	pijezometar	PP-1	770
9	pijezometar	PP-3	630
10	pijezometar	PP-4	770
11	tunel	ulazna građevina	562
12	tunel	izlazna građevina	544
13	tunel	vodostan	540
14	tunel	srednja kota	552
15	tunel	kota vode u zatvaračnici kada je tunel pod pritiskom/radni pritisak u osmatračkom periodu	606
16	tunel	kota min. uspora	568
17	tunel	kota max. uspora	645

Sistem hidroelektrane Pirot, pored hidrotehničkog tunela čine i brana Zavoj, akumulacija Zavoj, dovodni cevovod i mašinska zgrada sa pratećim objektima. Brana Zavoj je nasuta brana sa glinenim jezgrom, visine 86 metara, dužine krune 29 m i širine krune 10 m. Ukupna zapremina akumulacije Zavoj iznosi 170.000.000 m³. Na oko 6 km nizvodno od brane voda se preko ulazne građevine, dovodnog tunela i cevovoda (dužine 2.000 metara) dovodi do mašinske zgrade i elektrane koja je smeštena u selu Berilovac pored Pirota gde se koristi za pokretanje turbina i proizvodnju električne energije. Dalje se vode odvođe kanalom dužine 5 km u kompenzacioni basen zapremine 650.000 m³, a potom uvode u reku Nišavu. Dužina dovodnog tunela je 9093 m, prečnika 4.5 m i površine preseka 24 m², dok nagib tunela iznosi 2.52 ‰ (slika II.2). Prateći objekti dovodnog tunela su tunelska zatvaračnica visine 57 metara i promenljivog prečnika od 8 do 16 m i vodostan visine 97 m i promenljivog prečnika od 8 do 15 m. Vreme rada hidroelektrane iznosi 4-5 sati u toku dana (1400 sati godišnje).



Slika II.2. Podužni profil tunela HE Pirot, sa prikazom tipa iskopa i položaja pijeziometara na trasi tunela [17]

Duž trase tunela izvedena su tri pijeziometra PP-1, PP-3 i PP-4, sa filterom koji je lociran u zoni tunela (tabela II.2).

Tabela II.2: Osnovne karakteristike i litološki sastav pijeziometara PP-1, PP-3 i PP-4

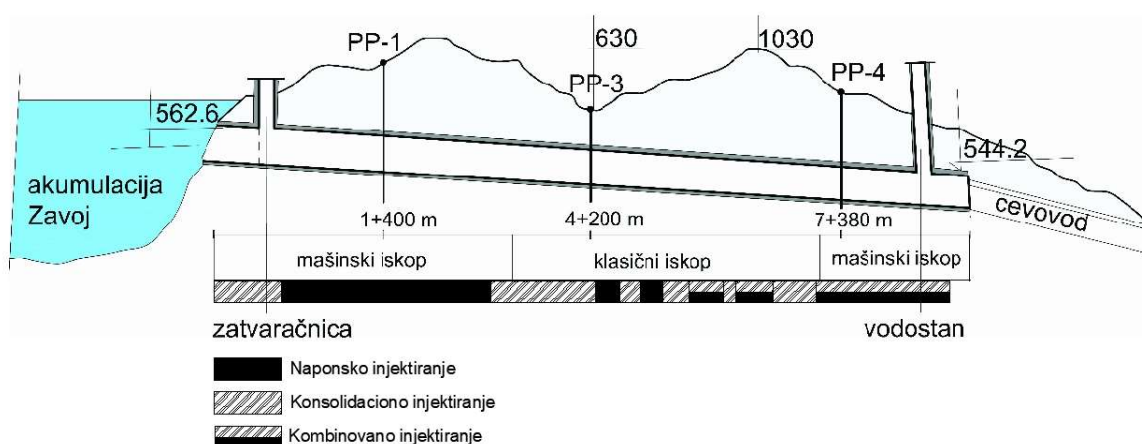
Pijeziometar	Ukupna dubina (m)	Dubina bušenja (m)	Litološki sastav
PP-1	216	0-8	deluvijum
		8-27.5	pešćar i laporoviti pešćar
		27.5-82.7	sitnozrni, tanko slojeviti pešćari sa alevrolitima i glincem
		82.7-156.25	laporci, laporoviti krečnjaci, laporoviti pešćari
		156.25-180	laporoviti krečnjaci
		180-216	krupnozrni pešćari, debelo slojeviti
Pijeziometar	Ukupna dubina (m)	Dubina bušenja (m)	Litološki sastav
PP-3	83	0-1	deluvijum
		1-72.6	slojevit tamno-sivi laporac, sa žutim krečnjakom, ispucao
		72.6-83	laporac i laporoviti krečnjak
Pijeziometar	Ukupna dubina (m)	Dubina bušenja (m)	Litološki sastav
PP-4	231	0-5	deluvijum
		5-120	slojeviti krečnjaci, sa proslojcima laporovitih krečnjaka
		120-231	slojeviti i bankoviti krečnjaci, u pukotinama glina i drobina

Istražno područje je odabrano kao veoma specifično i pogodno za razmatranje zadate problematike pre svega zbog kompleksnih geoloških i hidrogeoloških uslova sredine, složene strukture samog hidrotehničkog objekta (tunela) u kome se voda transportuje pod maksimalnim pritiskom (cca 8 bara, max. kota uspora) kao i činjenice da je sam tunel izveden na dva načina – mašinskim i klasičnim iskopom. Ulazni deo tunela (od stacionaže 0+000 do 3+120 m) i završni deo tunela (od stacionaže 7+060 do 9+093 m) izveden je novaustrijskom tunelskom metodom (NATM), odnosno mašinskim iskopom. Središnji deo tunela, segment od stacionaže 3+120 do 7+060 m izveden je mehanizovano korišćenjem TBM mašine, odnosno klasičnim iskopom (tjuring).

Različiti način iskopa uslovio je i različito oblaganje tunela. U početnom i završnom delu tunela korišćena je betonska obloga, dok su u središnjem delu tunela, gde je vršen mašinski iskop, ugrađivani prefabrikovani montažni armirano-betonski segmenti. Debljina obloge iznosi 25 cm. Za pravljanje betona armirano-betonskih segmenata, korišćen je cement Novi Popovac 15z 45B, voda i mineralni agregati – rečni iz Južne Morave (separisan u frakciji 0-4 mm sep. „Mramor”) i drobljeni iz kamenoloma „Nišor” (separisan u frakciji 8-16 mm). Kao aditivi (dodaci) betonu korišćen je „Superfluid” - „Ading” – Skoplje. Uloga „Superfluida” bila je da poboljša ugradljivost betona i poboljša njegov kvalitet.

U samom tunelu, tokom iskopa, rađeno je injektiranje i to konsolidaciono, naponsko i kombinovano injektiranje. Ukupna dužina bušotina kojima je vršeno injektiranje iznosi 100.000 metara, dok je za injektiranje utrošeno 21.500 tona injekcione mase. Injektiranje je izvršeno gotovo duž celog tunela, odnosno u dužini od 8880 m (od ukupne dužine od 9093 m) od samog „nultog” metra (ulazna građevina) pa do gotovo 9-og kilometra kada se iskopom ušlo u pliocenske sedimente (dobro zbijene gline). Vrste injektiranja koje su korišćene u tunelu HE Pirot vršene su po sledećim stacionažama (slika II.3):

0+000 – 0+810 m	-----	Konsolidaciono injektiranje
0+810 – 3+340 m	-----	Naponsko injektiranje
3+340 – 4+600 m	-----	Konsolidaciono injektiranje
4+600 – 4+900 m	-----	Naponsko injektiranje
4+900 – 5+150 m	-----	Konsolidaciono injektiranje
5+150 – 5+410 m	-----	Naponsko injektiranje
5+410 – 5+730 m	-----	Konsolidaciono injektiranje
5+730 – 6+150 m	-----	Kombinovano injektiranje
6+150 – 6+300 m	-----	Konsolidaciono injektiranje
6+300 – 6+750 m	-----	Kombinovano injektiranje
6+750 – 7+270 m	-----	Konsolidaciono injektiranje
7+270 – 8+880 m	-----	Kombinovano injektiranje



Slika II.3. Podužni profil tunela HE Pirot, sa prikazom primenjene vrste injektiranja na određenim stacionažama

2. Karakteristike izabranog reprezentativnog područja

2.1. Klimatske karakteristike

Za potrebe definisanja klimatskih karakteristika istražnog područja istraživanja korišćeni su raspoloživi podaci sa najbliže i najmerodavnije meteorološke stanice - Dimitrovgrad koja je smeštena na 450 mnv. Osnovni podaci o meteorološkoj stanici Dimitrovgrad kao i ekstremne vrednosti klimatskih elemenata dati su u tabeli II.3.

Tabela II.3: Meteorološka stanica Dimitrovgrad (osnovni podaci i ekstremne vrednosti klimatskih elemenata) – podaci RHMZ-a (www.hidmet.gov.rs)

KOORDINATE	
geografska dužina:	22°45E
geografska širina:	43°01N
NADMORSKA VISINA:	
	450 m
EKSTREMNE VREDNOSTI KLIMATSKIH ELEMENATA:	
Maksimalna temperatura:	42.0 °C
Datum maksimalne temperature:	8.09.1946
Minimalna temperatura:	-29.3 °C
Datum minimalne temperature:	25.01.1963
Maksimalne padavine:	123.3 mm
Datum maksimalnih padavina:	14.07.1992
Visina snega:	93 cm
Datum maksimalnog snega:	23-25.02.1954

2.1.1. Temperatura vazduha

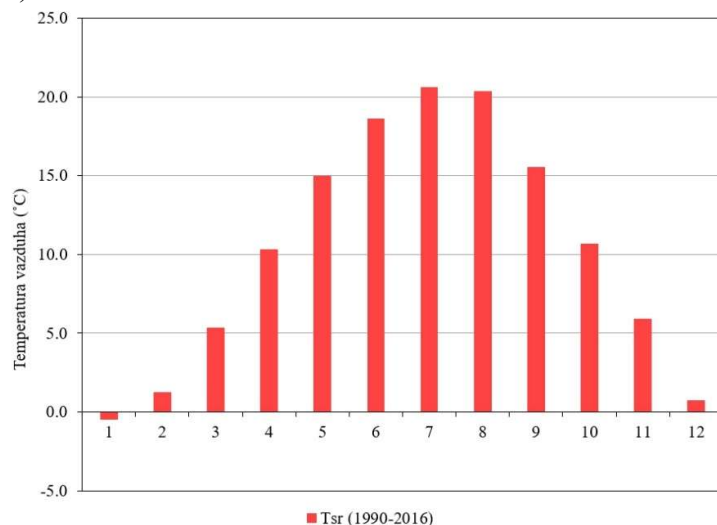
Temperatura vazduha spada u najvažnije klimatske elemente. Direktno utiče na isparavanje, razmenu vlage, rečni oticaj, ledene pojave i druge hidrometeorološke pojave [75]. U hidrološkom ciklusu što je temperatura vazduha veća, veće je isparavanje a manji rečni oticaj.

Temperaturni režim istražnog područja ukazuje da je srednja višegodišnja temperatura vazduha iznosila 10.3 °C (tabela II.4). Gledano u višegodišnjem periodu maksimalna temperatura vazduha registrovana je u julu mesecu 2012. godine. 2012. godina je ujedno bila i jedna od najtoplijih godina u razmatranom periodu, sa srednjom godišnjom temperaturom od 12.2 °C. Srednja minimalna temperatura je zabeležena tokom 2000-te i 2001. godine od -4.5 °C, iako su ove godine bile karakteristične po prosečnim temperaturama iznad srednjih višegodišnjih. 2000-te godine srednje minimalne temperature su zabeležene u januaru mesecu, dok je tokom 2001. godine srednja minimalna temperatura zabeležena u decembru mesecu.

Tabela II.4: Srednje mesečne i godišnje temperature vazduha za period 1990-2016

God	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec	God
1990	-3.3	3.5	8.1	9.7	13.9	17.4	20.0	19.3	14.1	11.6	7.0	0.4	10.1
1991	-1.1	-1.8	6.7	8.7	11.2	18.5	19.5	17.8	15.4	10.1	6.4	-3.0	9.0
1992	-1.9	-0.3	4.6	10.0	13.6	17.5	18.9	21.6	14.9	12.4	5.4	-0.8	9.7
1993	-1.7	-2.8	3.0	9.7	15.1	18.2	20.6	20.8	15.6	13.3	2.0	2.5	9.7
1994	2.3	1.3	7.4	11.5	15.4	17.8	20.1	20.6	19.5	10.5	5.4	0.9	11.1
1995	-1.1	4.3	4.6	9.0	13.7	17.9	20.4	18.2	14.3	9.1	2.2	2.1	9.6
1996	-0.9	-1.2	0.4	9.3	16.2	19.6	20.2	20.0	12.6	9.9	7.3	2.0	9.6
1997	0.8	2.0	3.3	4.9	15.4	19.0	19.0	17.5	13.8	7.1	6.3	1.5	9.2
1998	1.4	3.2	1.9	12.0	14.4	19.1	20.7	21.1	14.7	11.2	4.0	-3.6	10.0
1999	-0.4	-0.7	5.4	10.4	15.1	18.2	20.3	20.5	16.3	10.2	4.9	2.2	10.2
2000	-4.5	1.6	4.8	12.7	16.2	19.0	21.4	21.4	15.3	11.9	9.2	2.9	11.0
2001	2.4	1.5	9.0	9.6	15.2	16.8	20.9	21.0	15.3	11.7	3.9	-4.5	10.2
2002	-1.9	4.5	7.4	8.9	16.0	19.2	21.2	18.9	14.1	10.5	6.9	0.6	10.5
2003	-0.2	-3.4	3.7	8.9	18.0	20.7	20.5	21.9	14.5	9.4	7.6	1.0	10.2
2004	-2.1	0.8	5.4	11.5	13.1	17.9	20.0	19.2	15.2	12.4	5.7	2.0	10.1
2005	-0.7	-2.5	3.6	10.1	15.3	17.2	20.0	18.6	15.7	10.1	4.2	1.5	9.4
2006	-2.7	-0.9	4.5	11.1	14.7	17.9	19.9	19.4	15.6	11.6	5.2	0.5	9.7
2007	3.4	4.6	7.1	10.5	16.4	20.4	23	20.8	13.7	9.1	2.3	-0.4	10.9
2008	-0.3	2.4	6.8	10.8	15.4	19.5	20.4	21.3	14.7	11.4	6.6	2.7	11.0
2009	-0.3	0.9	4.9	11.2	15.6	18.5	20.1	20.2	15.8	10.5	6.9	3.2	10.6
2010	-0.1	1.9	5.8	10.8	14.8	18.7	20.6	21.6	15.7	8.8	10.2	1	10.8
2011	-0.5	-0.3	5.2	10.3	14.2	18.6	20.8	21.2	18.8	8.8	2.4	1.8	10.1
2012	-1.7	-3.7	5.8	11.5	14.5	21.3	23.9	22.3	18.7	12.9	8.4	-0.1	11.2
2013	0.9	3.3	5.25	11.9	16.8	18.2	20	22	15.2	12	8.1	1	11.2
2014	2.1	5.9	7.8	10.5	13.9	17.6	20	20.3	15.8	10.9	7.6	1.5	11.2
2015	0.7	2.1	4.9	9.2	16.2	17.6	22.5	22.3	18.2	10.7	7.2	2	11.1
2016	-1.7	7.4	6.5	13.2	13.8	20.3	21.3	19.8	15.8	10.3	5.5	-1.6	10.9
Tsr	-0.5	1.2	5.3	10.3	15.0	18.6	20.6	20.4	15.5	10.7	5.9	0.7	10.3
max	3.4	7.4	9.0	13.2	21.3	23.9	22.3	19.5	13.3	10.2	3.2	3.2	23.9
min	-4.5	-3.7	0.4	18.0	16.8	18.9	17.5	12.6	7.1	2.0	-4.5	-4.5	-4.5
σ	1.8	2.9	1.9	1.6	1.4	1.1	1.1	1.4	1.6	1.4	2.2	2.0	0.7
Cv	-3.8	2.3	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	2.7	0.1
Cs	0.1	0.1	-0.4	-1.2	-0.4	0.7	1.4	-0.5	1.0	-0.3	-0.2	-1.3	-0.2

Najtopliji meseci u toku godine su bili jul i avgust, dok su januar i decembar zabeleženi kao najhladniji (slika II.4).



Slika II.4. Unutargodišnja raspodela temperature vazduha za period 1990-2016

2.1.2. Padavine

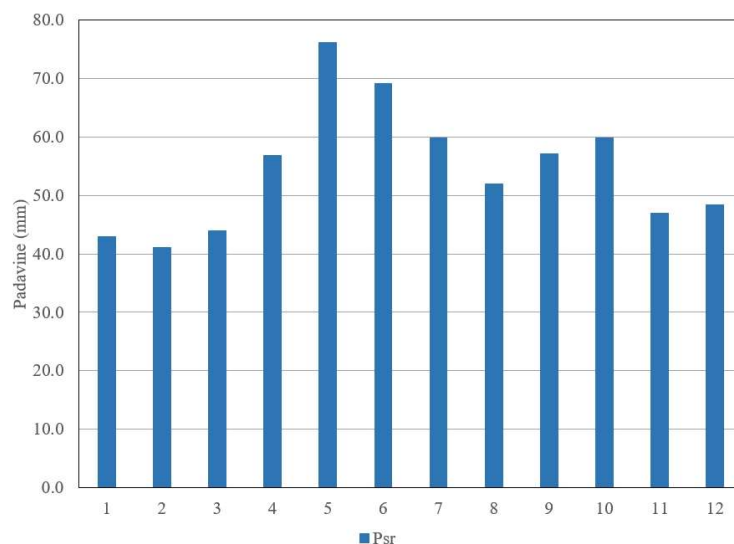
Padavine čine jedan od osnovnih elemenata vodnog bilansa nekog sliva i nastaju kao rezultat kondenzacije vodene pare u atmosferi [25]. Na osnovu analize podataka o mesečnim i godišnjim sumama padavina (tabela II.5) može se konstatovati da su sume godišnjih padavina za višegodišnji period osmatranja (1990-2016) iznosile 654.1 mm. Najkišnija godina bila je 2013. godina sa prosečnim godišnjim padavinama od 976.6 mm, dok je najsušnija godina u višegodišnjem razmatranom periodu bila 2000-ita godina sa prosečnim godišnjim padavinama od svega 311.5 mm.

Najsušniji mesec u razmatranom periodu bio je mart 2003. godine kada su sumarne padavine iznosile samo 1.3 mm, dok je najkišniji mesec bio septembar 1996. godine sa sumarnim padavinama od 174.3 mm.

Kada se posmatra unutargodišnja raspodela padavina za višegodišnji period (slika II.5), najveće padavine se javljaju u maju mesecu, dok su najmanje padavine zabeležene u februaru, što je najverovatnije posledica niskih temperatura i prisustva snežnog pokrivača u ovom zimskom mesecu.

Tabela II.5. Srednje mesečne i godišnje sume padavina za period 1990-2016

God	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec	God
1990	10.3	25.3	21.6	86.0	75.4	40.3	11.3	38.1	23.9	36.6	15.8	126.5	511.1
1991	10.8	63.2	26.1	85.8	90.9	42.0	105.8	38.1	19.7	65.3	42.3	31.3	621.3
1992	9.2	30.6	18.9	63.4	35.6	149.0	152.5	36.6	10.1	51.0	75.4	14.9	647.2
1993	20.1	27.4	45.8	39.1	56.6	21.0	3.8	29.6	42.5	11.2	40.3	57.4	394.8
1994	42.2	10.8	19.3	81.1	65.6	77.3	61.2	13.3	35.1	23.7	21.4	33.5	484.5
1995	54.3	40.0	36.4	40.4	64.8	166.1	41.9	82.9	60.2	4.7	75.7	78.7	746.1
1996	26.3	42.9	55.2	37.1	58.3	11.2	58.4	61.9	174.3	14.2	53.3	77.5	670.6
1997	16.2	16.7	42.0	65.0	81.0	22.9	59.4	80.8	11.7	123.1	25.8	48.9	593.5
1998	27.6	50.7	23.1	18.4	41.1	81.2	53.2	40.1	73.6	124.2	72.4	29.7	635.3
1999	34.5	52.3	12.2	68.1	58.3	97.8	93.2	11.9	84.2	70.5	54.9	89.7	727.6
2000	49.4	32.4	27.2	30.9	30.6	42.7	19.4	4.5	39.4	6.3	19.5	9.2	311.5
2001	35.1	67.9	39.4	96.3	93.5	90.6	36.8	37.8	150.1	6.3	22.5	38.5	714.8
2002	22.4	22.8	37.3	76.7	101.1	47.6	85.0	144.5	71.8	62.1	31.7	39.9	742.9
2003	104.8	26.5	1.3	62.1	134.8	36.0	35.5	34.7	66.0	107.8	24.9	30.9	665.3
2004	43.4	45.0	49.8	29.9	58.9	109.4	46.4	49.0	73.5	68.5	75.6	39.6	689.0
2005	66.9	73.2	44.4	70.3	114.5	56.3	54.1	168.3	75.1	55.2	26.9	63.7	868.9
2006	23.5	48.8	84.1	43.2	26.2	86.5	93.3	115.3	25.8	44.3	35.5	47.4	673.9
2007	43.4	29.5	55	10	85.2	47.2	7.2	118.6	60.5	112	146.7	25.3	740.6
2008	24.3	6.8	55.5	73.9	13.9	66.5	95.9	18.3	70.3	49.1	21.7	50	546.2
2009	75.4	58.8	59.9	25	56.1	128.3	95.7	48	52.4	96.7	44.1	69.9	810.3
2010	43.2	64.2	77.3	64.7	117.3	81.3	40.7	25	18.7	93.1	71.9	90.2	787.6
2011	24.8	18.9	26.7	16.5	60.2	24.3	100.6	12.5	7.4	41.8	1.4	44	379.1
2012	101.2	47.2	16.9	65.9	169	10.2	23.7	8.8	14.5	18.1	10	53.8	539.3
2013	56.4	89.4	65.6	42.8	68.2	107.9	25.7	2	28.8	54.4	45.5	21.2	607.9
2014	20.6	10.8	58.5	145.8	121.7	96.4	98.5	86.2	131.6	79.5	43.9	83.1	976.6
2015	52.5	50.2	93	67.8	89.9	58.6	38.1	66.8	86.1	115.1	78.1	2.9	799.1
2016	119	55.1	92.8	29.2	88.3	67.9	79.1	28	35.5	79.7	91.7	9.8	776.1
Psr	42.9	41.0	43.9	56.9	76.2	69.1	59.9	51.9	57.1	59.8	47.0	48.4	654.1
max	119.0	89.4	93.0	145.8	169.0	166.1	152.5	168.3	174.3	174.3	124.2	126.5	976.6
min	9.2	6.8	1.3	10.0	13.9	10.2	3.8	2.0	2.0	7.4	4.7	2.9	1.3
σ	29.2	21.0	24.5	29.7	35.3	40.7	36.5	43.6	42.4	37.9	31.4	29.3	152.5
Cv	0.7	0.5	0.6	0.5	0.5	0.6	0.6	0.8	0.7	0.6	0.7	0.6	0.2
Cs	1.2	0.3	0.5	0.8	0.6	0.6	0.5	1.2	1.2	0.2	1.3	0.7	-0.4

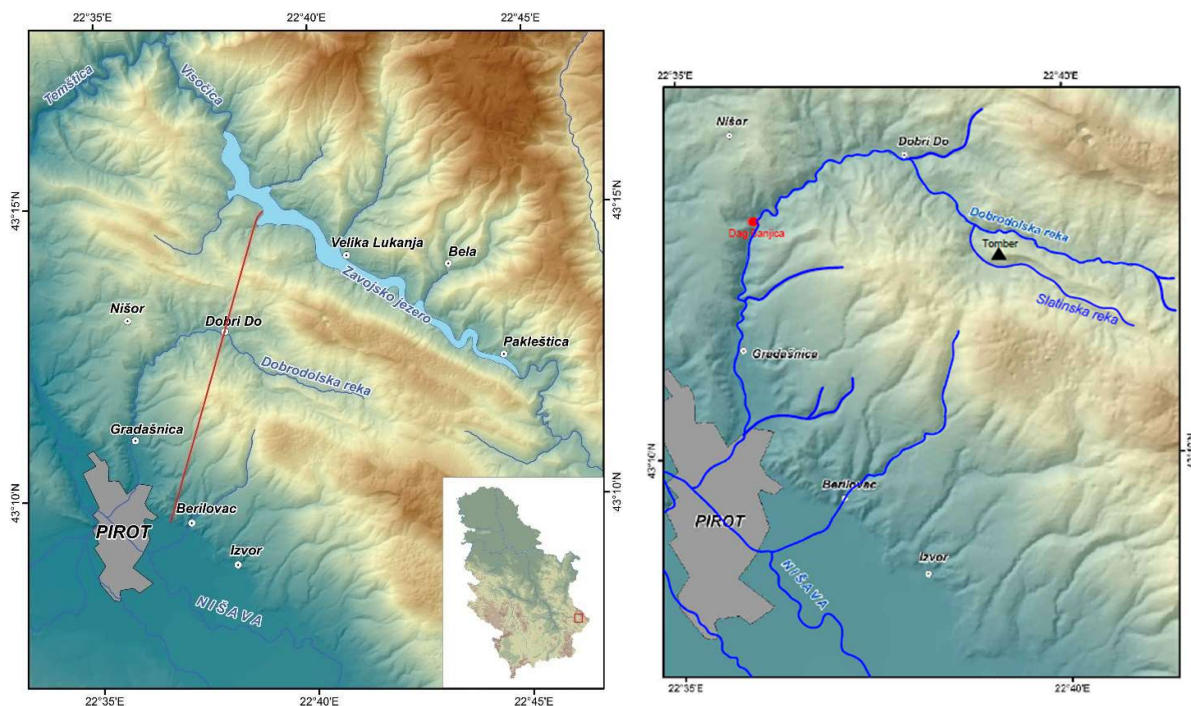


Slika II.5. Unutargodišnja raspodela padavina za period 1990-2016

2.2. Hidrografske karakteristike

Šire istražno poručje karakteriše velika razuđenost terena i razvijena hidrografska mreža. Teren se odlikuje razgranatom hidrografijom, sa brojnim stalnim i povremenim tokovima, od kojih je najznačajnija reka Visočica, s obzirom da je na njenom toku i formirana akumulacija Zavoj. Jezero Zavoj, odnosno akumulacija Zavoj (slika II.6) nastalo je 1963. godine, kao posledica pokretanja velikog klizište koje je formiralo prirodnu barijeru. Ovako formirana prirodna barijera je kasnije nadvišena izgradnjom veštačke brane. Ovo jezero je urvinsko jezero i ujedno je jedino jezero nastalo koluvijalnim procesom na teritoriji Srbije. Nalazi se na nadmorskoj visini od 612 m i prostire na površini od 5,53 km². Maksimalna dubina jezerske vode iznosi 60 m, a dužina obalske linije oko 40 km. Ukupna zapremina jezera iznosi 170×10^6 m³.

Međutim, na užem istražnom području, odnosno zoni tunela najznačajniji površinski tok je Dobrodolska reka (slika II.6). Ova reka predstavlja neizučeni sliv koji nastaje od Slatinske i bezimene reke, u podnožju vrha Tomber (883 mnv). U najuzvodnijem delu teče u pravcu severozapada, do sela Dobri Do, gde skreće ka jugozapadu i ulazi u Banjičku klisuru dugu preko 1 km i dubine 250 - 400 m. Nakon izlaska iz klisure, Dobrodolska reka ulazi u zonu razbijenog termalnog izvorišta Dag Banjice. Nizvodnije, Dobrodolska reka ulaskom u selo Gradašnica, menja naziv u Gradašnička reka i kod Pirota se uliva u reku Nišavu.



Slika II.6. Zavojsko jezero (akumulacija Zavoj) i drenažna mreža Dobrodolske reke

2.3. Geološke karakteristike istražnog područja

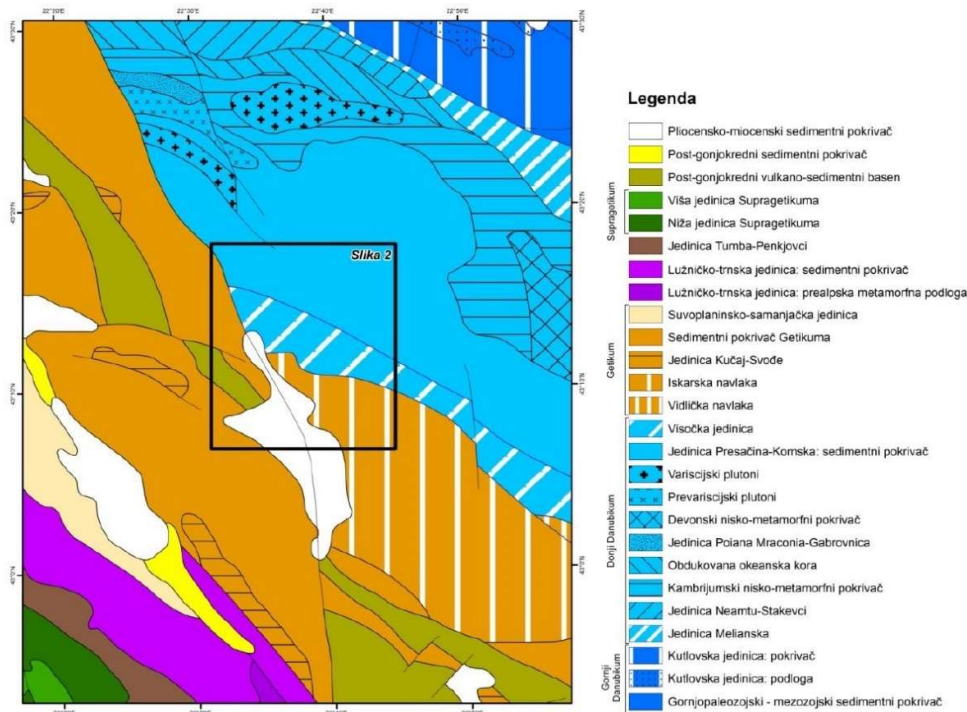
Detaljna geološka istraživanja razmatranog terena obavljena su u toku istraživanja sprovedenih 2014. godine od strane autora prof. dr Radmile Pavlović, prof. dr Branislava Trivića i dr Ane Mladenović (Prilog 1) [39] [14]. Pre svega razmatrane su tektonske karakteristike i litostratigrafske jedinice šireg područja istraživanja, sa ciljem definisanja strukturno-geološkog sklopa kao osnove za razumevanje i definisanje uslova cirkulacije podzemnih voda. Međutim, i pored dobro postavljenih osnova za definisanje geoloških i strukturno-geoloških karakteristika razmatranog terena tokom prethodnih istraživanja, od ključnog značaja za razumevanje predmetne problematike bilo je neophodno uraditi njihovu detaljniju analizu. Konkretno, u okviru istraživanja sprovedenih tokom 2016. godine, urađena su 3 poprečna profila, 1 duž trase tunela i 2 paralelna sa njim. Ovakvo detaljno urađena geološka i strukturno-geološka osnova istražnog područja bila je neophodna za razumevanje i jasnije sagledavanje hidrogeoloških karakteristika terena i interakcije podzemnih voda sa vodama transportovanih tunelom pod pritiskom (Prilozi 3, 4 i 5).

2.3.1. Tektonske karakteristike

U tektonskom pogledu, istraživano područje nalazi se na kontaktu dve tektonske jedinice regionalnog značaja (slika II.7) – Getikuma, koji izgrađuje zapad-jugozapadne i južne delove područja istraživanja, i Danubikuma, smeštenim u istok-severoistočnim i severnim delovima istraživanog područja. Obe ove jedinice su i u geološkom i u tektonskom pogledu veoma složene, a predstavljene su sistemima navlaka sa generalno istočnom vergencijom, kojima su obe jedinice navučene prema istoku preko jedinica Mezijske platforme (stabilni evropski kontinent) i koje, posmatrano u nešto široj razmeri istraživanog područja, dovode jedinice Getikuma u najvišu tektonsku poziciju [39].

Smatra se da su ove navlake bile formirane i aktivirane tokom gornje krede, a glavni tektonski mehanizam koji je doveo do njihove aktivacije bila je kompresija uzrokovana zatvaranjem vardarske grane okeana Neotetisa (u današnjim koordinatama zapadno od istraživanog područja) i obdukcije (?) Istočne vardarske zone preko ostalih tektonskih jedinica Karpato-balkanskog orogena.

Ovo područje se i u kenozoiku nalazilo u zoni delovanja veoma aktivne tektonike, koja je takođe bila uslovljena kompresijom koja je bila aktivna i u gornjoj kredi, ali i činjenicom da se istraživano područje nalazi vrlo blizu, ili u samom kontaktnom delu tektonskih jedinica Karpato-balkanskog orogena i rigidne Mezijske platforme. Takav položaj ovog područja uslovio je da se najintenzivnije tektonske deformacije dešavaju u istočnim delovima Karpato-balkanida (gde se nalazi i istraživano područje), a veliki deo kompresije bio je akomodiran formiranjem i aktivacijom velikih transkurentnih raseda (kao što je Timočki rased), a ne ponovnom aktivacijom glavnih sistema navlaka, kao što bi bilo očekivano. Objašnjenje ovoga je najverovatnije povezano sa činjenicom da je postojanje rigidne ploče koja ne može da trpi dalje deformacije (Mezijska platforma), na neki način „zaključalo“ celi prostor, pa je regionalna kompresija, umesto da izazove navlačenja velikih razmera, izazvala rotacije velikih tektonskih mega-jedinica, a usled toga i formiranje i aktivaciju regionalno značajnih transkurentnih raseda [39].



Slika II.7. Geotektonski položaj istraživanog područja [50], [39]

I kredni i kenozojski, očigledno veoma aktivni, tektonski procesi rezultirali su danas veoma složenim tektonskim karakteristikama istražnog područja. U tektonskim rekonstrukcijama koje su vršene za potrebe primenjenih geoloških istraživanja, veoma je važno bilo ustanoviti značaj različitih tektonskih struktura, njihovu kinematiku i vreme aktivacije, a samim tim i implikacije koje bi one mogle imati na različite geološke fenomene, između ostalih i na kretanje podzemnih voda.

2.3.2. Litostratigrafske jedinice

U istraživanom području, **Getikum** je izgrađen od tri manje tektonsko-geološke jedinice: Iskarske [49], odnosno Vidličke navlake, sedimentnog pokrivača Getikuma, i delova timočkog post-donjokrednog vulkanogeno-sedimentnog basena (slika II.7, Prilog 1) [39].

Sedimentni pokrivač Getikuma ima veliko rasprostranjenje u istraživanom području, pogotovo u njegovim zapad-severozapadnim delovima. Ovaj sedimentni pokrivač grade aptski sedimenti, predstavljeni krečnjacima i laporcima, a podređeno peščarima i peskovitim krečnjacima.

U okviru timočkog rov-sinklinorijuma izdvojene su dve grupe jedinica, međusobno odvojene erozionom diskordancijom: donja, vulkanogeno-sedimentna, koja odgovara turonu i nižem senonu (debljine preko 300 m), i gornja, sedimentna, koja odgovara kampan – mastrihtu (debljine do 300 m). Turonsko-donjosenonske tvorevine počinju bazalnim konglomeratima, a preko njih leže laporci, peščari i glinci sa ugljem, koji navise prelaze u laporce i laporovite krečnjake. Iznad njih je sedimentno-vulkanogena senonska „pelitska serija“, iznad koje se smenjuju laporci i glinci sa horizontima vulkanoklastita. Tvorevine kampan-mastrihta leže transgresivno preko starijeg senona. One takođe počinju bazalnim klastitima, a preko njih leže peščari, glinci sa ugljem, laporci i laporoviti krečnjaci, a paket se završava peskovitim krečnjacima.

Danubikum je u istraživanom području izgrađen od dve tektonsko-geološke jedinice – visočke jedinice i sedimentnog pokrivača tektonske jedinice Presačina – Komska. Visočka jedinica je, tektonski posmatrano, veoma složena, zbog toga što se na malom rastojanju smenjuje više sistema tektonskih imbricacija (kraljušti), koje dovode u direktan tektonski kontakt različite geološke jedinice ove zone, i remete njihov originalni stratigrafski sled, ali i starije tektonske odnose. Najstarije jedinice otkrivene u okviru visočke jedinice su donjojurski (hetanški) sedimenti, predstavljeni konglomeratima, peščarima i glincima. Preko njih transgresivno leže sinemurske i plensbaške (J_1^{2+3}) terigeno-karbonatne tvorevine, sa fosforitskim konkrecijama i oolitskim rudama gvožđa. Sedimenti dogera imaju veliko rasprostranjenje u visočkoj jedinici, a predstavljeni su neritskim, plitkovodnim sedimentima, koje grade kvarcni konglomerati i peščari, preko kojih leže vapnoviti peščari. Oksfordski i kimerički kat predstavljeni su sivim i crvenkastim krečnjacima, koji sadrže veoma bogatu amonitsku faunu. Titon je, kao i u slučaju vidličke jedinice Getikuma, predstavljen sprudnim bankovitim i masivnim krečnjacima. Donjokredni sedimenti visočke jedinice predstavljeni su krečnjacima, laporcima i peščarima. Najmlađi kat donje krede izgrađuju dva litološka člana – krečnjački i peščarski. Među krečnjacima preovlađuju kalkareniti, koji preko glaukonitskih kalkarenita prelaze u glaukonitske peščare. U arenitskoj seriji su česte grauwake i feldspatske grauwake. U cenomanu je sedimentacija kontinuirano nastavljena preko albskih sedimenata, pri čemu su cenomanske stene predstavljene laporcima, koji su u smeni sa debljim i bolje izraženim peščarima i glincima. U najvišim horizontima cenomana nalaze se vulkanski aglomerati, breče i tufovi, sa proslojcima sivih i rumenih laporaca.

Sedimentni pokrivač tektonske jedinice Presačina – Komska je u istraživanom području sastavljan od dva litostratigrafska člana – donjotrijaskog i srednjotrijaskog. Donjotrijaski član je u svom donjem delu izgrađen od kvarcnih peščara i konglomerata, koji navise postupno prelaze u subarkoze, a u najvišim delovima sadrži šarene peščare, arkoze, alevrolite i glince. Srednji trijas predstavljen je dolomitičnim krečnjacima sa proslojcima glinovitim krečnjaka i alevrolita, dolomitima i krečnjačkim dolomitima.

Pliocenski sedimentni pokrivač pirotskog basena predstavljen je sivim i zelenim peskovitim i laporovitim glinama, koje odgovaraju jezerskim i močvarnim facijama. Plio-pleistocenski sedimenti

sastoje se od peskova, peskovitih glina i šljunka. Ova jedinica u celini pokazuje karakteristike rečno-jezerskog genetskog tipa, a taložena je u tektonski predisponiranom basenu. **Kvartarne naslage** predstavljene su većim brojem genetskih tipova, među kojima dominiraju aluvijalni, proluvijalni, deluvijalno-proluvijalni i koluvijalni.

2.4. Hidrogeološke karakteristike istražnog područja

Na osnovu strukturnog tipa poroznosti i konverzije litoloških članova koji učestvuju u geološkoj građi istražnog područja u hidro-litološke klase, a kasnije u hidrogeološke jedinice određene su hidrogeološke karakteristike terena, odnosno definisani tipovi izdani (Prilog 2) [39]. Na analiziranom području, izdvojena su tri osnovna tipa izdani, manje ili veće produktivnosti:

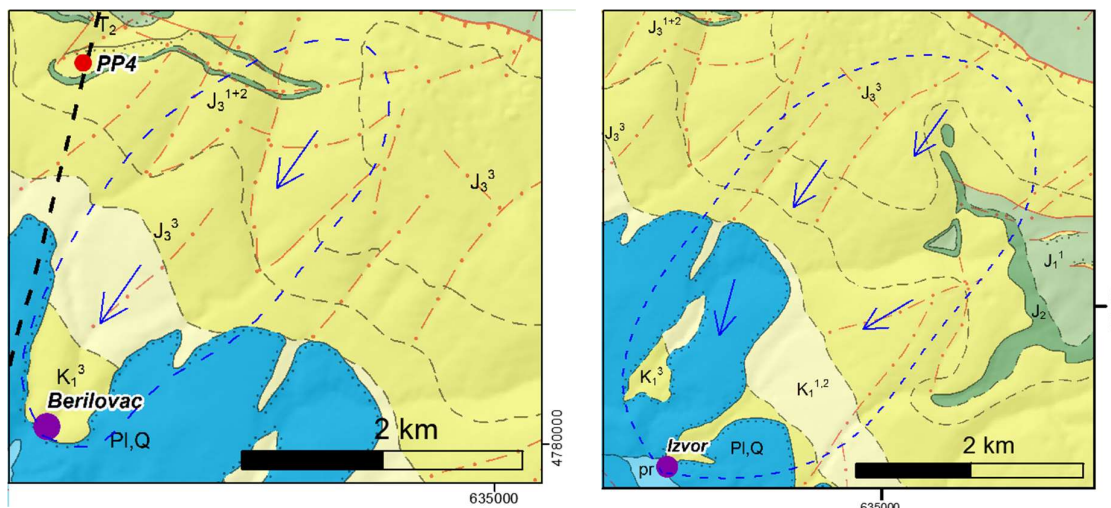
- zbijeni tip izdani
- pukotinski tip izdani
- karstni tip izdani

Zbijeni tip izdani formiran je u okviru stena pliocenske i kvartarne starosti. Najveće rasprostranjenje ova izdan ima u Pirotskoj kotlini, posebno u aluvionu, u kojem preovlađuju sedimenti formirani najvećim delom od krupnozrnih peskova i šljunkova. Dublje delove serije pliokvartarnih sedimenata u značajnoj meri izgrađuju slabovodopropusni do vodonepropusni sedimenti – peskovite gline i gline. Pored navedenog, zbijeni tip izdani je konstatovan u aluvijalnom nanosu Nišave, gde je korito široko oko 4 km. Ovde je zbijeni tip izdani formiran u šljunkovito-peskovitim sedimentima, kao direktna povlata plio-kvartarnim sedimentima. Debljina aluviona iznosi između 10 i 15 m. U ovakvim sedimentima formirana je izdan velike produktivnosti, odnosno značajnog potencijala. Pored Pirotke kotline, na istražnom području rasprostranjenje zbijenog tipa izdani, veće produktivnosti formirano je i u aluvionu Dobrodolske reke. Zbijeni tip izdani formiran u okviru siparskih i izvorskih bigrovitih sedimenata karakteriše manji potencijal, odnosno produktivnost i time ima samo lokalni značaj. Izdan se prihranjuje padavinama i površinskim tokovima, a drenira preko izvora i bunara.

Pukotinski tip izdani egzistira u prslinama i pukotinama stenskih kompleksa raznovrsnog sastava, na prvom mestu klastičnim stenama, koje se naizmenično smenjuju sa karbonatnim stenama. To su, pre svega, donjojurski sedimenti izgrađeni od peščara, konglomerata i glinaca, kao i delom u okviru laporovite serije gornjokredne starosti. Uopšteno gledajući, ove tvorevine se odlikuju daleko manjim stepenom vodopropusnosti u odnosu na intergranularni tip poroznosti, s obzirom da je izdan formirana lokalno u površinskoj kori raspadanja. U okviru rasprostranjenja ovog tipa izdani izvedeni su pijeometri PP-1 i PP-4 na trasi tunela. Pijezometar PP-1 izveden je u okviru pukotinske izdani male produktivnosti koja je formirana u okviru laporovitih sedimenata, dok je pijezometar PP-4 izveden u pukotinskoj izdani velike produktivnosti formirane u krečnjačkim, laporovitim i glinovitim sedimentima. Pored navedenih pijezometara, u okviru ovog tipa izdani formirano je nekoliko izvora manje izdašnosti.

Karstni tip izdani ima najveće rasprostranjenje na istražnom terenu, pa time i najveći značaj. Izdvojen je u okviru trijaskih, jurskih i krednih krečnjaka i laporovith krečnjaka. Ovi krečnjaci su jako karstifikovani, sa puno pukotina i kaverni. Izdan se prihranjuje preko padavina i površinskih tokova, a drenira izvorima i bunarima. Generalni pravac kretanja podzemnih voda je severoistok-jugozapad, što se može zaključiti na osnovu prostiranja glavnih rasednih struktura. U okviru ovog tipa izdani, izveden je pijezometar PP-3 i to u zoni izuzetno karstifikovanih krečnjaka. Od analiziranih izvora, koji su markirani u zoni potencijalnog uticaja tunela pod pritiskom, većina je formirana u okviru ovog tipa izdani, odnosno izvori Izvor, Berilovac, Dobri Do, Glame kao i termalni izvor Dag Banjica. Izvor Izvor predstavlja tipično karstno vrelo koje se pojavljuje/ističe se na kontaktu krečnjaka kredne

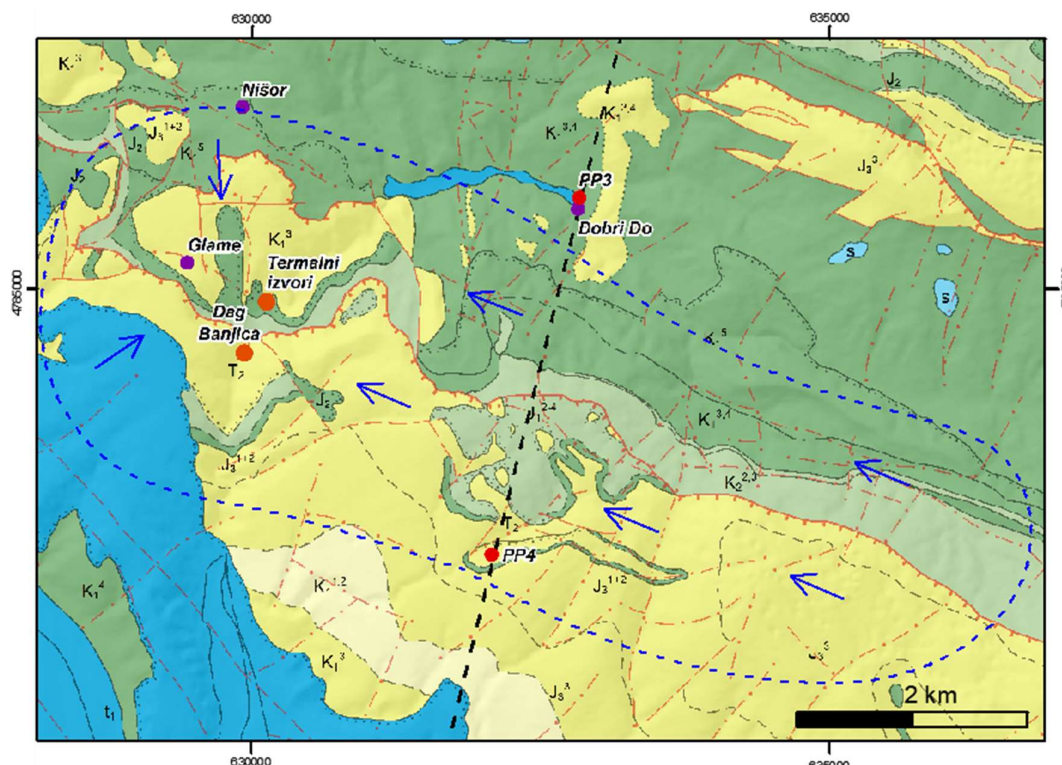
starosti i peskovito-šljunkovitim sedimentata pliocenske i kvartarne starosti. Izvor Berilovac, kao i vrelo Izvor, ima karakteristike tipičnog karstnog vrela, sa zonom isticanja formiranom na kontaktu sprudnih krečnjaka kredne starosti i peskovito-šljunkovitim sedimentima pliocenske i kvartarne starosti. Prihranjivanje izdani koja se drenira preko ova dva izvora vrši se u hipsometrijski višim delovima terena, odnosno u zoni mesta Basare. Dominantni pravci kretanje podzemnih voda svakako su uslovljeni rupturnim sklopom terena, pa se njihova cirkulacija vrši duž utvrđenih raseda (slika II.8).



Slika II.8. Pretpostavljeno slivno područje karstnih vrela Berilovac i Izvor

Izvor Glame predstavlja karstni izvor formiran u krečnjačkim stenama kredne starosti, sa lokalnom zonom prihranjivanja i isticanja. Termalni izvor Dag Banjica predstavlja značajnu pojavu isticanja podzemnih voda na istražnom području i na osnovu dosadašnjih istraživanja, može se reći da je dosta dobro istraženo, sa aspekta hidrogeologije, u odnosu na ostale izvore koji su razmatrani. Najznačajnija istraživanja, posebno definisanja uslova prihranjivanja i isticanja ovog izvora, sproveo je Milojević 1968. godine u svom radu „Hidrogeologija Pirotske Banjice”. Na osnovu temperaturnih karakteristika tih voda, autor navodi da se one sifonalno kreću sa dubine od oko 600 m. Međutim, važno je naglasiti da je Dag Banjica razbijeno izвориšte sa više pojava isticanja, čije temperature iznose od 18-31⁰ C. Isti autor navodi da je ukupna izdašnost tih voda u periodu malih voda iznosila oko 35 l/s. Generalno posmatrano, prihranjivanje termalne izdani vrši se uglavnom na račun infiltracije atmosferskih taloga, u udaljenim karbonatnim sredinama, najintenzivnije u zoni Vidliča i Basare, duž privilegovanih pravaca, jasno definisanih rasednih površi, koji predstavljaju dominantne pravce kretanja podzemnih voda (slika III.9). Na osnovu uslova pojavljivanja, izdašnosti i ustaljenosti režima isticanja može se konstatovati da se izvori Dag Banjice prihranjuju vodama iz dublje karstne izdani koja je formirana u donjokrednim krečnjacima. Glavni pravci cirkulacije ovih termalnih voda koji dovode vodu do zone isticanja iz udaljenih sabirnih površina, su u području između Nišora i Gradašnice [67].

Isti autor navodi da se prihranjivanje vrši preko krečnjaka gornje jure različitog tipa, koji su vrlo razlomljeni, ispućali, sa puno preloma i pukotina, a prema selu Gradašnica i zapunjeni sedimentima neogena. Preko krečnjaka se nalazi neogeni pokrivač pliocena koji je tanak, tako da lako sprovodi vodu u dublje delove ovih jurskih ispućalih krečnjaka koji predstavljaju dobre kolektore. Izdan koja se formira u njima je razbijena i voda cirkuliše u više pravaca. Sledi topografiju terena i privilegovane pravce unutar krečnjačke mase i veći deo vode se prazni u području Makvišta prema Pirotu u kontaktu sa neogenim sedimentima, stvarajući prelivni karstni izvor. Samo manji deo tih voda dolazi do izvora Dag Banjice [67].



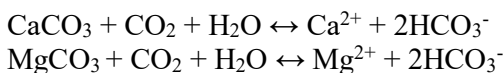
Slika II.9 12. Pretpostavljeno slivno područje termalnog izvora Dag Banjica

Dosadašnja istraživanja kvalitativnih karakteristika podzemnih voda Dag Banjice određivana su uglavnom skraćenim hemijskim analizama. Na osnovu urađenih hemijskih analiza može se zaključiti da sve pojave isticanja u zoni područja Dag Banjice su sličnog hemijskog sastava. Razlike postoje samo u temperaturi vode, što je naravno posledica mešenja termalnih i hladnih voda, koje je u ovako složenim geološkim uslovima praktično neizbežno. Temperature vode kreću se od 10.5 °C do 29.3 °C (Dag Banjica), a pH vrednosti su oko 7.2. Ove vode se odlikuju preovlađujućim sadržajem hidrokarbonata (HCO_3), u ukupnom zbiru jona anjona. U katjonskom sastavu, dominira jon kalcijuma (Ca), a zatim jon magnezijuma (Mg). Ukupna mineralizacija je oko 320 mg/l, što ove vode svrstava u malomineralizovane. Generalno vode Dag Banjice se svrstavaju u vode hidrokarbonatno-kalcijumskog-magnezijumskog tipa (Ca-Mg-HCO_3).

Razlike u sadržajima pojedinih jona, kao i razlike u temperaturi su prisutne u zonama isticanja, jer tokom njihovog difuznog isticanja deo termalnih voda se meša sa vodama koje su neposredno vezane za same trijasko krečnjake, raslađuju se i menjaju svoj hemijski sastav. Vode glavnog izvora (Dag Banjice) najverovatnije zadržavaju osobine vode iz primarnih strukturnih formi, tj. krečnjaka donjokredne starosti.

Definisanje opštih hidrogeoloških karakteristika terena na osnovu geološke građe terena, strukturno-geoloških karakteristika i tipova izdani, kao i raspoloživi podaci prethodnih istraživanja bila su polazna osnova za sprovođenje detaljnih istraživanja u cilju definisanja pravaca cirkulacije podzemnih voda, zastupljenih hidrogeoloških sistema i uticaja transportovanih tunelskih voda pod pritiskom na njihov prirodni režim. Ključni faktor za bolje i detaljnije utvrđivanje prirodnog režima podzemnih voda i potencijalnog uticaja rada tunela na njegovu izmenu bilo je formiranje više hidrogeoloških profila, na osnovu postavljenih geoloških profila duž trase tunela (Prilozi 6,7 i 8).

Hemijski sastav podzemnih voda je važan faktor sagledavanja geohemijskih uslova koji su dominantni u nekoj sredini. Određeni joni hemijskog sastava podzemnih voda mogu da ukažu na prisustvo sedimenata koji nisu detektovani na površini terena u toku kartiranja, ali se mogu nalaziti na određenoj dubini. Najveće, a ujedno i najzanimljivije rasprostranjenje na istražnom području imaju karbonatne sedimentne stene, krečnjaci (CaCO_3) i dolomiti (MgCO_3). Kada ove sedimentne stene dođu u kontakt sa podzemnim vodama dolazi do rastvaranja karbonatnih minerala kalcijuma i magnezijuma u prisustvu slobodnog ugljen-dioksida:



Ovakav geohemijski proces uzrokuje stvaranje hidrokarbonatnog (HCO_3^-) jona u podzemnim vodama, koji ujedno spada u grupu glavnih anjona hemijskog sastava podzemnih voda.

Međutim, pored hidrokarbonatnog jona na istražnom području u toku istraživanja koja su sprovedena tokom 2016. godine otkriveni su i anjoni: hloridni jon (Cl^-) i sulfatni jon (SO_4^{2-}), koji mogu nastati u procesu rastvaranja evaporitskih stena u podzemnim vodama. Iako evaporitske stene nisu otkrivene na površini terena, njihovo prisustvo na istražnom području detektovano kroz hemijski sastav podzemnih voda ukazuje da su ove stene najverovatnije prisutne, samo na većoj dubini, ispod karbonatnih tvorevina.

Evaporiti predstavljaju sedimentne stene koji nastaju hemijskim izlučivanjem/taloženjem iz vodenih rastvora visoke koncentracije usled isparavanja (evaporacije). Uslovi formiranja evaporita vezani su za postojanje aridne klime (suve i tople) i uslovi isparavanja se najčešće postižu u zatvorenim morskim basenima, lagunama, supratajdalima i slanim jezerima.

Najzastupljeniji evaporiti su anhidrit ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), gips (CaSO_4), halit (NaCl), karnalit ($\text{KMgCl}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), silvin (KCl), koji su praćeni pojavama krečnjaka i dolomita. Ako bi se posmatrao red formiranja karbonata i evaporita dobila bi se sledeća slika: u uslovima normalne morske vode – krečnjak, u supratajdalima – ranodijegenetski dolomit, anhidrit i ukoliko se salinitet povećava – halit i na kraju kalijске soli [33]. Cikličnost je česta osobina pojavljivanja evaporitskih sedimenata i obično se odigrava po šemi:

gips/anhidrit → halit → K, Mg hloridi, sulfati



Slika II.10. Najčešći uslovi taloženja/formiranja evaporita

Na istražnom području, uslovi u kojima je moglo doći do formiranja evaporitskih sedimenata postojali su krajem srednjeg i početkom gornjeg trijasa, kada je došlo do prvih pokreta alpske orogeneze, odnosno povlačenja gornjotrijaskog mora prema jugoistoku iz oblasti Ruja, Grebena i Vlaške, a postepeno iz stare Planine [103]. U sprudnim krečnjacima J_3^3 starosti zapažen je prelaz ka plitkovodnom sprudnom tipu sedimentacije. Facije otvorenog mora s kraja gornje jure zamjenjene su početkom krede ($K_1^{1,2}$) subsprudnim, koje odgovaraju internoj zoni spruda odnosno plitkom, sprudnom zatvorenom moru [103].

2.5. Detaljne geološke i hidrogeološke karakteristike duž tunela HE Piro

Najpouzdaniji podaci o geološkim i hidrogeološkim karakteristikama istražnog područja svakako su prikupljeni istraživanjima tokom izgradnje, odnosno iskopa tunela, od strane Energoprojekta 1982. godine, kada je izvršeno detaljno kartiranje tunela. Raspoloživi podaci su analizirani i sistematizovani, sa ciljem interpretiranja geoloških i hidrogeoloških karakteristika na trasi tunela (slika II.11) [39]:

0+000 – 0+810 – Početna deonica tunela izvedena je u krečnjacima i dolomitičnim krečnjacima, tankoslojevitim do pločastim. U fazi iskopa tunel je bio suv sa retkim kapanjima iz kalote. Izveden je paralelno potoku koji je u uslovima akumulacije pod usporom, tako da se cela deonica nalazi na 100 do 150 metara od akumulacije.

0+810 – 1+300 – deonica je izgrađena od kvarcnih konglomerata, peščara i glinaca. Iskop tunela izveden je praktično bez dotoka podzemnih voda. Registrovana su retka kapanja iz slojeva peščara. Pretpostavlja se da zbog čestog smanjenja paketa peščara (hidrogeološki kolektor) i glinaca (hidrogeološki izolator) na ovoj deonici nije formirana jedinstvena izdan, već pojedinačne manje izdani u jako ispucalim peščarima.

1+300 – 1+600 – Na početnom delu deonice do stacionaže 1+400 zastupljeni su sitnozrni, tankoslojeviti peščeri, jako ispucali. Od stacionaže 1+400 do 1+600 zastupljeni su peščari, laporoviti peščari i laporoviti krečnjaci debelo slojeviti. Za vreme iskopa na ovoj deonici registrovan je veliki priliv podzemnih voda u tunel. Na stacionaži 1+357 došlo je do naglog isticanja vode pod pritiskom u tunel. U prvom trenutku isticanje je iznosilo oko 130 l/s. Sa napredovanjem iskopa isticanje se smanjivalo tako da je nakon 2 meseca od pojavljivanja prve pojave, isticanje iznosilo 1-2 l/s na celoj deonici. Veća isticanja podzemnih voda u tunel registrovana su iz rasednih zona na stacionažama 1+367 (do 10 l/s) i 1+485 (8-10 l/s).

1+600 – 1+800 – Na ovoj deonici preovlađuju laporci, peskoviti laporci i laporoviti peščari. Iskop deonice izveden je bez priliva podzemnih voda. Za vreme remonta tunela na ovoj deonici nema priliva podzemnih voda u ispražnjen tunel.

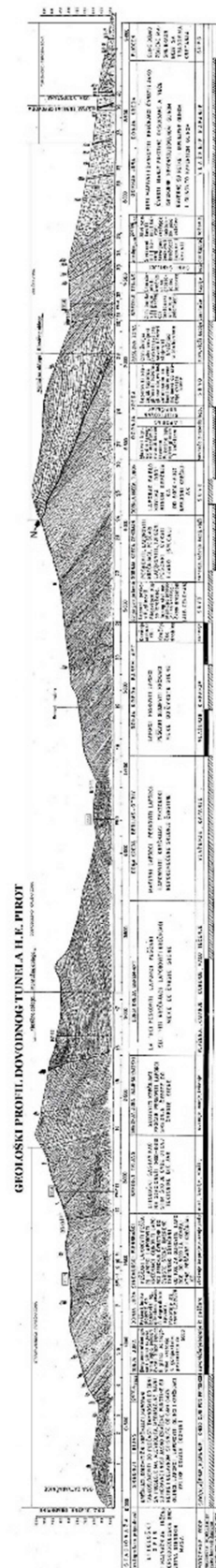
1+800 – 2+040 – Tunel je izveden u tankoslojevitim, bituminoznim krečnjacima srednjeg trijasa (T_2) sa pukotinama ispunjenim kalcitom, mestimično, posebno u zoni kontakta sa bitumenom. U vreme iskopa registrovan je umereni priliv podzemnih voda sa curenjem i mestimičnim tečenjem iz kalote. Registrovano je prisustvo vodonik sulfida (H_2S) u podzemnoj vodi. 2+040 – 2+260 – Veći deo ove deonice izveden je u tankoslojevitim krečnjacima (T_2) ali je priliv podzemnih voda u vreme iskopa bio dosta mali.

2+260 – 7+015 – Od početka deonice do stacionaže 3+156 tunel je izveden klasičnom metodom, a preostali deo tunelskom mašinom. Veći deo izveden je u laporovitim sedimentima tako da je iskop

izveden u suvom. Priliv vode registrovan je na nekoliko kraćih deonica. Od stacionaže 4+100 do 4+340 tunel je izveden u laporovitim krečnjacima i registrovan je manji priliv podzemnih voda. Zone 5+665 do 6+100 i 6+665 do 6+745 su izvedene u peskovitim krečnjacima i pešćarima. U vreme iskopa registrovan je veliki priliv podzemnih voda sa povišenom temperaturom (oko 20°C) u tunel. Izrazito veliki priliv registrovan je od stacionaže 6+00 do 6+100. U prvi mah na stacionaži 6+080 procenjeni priliv iznosio je oko 30 l/s. Dugotrajnim isticanjem podzemnih voda u tunel došlo je do praznjenja izdani što je uslovalo presušivanje jednog izvora na površini terena. Pored pomenutih zona iskopom tunela na nekoliko mesta registrovane su kraće zone sprudnih krečnjaka. Na ovim deonicama registrovan je manji priliv voda.

7+015 – 7+780 – Iskop ove deonice izveden je u krečnjacima (T₂) i silikovanih i tektonizovanim krečnjacima (J). Od stacionaže 7+061 – 7+300 tunel je izveden kroz rasednu zonu koja je upravna na tunel. Duž cele zone tokom iskopa registrovan je veliki priliv podzemnih voda u tunel. Izrazito veliki priliv registrovan je u zoni „Čombetovog izvora”, odnosno od stacionaže 7+300 do 7+400. Bušotinom BT-9 koja je izvedena u toj zoni u vreme bušenja konstatovan je nivo podzemnih voda na 30 m od površine, odnosno 250 m iznad nivelete tunela.

7+780 – 8+870 – Iskop deonice izveden je u masivnim i izrazito karstifikovanim krečnjacima. Nivo podzemnih voda nalazi se duboko ispod tunela tako da u vreme iskopa nije bilo priliva podzemnih voda u tunel. Usled velike karstifikacije krečnjaka utrošci injekcionih masa bili su jako veliki i iznosili su prosečno 5 t/m tunela.



Slika II.11. Geološki profil duž tunela tokom iskopa

III METODE ISTRAŽIVANJA

Za potrebe rešavanja predmetne problematike koja se razmatra u ovom doktoratu, neophodno je bilo primeniti veliki broj različitih metoda istraživanja. Iako je najveći akcenat stavljen na primeni hidrogeoloških metoda (određivanje kvantitativnih i kvalitativnih karakteristika podzemnih voda) kao primarnih za rešavanje postavljenog naučnog problema, neophodno je bilo primeniti i niz drugih metoda.

Meteorološke metode primenjene su radi definisanja klimatskih karakteristika istražnog područja, pre svega temperaturnog i padavinskog režima sa ciljem sagledavanja njihovog uticaja na prirodni hidrogeološki režim. Međutim, ove metode su u značajnoj meri poslužile i za definisanje tipova hidrogeoloških sistema, posebno lokalnih kod kojih klimatski faktori imaju dominantan uticaj na proces formiranja podzemnih voda.

Hidrološke metode istraživanja su vršene sa ciljem određivanja zavisnosti podzemnih i površinskih voda što je zahtevalo prikupljanje dovoljno podataka o vodostajima i proticajima na postavljenim vodomernim profilima. Ove metode su primenjivane i u samom hidrotehničkom tunelu, u fazi remonta, kada su mereni dotoci voda u praznom tunelu. Takođe, u okviru ovih metoda primenjena su i dopunska termovizijska osmatranja koja su bila od posebne važnosti za definisanje zona isticanja termalnih voda u površinski tok.

Hidrogeološke metode istraživanja, kao najznačajnije primenjene su sa ciljem definisanja kvantitativnih i kvalitativnih karakteristika podzemnih voda na celom istražnom području i kao takve su bile ključne za utvrđivanje tipova hidrogeoloških sistema, odnosno postojanja kompleksnog hidrogeološkog sistema i utvrđivanja stepena interakcije podzemnih voda i voda transportovanih tunelom pod pritiskom. Hidrogeološke metode kojima su prikupljeni podaci o kvantitativnim karakteristikama podzemnih voda omogućile su definisanje stepena hidrauličke zavisnosti tunnelske vode i hidrogeološke sredine, sa ciljem definisanja i markiranja potencijalno kritičnih zona u hidrogeološkoj sredini ali i u samom tunelu sa aspekta njegove stabilnosti. Hidrogeološke metode kojima su prikupljeni podaci o kvalitativnim karakteristikama podzemnih voda bile su od posebne značajnosti za sagledavanje negativnih uticaja rada tunela na hidrogeološku sredinu sa aspekta izmene prirodnih pravaca cirkulacije podzemnih voda, čime su podzemne vode pretrpele značajne promene hemijskog sastava. Sa druge strane, kvalitativni pokazatelji podzemnih voda su u značajnoj meri omogućili jasnije utvrđivanje kritičnih zona u tunelu, pre svega sa aspekta njihovog agresivnog delovanja na betonsku oblogu tunela.

Metode merenja sumarnih gubitaka imale su za cilj utvrđivanje količine voda koje se gube u samom tunelu kada je objekat pod pritiskom i eventualnih dotoka u objekat kada dolazi do postepenog rasterećenja pritiska, odnosno pražnjenja tunela.

Metode određivanja stepena agresivnosti podzemnih voda na stanje betonske obloge poslužile su za određivanje, odnosno markiranje potencijalno kritičnih/ugroženih zona u tunelu sa aspekta agresivnosti podzemnih voda ali i stabilnosti samog objekta. Tako agresivne vode i pored agresivnog delovanja na betonsku oblogu tunela potencijalno su agresivne i na samu hidrogeološku sredinu, odnosno prirodnu životnu redinu.

Ceo istraživački proces bio je uslovljen različitim režimom rada tunela pod pritiskom, odnosno obuhvatio je period normalnog funkcionisanja tunela (radni režim/pod pritiskom), period kada je tunel bio van funkcije (prazan/remont) i period ponovnog punjenja tunela (vraćanje u stanje ponovnog radnog režima/uspostavljanje rada pod pritiskom) pa su i same metode istraživanja bile prilagođene

tim uslovima. Određene metode primenjivane su tokom celog osmatračkog perioda (kada je tunel u funkciji i uslovima kada je tunel van funkcije/prazan) dok su pojedine metode primenjivane samo u periodima kada je tunel bio van funkcije, tj. kada je bilo moguće sprovođenje istraživanja u samom tunelu.

Istraživanja su ukupno trajala 108 dana i obihvatila su tromesečni period (septembar, oktobar i novembar 2016. godine) tokom kog su prikupljeni podaci o kvantitativnim i kvalitativnim karakteristikama podzemnih voda u toku različitog režima rada tunela (tabela III.1).

Tabela III.1: Osmatrački periodi tokom kojih su sprovedena istraživanja

Faze	Režim rada tunela	Početak - kraj osmatračkog perioda	Ukupno trajanje faze (dani)
A	Radni režim/ tunel pod pritiskom/u funkciji	28/8/2016 – 19/9/2016	23 dana
B	Tunel van funkcije	19/9/2016 – 24/10/2016	35 dana
C	Tunel opet u funkciji/ ponovni radni režim	24/10/2016 – 10/11/2016 (13/12/2016)	50 dana (83 dana)

Važno je naglasiti da je period osmatranja režima podzemnih voda u piježometrima trajao duže 33 dana u odnosu na osmatranja na drugim pojavama i objektima, a svih dodatnih 33 dana osmatranja obuhvatila su fazu C (period trajanja 83 dana).

Sve primenjene metode zahtevale su u prvom redu formiranje pouzdane osmatračke mreže sa ciljem prikupljanja što više podataka, pre svega o kvalitativnim i kvantitativnim karakteristikama podzemnih voda na svim hidrogeološkim pojavama i objektima u zoni potencijalnog uticaja rada tunela pod pritiskom. Uspostavljanje monitoringa na svim izvorima, vodotokovima, piježometrima, kao i u samom tunelu predstavljao je kompleksan proces u kome je bilo potrebno definisati vremenski interval osmatranja (na 2 minuta, 1 dan ili 7 dana / 1 merenje) kao pouzdan trenutak dobijanja podatka. Da li će monitoring biti vršen na dvominutnom, dnevnom ili sedmodnevnom nivou, pre svega je bila procena važnosti detaljnosti podataka za rešavanje predmetne problematike, koja je donešena na osnovu prethodno sprovedenih istraživanja tokom 2014. godine. Međutim, pored toga monitoring je dosta bio uslovljen i samim istražnim terenom, odnosno njegovom nepristupačnosti ali i samim mernim mestom, odnosno obezbeđenosti osmatračke tačke sa aspekta sigurnog postavljanja instrumenta za kontinualno merenje.

1. Uspostavljanje osmatračke mreže (monitoring)

Sprovedeni terenski radovi za potrebe rešavanja postavljenog naučnog problema u prvom redu uključili su formiranje monitoring mreže na širem istražnom području i u hidrotehničkom tunelu (u uslovima kada je tunel van funkcije/remont).

Monitoring mreža obuhvatila je:

- monitoring meteoroloških uslova (padavinskog i temperaturnog režima na dnevnom nivou);
- monitoring kvantitativnih i kvalitativnih karakteristika površinskog toka (režim vodostaja – na dnevnom nivou i proticaja – na sedmodnevnom nivou, fizičko-hemijskih parametara: pH, TDS, T, EC, ORP, DO – na sedmodnevnom nivou);
- monitoring kvantitativnih i kvalitativnih karakteristika svih izvora lociranih na terenu (režim proticaja i fizičko-hemijskih parametara: pH, TDS, T, EC, ORP, DO – na sedmodnevnom nivou);
- monitoring kote gornje vode akumulacionog jezera (na šestočasovnom nivou);

- monitoring postojećih pijezometara (praćenje promena vrednosti temperature i pritiska/nivoa podzemnih voda – na dvominutnom nivou, fizičko-hemijskih parametara: pH, TDS, T, EC, ORP, DO – na sedmodnevnom nivou).

Lociranje termalnih izvora obavljeno je primenom termovizijske kamere. Sve vode obuhvaćene monitoring mrežom (površinske i podzemne) uzorkovane su za potrebe izrade hemijskih analiza u više različitih vremenskih serija.

U periodu remonta tunela (tunel van funkcije) uspostavljen je monitoring u tunelu:

- na šahti tunelske zatvaračnice vršeno je kontinualno merenje promena vrednosti temperature i pritiska/nivoa – na dvominutnom nivou (period pražnjenja hidrotehničkog tunela / merenje sumarnih gubitaka);
- na kanalu izlazne građevine vršeno je merenje promena vrednosti temperature i pritiska/nivoa – na dvominutnom nivou, proticaja – na sedmodnevnom nivou i kontinualno merenje fizičko-hemijskih parametara voda – na 1-časovnom nivou (pH, TDS, T, EC, ORP, DO).

U periodu kada je tunel bio van funkcije i kada je bilo moguće pristupiti objekatu, vršena su istraživanja direktno u tunelu.

- osmatranje kvantitativnih karakteristika voda koje dotiču u tunel izvršeno je hidrometrijskim merenjima u tri vremenske serije/preseka, na 4 merna profila, koji su definisani u skladu sa tehničkim mogućnostima i karakterističnim zonama procurivanja;
- osmatranje kvalitativnih karakteristika voda koje dotiču/procuruju u tunel vršeno je merenjima fizičko-hemijskih karakteristika voda *in situ*: pH, TDS, T, EC, ORP, DO na osnovu kojih je vršena selekcija voda koje su uzorkovane za potrebe izrade hemijskih analiza;

Navedena merenja u tunelu kao i uzorkovanje voda za potrebe izrade hemijskih analiza, vršena su u tri vremenske serije: prva merenja i serija uzoraka uzeta je pri prvom ulasku u tunel, druga na sredini perioda i treća pred samo zatvaranje tunela i njegovo puštanje u ponovni rad.

Monitoring je uključio navedena osmatranja na:

- 7 izvora - Berilovac, Izvor, Nišor 1/2, Glame, Dobri Do, Dag Banjica
- 1 vodotoku – Dobrodolska reka
- 3 pijezometra – PP-1, PP-3 i PP-4
- Akumulacionom jezeru – Kota gorenje vode
- Hidrotehničkom tunelu – šahti tunelske zatvaračnice, kanalu izlazne građevine i u samoj unutrašnjosti tunela.

2. Meteorološke i hidrološke metode

Meteorološke metode korišćene su za analizu temperaturnog i padavinskog režima u cilju sagledavanja osnovnih klimatskih karakteristika istražnog područja i njihovog upoređivanja sa navedenim klimatskim parametrima osmotrenih u godini kada su sprovedena detaljna hidrogeološka istraživanja – 2016. godina, u odnosu na višegodišnji period. Podaci o dnevnim padavinama i temperaturama istražnog područja preuzeti su iz meteoroloških godišnjaka RHMZa sa meteorološke stanice Dimitrovgrad, mereni standardnim metodološkim postupcima i instrumentima (kišomerima, pluviografima, termometrima). Poznavanje prostorne i vremenske raspodele padavina je neophodan uslov za utvrđivanje uslova prihranjivanja hidrogeološke sredine, režima i bilansa podzemnih voda

[74]. Zbog toga je neophodno analizirati godišnje, mesečne i dnevne sume padavina za višegodišnji period osmatranja. Ove metode su izuzetno važne za proces sagledavanja i razumevanja hidrogeološkog sistema na istražnom području. Klimatski parametri, kao elementi vodnog bilansa od izuzetne su važnosti za sam proces cirkulacije podzemnih voda i njihove promene mogu značajno uticati na izmene u hidrogeološkoj sredini. U kojoj meri i koliko brzo temperaturni režim vazduha i režim padavina utiče na režim podzemnih voda često predstavlja ključni indikator prisustva određenog hidrogeološkog sistema. Direktni uticaj klimatoloških parametara na kvantitativne i kvalitativne karakteristike podzemnih voda ukazuje na njihove dosta plitke zone prihranjivanja i isticanja, što je odlika lokalnih hidrogeoloških sistema. Potpuno odsustvo veze ovih parametara sa hidrogeološkom sredinom je često indikator duboke cirkulacije podzemnih voda, odnosno postojanja regionalnih hidrogeoloških sistema.

Primena hidroloških metoda podrazumevala je prvenstveno uspostavljanje monitoringa kvantitativnih parametara površinskih tokova smeštenih u zoni potencijalnog uticaja rada tunela. Ove metode omogućile su utvrđivanje stepena hidrauličke zavisnosti površinskih i podzemnih voda, s obzirom na poznatu činjenicu da su veoma često podzemne i površinske vode u direktnoj hidrauličkoj vezi. Pored merenja proticaja na vodotokovima, hidrološke metode su primenjene i za potrebe merenja proticaja/izdašnosti pojedinih vrela, kao i za potrebe merenja dotoka voda u tunelu.

Osmatranje vodostaja na uspostavljenim mernim profilima vršeno je preko postavljenih vodomernih letvi, dok su merenja protoka vodotoka vršena instrumentom *EasyFlow* (slika III.1) u različitim hidrološkim stanjima sa ciljem uspostavljanja krive protoka.

Za potrebe merenja proticaja korišćen je instrument *EasyFlow* koji funkcioniše na metodi razblaživanja trasera. Osnovni princip ove metode sastoji se u ubacivanju u vodotok koncentrovanog rastvora trasera u uzvodnom delu vodotoka, dok se nizvodno na udaljenosti koja je dovoljno velika od mesta ubacivanja trasera da se dobije dobra mešavina sa rečnom vodom, postavlja sonda instrumenta koja meri koncentraciju trasera. Ovo razređivanje predstavlja funkciju brzine proticaja, koja se pretpostavlja konstantnom duž razmatrane sekcije/dela vodotoka u toku vremena merenja. U toku ovakvog merenja važno je da tok reke ostane konstantan, da traser u potpunosti prođe kroz merni sektor i da meša bude takva da u svakoj tački rečnog toka bude ista količina trasera. Ova metoda je posebno prilagođena i pogodna za merenja vodotokova malih dubina, velikih brzina ili turbulentnih tokova koji nemaju stabilnu brzinu, kao što su manje reke ili potoci. Kao osnovni traser ovaj instrument koristi kuhinjsku so (NaCl) koja predstavlja idealan traser jer je vrlo dostupan, jeftin i dosta rastvorljiv u vodi, a takođe nije štetan za floru i faunu u korišćenim koncentracijama. Konkretno, sam metod merenja podrazumeva ubacivanje u vodotok poznatu masu soli M koja je razblažena u određenoj količini rečne vode. Nizvodno, u reci je postavljena sonda za elektroprovodljivost koja meri električnu provodljivost vode tokom trajanja T prolaska „oblaka” soli. Između provodljivosti vode i koncentracije rastvorene soli postoji linearna veza, pa se kriva koncentracije može izvesti u funkciji vremena C_t . Proticaj Q se onda dobija integrisanjem koncentracije u toku vremena:

$$Q = \frac{M}{\int_0^T (C_t - C_0) dt}$$

gde je:

Q : proticaj vodotoka (l/s)

M : masa ubačenog trasera (mg)

C_t : salinitet vode u trenutku t (mg/l)

C_0 : bazni salinitet vode (mg/l)

T : trajanje merenja (s)

Tehničke karakteristike instrumenta date su u tabeli III.2.



Slika III.1. Instrument *EasyFlow* i Interfejs softvera *EasyViewer*

Tabela III.2. Tehničke karakteristike instrumenta *EasyFlow*

Opseg merenja	od 0.1 do 99900 l/s
Preciznost merenja	< 5%
Ponavljanje merenja	± 1%
Tip trasera	Kuhinjska so (NaCl)
Količina trasera	od 10 g do 100 kg soli
Idealna mešavina trasera	Između 5 i 20 g soli po l/s procenjenog proticaja (npr. -300 l/s ->2kg)
Punjenje	3 x 1.5V alkalne baterije
Izdržljivost	Oko 100 sati u normalnim uslovima
Povezanost	preko linka RS-232
Dimenzija/težina	Cela torba: 260x190x130 mm/1240 g Uređaj sa sondom: 230x150x80 mm/620 g
Vodootporan	IP65
Salinitet	
Opseg merenja	od 0 do 3200 mg/l
Osetljivost	1 mg/l
Preciznost	< 1%
Temperatura	
Opseg merenja	od 0 do +40 °C
Preciznost	±0.2 °C

Zbog nemogućnosti vršenja kontinualnih merenja proticaja, primenjen je uobičajan metod osmatranja vrednosti vodostaja na dnevnom nivou i povremenim merenjima proticaja, na sedmodnevnom nivou sa ciljem formiranja, odnosno konstruisanja relevantne krive proticaja $Q=f(H)$.

U okviru hidroloških metoda primenjena je i metoda termometrijskih merenja kao dodatna metoda u cilju definisanja zona isticanja termalnih podzemnih voda u vodotok. Za potrebe vršenja ovih merenja korišćena je termovizijska kamera *Flir One Pro* temperaturnog opsega od -20 °C do 400 °C, tačnosti ±3°C ili 5% očitane vrednosti i termalne osetljivosti <0.15°C. Kamera se povezuje sa mobilnim

aparatom ili tabletom preko kojih se dobija slika, odnosno termogrami, a radi dalje obrade se prebacuju na računar i analiziraju u nekom od komercijalnih programa.

3. Hidrogeološke metode

Iz razloga kompleksnosti i detaljnosti primenjenih hidrogeoloških metoda istraživanja, ove metode su podeljene na dva dela:

- Metode određivanja kvantitativnih karakteristika podzemnih voda
- Metode određivanja kvalitativnih karakteristika podzemnih voda (hidrohemijske metode)

3.1. Metode određivanja kvantitativnih karakteristika podzemnih voda

Osmatranje kvantitativnih karakteristika na svim izvorima koji su locirani u zoni potencijalnog uticaja hidrotehničkog tunela vršeno je zapreminskom metodom ili hidrometrijskim merenjima, na sedmodnevnom nivou, tokom celog osmatračkog perioda (tunel u funkciji i van funkcije). Različite vrste kaptaža razmatranih izvora (kaptažni objekti ili primitivne kaptaže) bili su kriterijum na osnovu kojih je birana metoda za određivanje njihove izdašnosti. Na izvorima manje izdašnosti i koji su primitivno kaptirani primenjena je najjednostavnija, zapreminska (volumenska) metoda. Ova metoda podrazumeva zahvatanje voda koja ističe sudom poznate zapremine u određenom vremenskom periodu, odnosno proticaj izvora se određuje po formuli:

$$Q = \frac{V}{t}$$

gde je:

Q : izdašnost izvora (l/s)

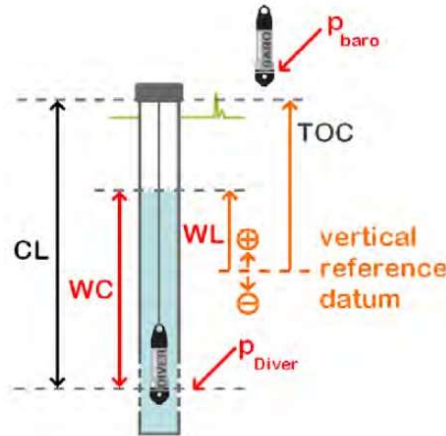
V : zapremina suda (l)

t : vreme za koje se sud zapremine V napuni vodom (s)

Izdašnost izvora veće izdašnosti, čije vode se zahvataju kaptažnim objektima i koriste za lokalno vodosnabdevanje bilo je teško meriti pa je na jednom izvoru korišćen metodom hidrometrije (vodomerna letva i instrument *EasyFlow*) tako što je meren vodostaj i proticaj na kanalu gde najveći deo voda gravitira od izvora ka nižim delovima, dok je na drugom izvoru proticaj meren zapreminskom metodom na reprezentativnoj česmi iz razloga postojanja 16 česama u delu ispod kaptažnog objekta. Na terenu je procenjeno da je u ovako specifičnom slučaju najbolje vršiti merenja na jednoj, uvek istoj primitivnoj kaptaži koja će biti repna tačka razmatranog izvora.

Monitoring kvantitativnih karakteristika podzemnih voda u pijezometrima sproveden je na detaljnom nivou, postavljanjem *Eijkelkamp* mernih sonde (dajvera/Diver) dizajniranih za merenje pritiska i temperature vode. Diver se sastoji od senzora pritiska kojim se meri pritisak vode, senzora temperature, memorije za čuvanje merenja i baterije. Ovaj instrument je dataloger, odnosno sakuplja podatke u svojoj internoj memoriji, a interval, vremenski period u kome će biti sakupljeni podaci programira korisnik. Diver meri apsolutni pritisak, što znači da senzor pritiska ne meri samo pritisak vode, već i pritisak vazduha koji deluje na vodnu površinu. Ako vazdušni pritisak varira, izmereni pritisak podzemne vode će tako takođe varirati, bez obzira što nema promena nivoa vode. Zbog toga je neophodno instalirati i baro sonde (Baro Diver) zbog sprovođenja barokompensacije za promenu vazdušnog pritiska, u cilju dobijanja preciznih vrednosti nivoa podzemnih voda.

Postupak izračunavanja nivoa podzemnih voda na osnovu podataka registrovanih dajverima čija vrednost se koriguje podacima registrovanih na baro sondi vrši se po proceduri prikazanoj na slici III.2



Slika III.2. Postupak barokompezacije podataka o nivoima podzemnih voda registrovanih dajverima (Diver manual, 2014, Schumberger water services, Eijkelkamp)

Nivo podzemne vode (water level/WL) se definiše u osnovu na referentni vertikalni podatak (vertical reference datum), odnosno nadmorsku visinu/kotu terena na kojoj se nalaze usta pijeziometra u koji se instalira sonda. Vrh kućišta meri se u odnosu na kotu terena i na slici je označen kao (TOC) (cm), dok je dajver okačen na kanapu dužine (CL) (cm). Baro dajver meri atmosferski pritisak (p_{baro}), a dajver (p_{diver}) meri pritisak koji vrši vodeni stub (water column/WC) i atmosferski pritisak.

Vodeni stub (WC) iznad dajvera može se izraziti kao:

$$WC = 9806.65 \frac{P_{diver} - P_{baro}}{p \cdot g} \quad (1)$$

gde je:

p : pritisak u cm H₂O

g : gravitaciono ubrzanje (9.81 m/s²)

Nivo vode (WL) u odnosu na kotu terena izračunava se na sledeći način:

$$WL = TOC - CL + WC \quad (2)$$

Zamenom WC iz jednačine (1) u jednačini (2) dobija se:

$$WL = TOC - CL + 9806.65 \frac{P_{diver} - P_{baro}}{p \cdot g} \quad (3)$$

Dajveri pored pritiska mere i temperaturu podzemne vode. Temperatura se meri pomoću poluprovodničkog senzora. Ovaj senzor ne samo da meri temperaturu, već takođe koristi vrednost temperature da istovremeno kompenzuje senzor pritiska.

U toku sprovedenih istraživanja na istražnom području korišćeno je ukupno 9 dajvera (4-Mini-Diver, 2-Mikro-Diver, 1 TD-Diver i 2 Baro-Divera).

Mini-Diver je osnovni dajver sa kućištem od nerđajućeg čelika, prečnika 22 mm. Mini-Diver može da uskladišti maksimalno 24.000 merenja (datum/vreme, pritisak i temperatura).

Micro-Diver je najmanji dajver prečnika 18 mm sa kućištem od nerđajućeg čelika. Micro-Diver je može da sačuva najviše 48.000 merenja.

TD-Diver je dajver prečnika 22 mm sa kućištem od nerđajućeg čelika. Ovaj dajver može da sačuva maksimalno 72.000 merenja (datum/vreme, pritisak i temperatura).

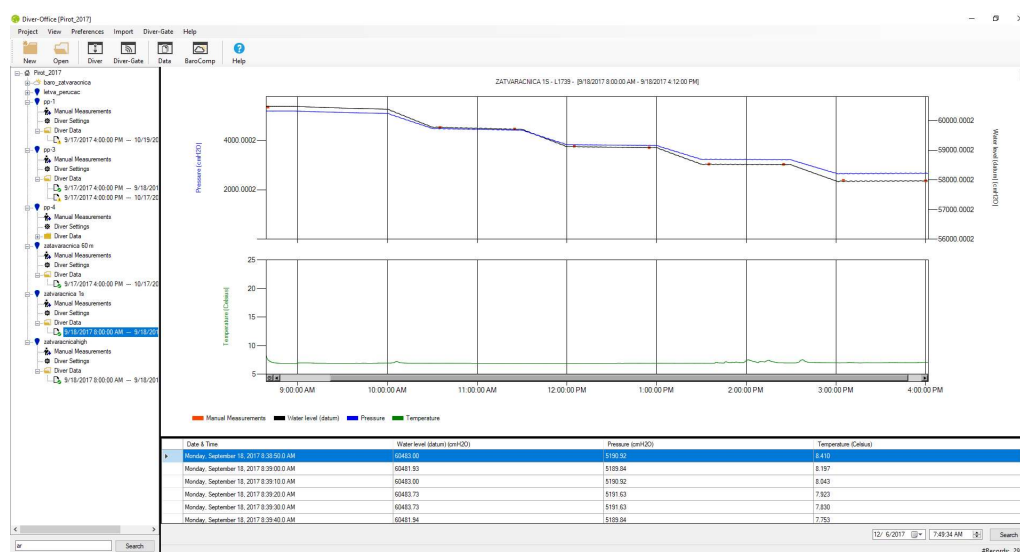
Baro-Diver meri atmosferski pritisak i koristi se za kompenzaciju varijacija atmosferskog pritiska koji su merili drugi dajveri. Ovaj dajver se takođe ima kućište od nerđajućeg čelika i prečnika je 22 mm. Može da sačuva najviše 24.000 merenja.

Tehničke karakteristike korišćenih dajvera date su u tabeli III.3.

Tabela III.3: Tehničke karakteristike korišćenih dajvera

		Mini-Diver	Mikro-Diver	TD-Diver	Baro-Diver
Temperatura	Opseg merenja	20-80 °C	20-80 °C	20-80 °C	20-80 °C
	Radna temperatura	0-50 °C	0-50 °C	0-50 °C	-10-50 °C
	Tačnost (max)	±0.2 °C	±0.2 °C	±0.2 °C	±0.2 °C
	Tačnost (tipična)	±0.1 °C	±0.1 °C	±0.1 °C	±0.1 °C
	Rezolucija	0.01 °C	0.01 °C	0.01 °C	0.01 °C
Pritisak	Opseg merenja vodenog stuba	10-100 mH ₂ O	10-100 mH ₂ O	10-100 mH ₂ O	150 cmH ₂ O
	Tačnost (max)	±2.5-25 cmH ₂ O	±3-30 cmH ₂ O	±2.5-25 cmH ₂ O	±2 cmH ₂ O
	Tačnost (tipična)	±0.5-5 cmH ₂ O	±1-10 cmH ₂ O	±0.5-5 cmH ₂ O	±0.5cmH ₂ O
	Dugoročna stabilnost	±2-20 cmH ₂ O	±3-30 cmH ₂ O	±2-20 cmH ₂ O	±2 cmH ₂ O
	Rezolucija	0.2-2 cmH ₂ O	0.2-2 cmH ₂ O	0.06-0.36 cmH ₂ O	0.1 cmH ₂ O

Za obradu podataka, korišćen je autorizovani softver Diver-Office 2017.2 (slika III.3), verzija 9.2.0.17 Van Essen Instruments.



Slika III.3. Interfejs softvera Diver-Office 2017.2

Manuelna merenja nivoa podzemnih voda vršena su elektokontaktним nivomerom (*Eijkelkamp*) u cilju kontrole i usklađivanja dobijenih podataka dajverima. Nivomer poseduje akustičnu i vizuelnu signalizaciju kontakta sa vodom i sastoji se od merne sonde i merne trake (Slika III.4). Elektroda prečnika 15 mm, uranjajuće zapremine 17.6 cm³ pogodna je za sve vrste podzemnih voda (osetljivosti 50 μ S/cm do 220 mS/cm). Opseg merenja nivomera, odnosno dužina merne trake iznosi 150 m sa tačnošću očitavanja 1 cm. Tehničke karakteristike nivomera date su u tabeli III.4.

Tabela III.4: Tehničke karakteristike nivomera Eijkelkamp

Merna sonda - materijal	Nerđajući čelik i elektroplakirana bronza
Merna sonda - dimenzije	Prečnika 15 mm, dužine 195 mm
Merna traka	Dvožilna traka od belog polietilena sa 2 žice od nerđajućeg čelika, otporna na ultraviolettne zrake i kontaminiranu ili slanu vodu.
Napajanje	4x1.5 Volt baterije



Slika III.4. Nivomer (Eijkelkamp)

3.2. Metode određivanja kvalitativnih karakteristika podzemnih voda (hidrohemijske metode)

Značajan obim istraživanja sproveden je primenom hidrohemijskih metoda, pomoću kojih su određivane kvalitativne karakteristike podzemnih i površinskih voda na istražnom terenu. Od kvalitativnih karakteristika prvo su vršena osmatranja osnovnih fizičko-hemijskih karakteristika podzemnih voda (pH, ukupno rastvorene soli (TDS), temperatura (T), elektroprovodljivost (EC), oksido-redukcioni potencijal (ORP), rastvoreni kiseonik (DO)) multiparametaraskom sondom tipa, *HI9298194* i proizvođača *HANNA*, *in situ*, tokom celog osmatračkog perioda.

Multiparametraska sonda *HI9298194* (slika III.5) sa kablom dužine 20 m, predstavlja prenosni uređaj za akviziciju više parametara kvaliteta podzemnih voda. Instrument poseduje 4 senzora: temperaturni senzor, pH/ORP senzor, DO senzor i EC/TDS/Otpornost/Salinitet senzor, koji u kontaktu sa vodom mere parametre: pH, temperaturu (T), elektroprovodljivost (EC), oksido-redukcionog potencijala (ORP), ukupo-rastvorene soli (TDS), rastvoreni kiseonik (DO). Takođe instrument ima i senzor za merenje atmosferskog pritiska. Instrument poseduje opciju skladištenja podataka, odnosno spada u grupu dataloger instrumenata koji omogućavaju kontinualno merenje i beleženje merenja na svojoj internoj memoriji. Maksimalna memorija instrumenta iznosi 45.000 podataka u kontinualnom merenju ili u pojedinačnom logovanju/beleženju. Interval logovanja može biti podešen u opsegu od 1 sekund do 3 sata. Svi zabeleženi podaci se preko USB priključka prebacuju na računar i obrađuju u

odgovarajućem softveru HI9298194. Tehničke karakteristike sonde instrumenta prikazane su u tabeli III.5.

Tabela III.5: Tehničke karakteristike multiparametraskе sonde HANNA - HI9298194

Temperaturni senzor	
Opseg merenja	-5.00 – 55.00 °C
Rezolucija	0.01 °C
Tačnost merenje	± 0.15
Kalibracija	Automatska u 1. prilagođenoj tački
pH/ORP senzor	
Opseg merenja (pH)	0.00 – 14.00 pH
Rezolucija (pH)	0.001 pH
Tačnost merenje (pH)	± 0.02 pH
Kalibracija (pH)	Automatska u 1.2. ili 3 tačke sa automatskim prepoznavanjem 5 bafera (pH 4.01, 6.86, 7.01, 9.18, 10.01) ili 1 univerzalni/prilagođeni bufer
Opseg merenja (ORP)	±2000.0 mV
Rezolucija (ORP)	0.1 mV
Tačnost merenje (ORP)	± 1.0 mV
Kalibracija (ORP)	Automatska u 1. prilagođenoj tački
Rastvoreni kiseonik (DO) senzor	
Opseg merenja	0.0 – 500.0 %
Rezolucija	0.1 %
Tačnost merenje	± 1.5 – 3.0 %
Kalibracija	Automatska u 1. ili 2. tačke na 0, 100 % ili 1. prilagođenoj tački
EC/TDS/Otpornost/Salinitet senzor	
Opseg merenja (EC)	0 – 200 mS/cm (apsolutni EC najviše do 400 mS/cm)
Rezolucija (EC)	1 µS/cm – 400 mS/cm
Tačnost merenje(EC)	± 1.0 %
Kalibracija (EC)	Automatska u 1. tački sa 6 standardnih rastvora (84 µS/cm, 1413 µS/cm, 5.00 mS/cm, 12.88 mS/cm, 80.0 mS/cm, 111.8 mS/cm) ili u 1. prilagođenoj tački
Opseg merenja (TDS)	0 – 400000 mg/l
Rezolucija (TDS)	1 mg/L – 400 g/l
Tačnost merenje(TDS)	± 1.0 %
Kalibracija (TDS)	Na osnovu kalibracije elektroprovodljivosti (EC) ili saliniteta
Opseg merenja (Otpornost)	0 – 999999 Ω·cm
Rezolucija (Otpornost)	Zavisi od očitavanja otpornosti
Kalibracija (Otpornost)	Na osnovu kalibracije elektroprovodljivosti (EC) ili saliniteta
Opseg merenja (Salinitet)	0.0 – 70.0 PSU
Rezolucija (Salinitet)	0.01 PSU
Tačnost merenje(Salinitet)	±2 %
Kalibracija (Salinitet)	Na osnovu kalibracije elektroprovodljivosti (EC)

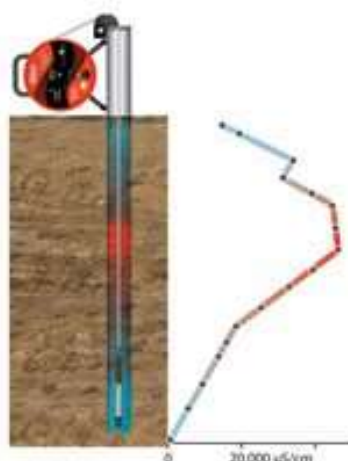


Slika III.5. Multiparametarska sonda HANNA - HI9298194

Svi senzori se kalibrišu po standardnim procedurama pre svakog merenja sa ciljem dobijanja relevantnih podataka. Kalibracija je proces koji standardizuje električni signal od senzora do standarda reagensa poznata vrednost. Temperaturni senzor je fabrički kalibrisan za očitavanje temperature ali se može izvršiti kalibracija temperature u jednoj tački ili vratiti na fabričku kalibraciju. Za ovaj postupak potreban je referentni instrument za merenje temperature. pH senzor za kalibraciju koristi 3 pufera, odnosno kalibriše se u tri odabrane tačke (pH 4.01, 6.86, 7.01, 9.18, 10.01 ili jedan prilagođeni pufer). Kalibracija senzora rastvorenog kiseonika (% D.O.), odnosno opseg zasićenja može se izvoditi u jednoj ili 2 standardne tačke (0% i 100%) ili na jednoj prilagođenoj tački (50% do 500%). EC senzor se kalibriše u najmanje 3 rastvora poznate vrednosti elektroprovodljivosti (0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 84 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 5.00 mS/cm, 12.88 mS/cm, 80.0 mS/cm and 111.8 mS/cm).

U pijezometrima je vršeno uzorkovanje podzemnih voda plastičnim uzorkivačem (*en. bailer*) prema standardnoj proceduri koja podrazumeva ispiranje 3-5 zapremine pijezometra i uzimanja uzorka nakon te operacije. Ovakvim postupkom omogućava se zahvatanje reprezentativnog uzorka na kome su *in situ* mereni fizičko-hemijski parametri multiparametarskom sondom a kasnije je isti uzorak korišćen za potrebe izrade hemijske analize u laboratoriji.

Pored merenja multiparametarskom sondom, za vertikalno sondiranje (po dubini) elektroprovodljivosti podzemnih voda korišćen je instrument *TLC Meters* (slika III.6), kanadskog proizvođača *Solinst* koji pored određivanja veličine elektroprovodljivosti vode, vrši merenja i nivoa podzemne vode i temperature. Očitavanja temperature i provodljivosti prikazuju se na LCD ekranu, a nivo vode očitava se sa trake kao kod uobičajenog merača nivoa vode. Kada je sonda uronjena u vodu nivo vode se prikazuje tonom i svetlošću koji traju oko 1 sekundu. Opseg merenja elektroprovodljivosti ovog instrumenta je od 0 – 80.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a greška merenja je do $\pm 5\%$. Sonda prikazuje provodljivost koja je standardizovana na 25 ° C, tj. specifičnu provodljivost (prikazuje se kao EC). Temperaturni koeficijent provodljivosti iznosi 2% po °C a tačnost temperature je $\pm 0.2^\circ\text{C}$, u opsegu od -15 ° C do + 50 ° C. Pre svakog merenja na terenu vršena je kalibracija sonde u kalibracionom rastvoru opsega koji je bio očekivan u podzemnoj vodi. Za dati instrument preporučena je kalibracija u dve tačke najbližeg očekivanog opsega provodljivosti na terenu, jednog ispod i jednog iznad datog opsega i to u rastvorima od 1413, 5000, 12.880 i 80.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Slika III.6. Instrument *TLC Meter*Slika III.7. Šema načina rada instrumenta *TLC Meter*

Uzorci podzemnih i površinskih voda za potrebe izrade hemijskih analiza u laboratoriji zahvatani su i transportovani u bocama zapremine 0.5 i 1.5 litara, uz prethodnu filtraciju kroz 0.45 µm membranski filter. Svaki uzorak u bocama od 0.5 l zakiseljen je rastvorom HNO₃ (na pH<2) kako bi se održali joni u rastvoru. Uzorci podzemnih voda za analizu gasa H₂S, uzeti su u staklenim bocicama sa posebnim zatvaračem. Hemijskim analizama ukupno je obuhvaćeno 80 uzoraka vode na kojima su u laboratorijskim uslovima određivani glavni joni: anjoni – HCO₃⁻, CO₃²⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻ i katjoni: Na, K, Ca, Mg. Na 44 uzorka voda analizirani su i katjoni Sr, Li i Fe, dok je određivanje gasa H₂S vršeno na 8 uzoraka.

Laboratorijske metode određivanja kvantitativnih parametara, pokazatelja hemijskog sastava uzorkovanih podzemnih voda, prikazane su tabelarno (tabela III.6).

Tabela III.6: Prikaz kvantitativnih parametara i metoda njihovih određivanja u laboratoriji

mg/l	Metoda
HCO ₃ ⁻	volumetrija
CO ₃ ²⁻	volumetrija
Cl ⁻	potenciometrija
SO ₄ ²⁻	turbidimetrija
NO ₃ ⁻	spektrofotometrija
Na ⁺	AAS – atomsko-apsorpcionaspektrofotometrija, plamenatehnika, acetilen-vazduh
K ⁺	AAS – atomsko-apsorpcionaspektrofotometrija, plamenatehnika, acetilen-vazduh
Ca ⁺⁺	AAS – atomsko-apsorpcionaspektrofotometrija, plamenatehnika, acetilen-azotsuboksid
Mg ⁺⁺	AAS – atomsko-apsorpcionaspektrofotometrija, plamenatehnika, acetilen-azotsuboksid
Fe _{ukupno}	AAS – atomsko-apsorpcionaspektrofotometrija, plamenatehnika, acetilen-vazduh
Sr ⁺⁺	AAS – atomsko-apsorpcionaspektrofotometrija, plamenatehnika, acetilen-azotsuboksid
Li ⁺	AAS – atomsko-apsorpcionaspektrofotometrija, plamenatehnika, acetilen-vazduh
H ₂ S	Gasnavolumetrija

4. Metoda određivanja sumarnih gubitaka u tunelu pod pritiskom

Merenje sumarnih gubitaka u tunelu pod pritiskom vršeno je u šahti tunelske zatvaračnice u uslovima kada je tunel bio pod pritiskom. Procedura merenja počinje spuštanjem pomoćnog zatvarača na šahti ulazne građevine čime se sprečava dotok vode u tunel iz akumulacije, dok se kontrolisano ispuštanje vode iz tunela vrši na turbinama. U ovakvom stanju tunel se nalazi pod pritiskom akumulacione vode i metoda merenja sumarnih gubitaka u tunelu obuhvatala je merenja u 5 stepenica držanja nivoa vode, u vremenskom trajanju od 1 sat. Program merenja sumarnih gubitaka dat je u tabeli III.7.

Tabela III.7: Program merenja sumarnih gubitaka

Merenje/Ispuštanje	Vreme trajanja (h)
I merenja	9:00 – 10:00
I ispuštanje	10:00 – 10:30
II merenja	10:30 – 11:30
II ispuštanje	11:30 – 12:00
III merenja	12:00 – 13:00
III ispuštanje	13:00 – 13:30
IV merenja	13:30 – 14:30
IV ispuštanje	14:30 – 15:00
V merenje	15:00 – 16:00

Sumarni gubici q (l/s) računaju se na osnovu ΔH - promene nivoa u zatvaračnici, odnosno zapremine ΔV i Δt – vremena u kome su vršena merenja na nekoj stepenici držanja nivoa vode.

$$q \text{ (l/s)} = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

5. Metode određivanja stepena agresivnosti podzemnih voda na stanje betonske obloge tunela

Za potrebe određivanja stepena agresivnosti podzemnih voda na stanje betonske obloge tunela, korišćene su metode EU standarda EN 206-1, standarda Kalifornijskog ministarstva saobraćaja (CDT 2003), Larson-Skold-ovog (LSkl) indeksa i kriterijumi agresivnih karakteristika podzemnih voda po [47], na osnovu kojih su markirane potencijalno kritične/ugrožene zone u tunelu sa aspekta agresivnosti podzemnih voda i stabilnosti hidrotehničkog objekta.

EU standarda EN 206-1 [31] definiše stepen agresivnosti podzemnih voda se na osnovu parametara pH, sadržaja Mg i SO_4 jona, dok je sadržaj Cl jona u podzemnim vodama sa aspekta agresivnosti definisan na osnovu standarda Kalifornijskog ministarstva saobraćaja (CDT 2003). Agresivnost podzemnih voda na betonsku konstrukciju može se definisati i računskim putem korišćenjem Larson-Skold-ovog indeksa (LSkl) [2], [54] odnosno određivanja odnosa sadržaja SO_4 i Cl jona u odnosu na alkalitet koji obuhvata hidrokarbonate i karbonate. Ovaj indeks nije predviđen za vode sa malim koncentracijama rastvorene materije (uobičajno se koriste za vode kod kojih je sadržaj rastvorene materije od 250-1000 mg/L) i računski se dobija na osnovu obrazca:

$$LSki = \frac{Cl^- + SO_4^{2-}}{HCO_3^- + CO_3^{2-}}$$

Ako je vrednost ovog indeksa veći od 1.2 onda uzorkovane vode imaju izuzetno veliku agresivno dejstvo kroz proces taloženja hlorida i sulfata

IV REZULTATI I ANALIZA REZULTATA ISTRAŽIVANJA

1. Razultati istraživanja

S obzirom da je dinamika istraživanja bila uslovljena različitim režimom rada tunela, prikaz rezultata i podataka dobijenih primenom različitih metodoloških postupaka biće dat kroz 3 osnovne faze (po istom principu kao i sprovedene metode istraživanja), podeljene na osnovu različitog režima rada hidrotehničkog tunela (tabela IV.1). Faza B je jedino bila fiksna faza kod svih mernih objekata i pojava jer je to bila faza remonta tunela, dok su faza A i C bile promenljive što je bila posledica samog perioda kada se krenulo sa istraživanjima (faza A) na objektima i pojavama, dok je faza C bila promenljivija jer je ona odražavala fazu stabilizacije nivoa u hidrogeološkoj sredini i morala se posmatrati različito u odnosu na same mikrolokacije područja, na šta su ukazivali dobijeni podaci.

Tabela IV.1: Prikaz različitih faza režima rada hidrotehničkog tunela

Faze	Režim rada tunela	Uslovi pod pritiskom i pražnjenjem	Početak - kraj osmatračkog perioda
A	Radni režim/ tunel pod pritiskom/u funkciji	Tunel i hidrogeološka sredina pod pritiskom	28/8/2016 – 19/9/2016
B	Tunel van funkcije	Pražnjenje tunela i hidrogeološke sredine	19/9/2016 – 24/10/2016
C	Tunel opet u funkciji/ ponovni radni režim	Punjenje tunela i hidrogeološke sredine do stabilizacije/uspostavljanje radnog pritiska	24/10/2016 – 10/11/2016 (13/12/2016)

Međutim, važno je naglasiti da rezultati određenih primenjenih metoda istraživanja nisu mogli biti prikazani kroz ove 3 faze jer su određeni rezultati bili vezani samo za period kada je tunel bio van funkcije i kada su sprovedene istraživanja u samom tunelu (obuhvatila su samo fazu B). Rezultati vršenih merenja i dobijeni podaci biće prikazani kroz 3 veće celine, podeljene na osnovu primene različitih metodoloških postupaka:

1. Rezultati meteoroloških i hidroloških istraživanja
2. Rezultati hidrogeoloških istraživanja
 - 2.1. Rezultati dobijenih kvantitativnih karakteristika podzemnih voda
 - 2.2. Rezultati dobijenih kvalitativnih karakteristika podzemnih voda (hidrohemijska istraživanja)
3. Rezultati ispitivanja stepena agresivnosti podzemnih voda na stanje betonske obloge tunela

1.1. Rezultati meteoroloških i hidroloških istraživanja

1.1.1. Rezultati meteoroloških istraživanja

S obzirom da su istraživanja sprovedena tokom 2016. godine i to u toku tromesečnog perioda (od početka septembra do kraja novembra meseca) prikazani su rezultati meteoroloških karakteristika terena samo za razmatrani period, na osnovu podataka koji su preuzeti iz meteoroloških godišnjaka RHMZa, sa meteorološke stanice Dimitrovgrad.

Mesečne vrednosti temperatura vazduha i mesečne sume padavina za 2016. godinu kao i za višegodišnji period od 1990-2016 (Tsr/Psr) date su tabelarno (tabele IV.2 i IV.3) u cilju njihove

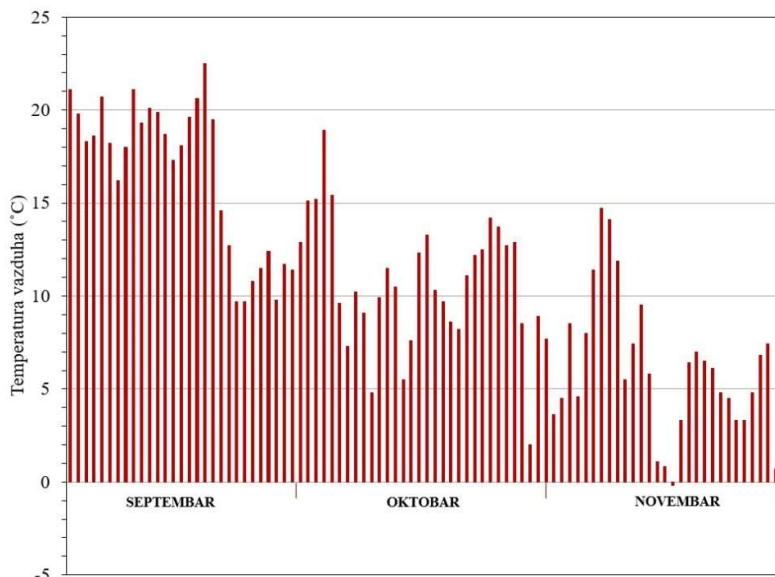
komparacije (slika IV.3, IV.5), dok su rezultati višegodišnjeg perioda prikazani u Poglavlju II, 1.2.1.1. Pored mesečnih vrednosti, razmatrane su i dnevne temperature vazduha i dnevne sume padavina za osmatrački period od septembra do novembra meseca 2016. godine (slika IV.4 i IV.6).

Tabela IV.2: Srednje mesečne temperature vazduha za period 2016. i 1990-2016. godine

God	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec	God
2016	-1.7	7.4	6.5	13.2	13.8	20.3	21.3	19.8	15.8	10.3	5.5	-1.6	10.9
Tsr	-0.5	1.2	5.3	10.3	15.0	18.6	20.6	20.4	15.5	10.7	5.9	0.7	10.3
σ	1.8	2.9	1.9	1.6	1.4	1.1	1.1	1.4	1.6	1.4	2.2	2.0	0.7
Cv	-3.8	2.3	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	2.7	0.1
Cs	0.1	0.1	-0.4	-1.2	-0.4	0.7	1.4	-0.5	1.0	-0.3	-0.2	-1.3	-0.2



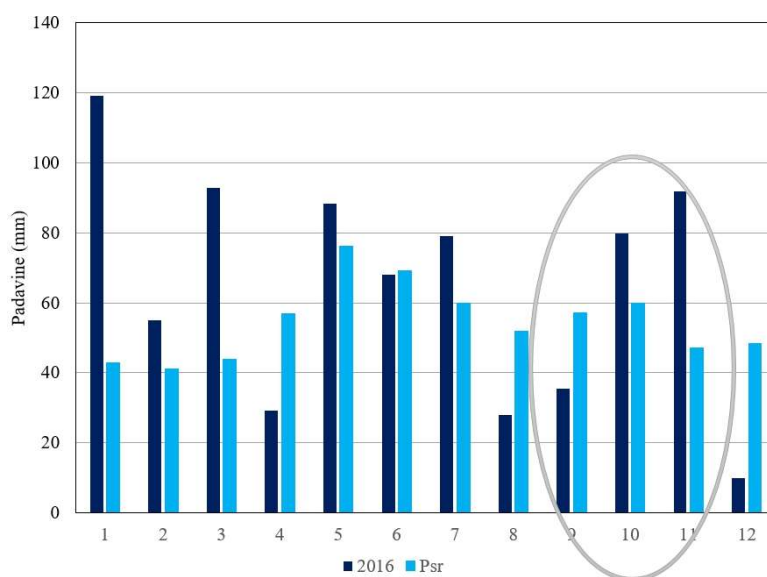
Slika IV.3. Uporedni dijagram unutar godišnje raspodele temperatura vazduha tokom 2016. godine i višegodišnjeg perioda (1990-2016) – met. st. Dimitrovgrad. Krug označava osmatrački period.



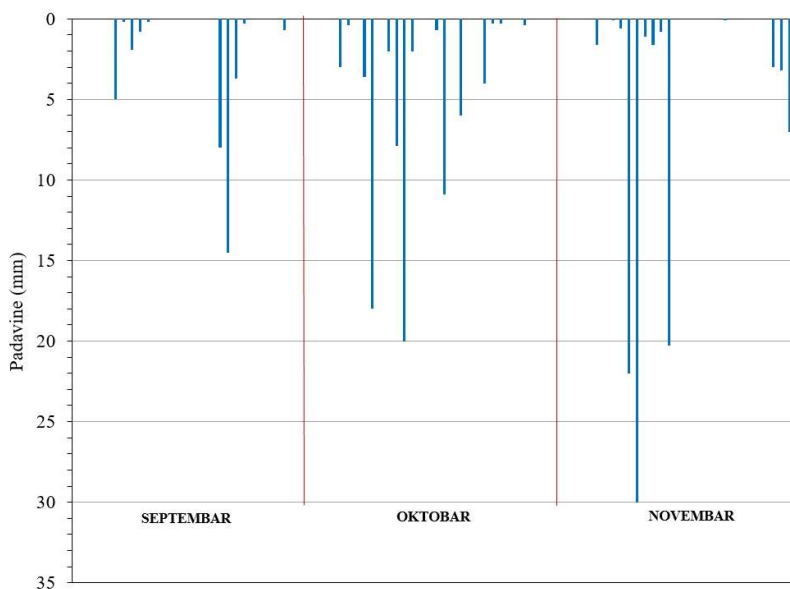
Slika IV.4. Dnevne temperature vazduha za period septembar-novembar 2016. godine

Tabela IV.3: Mesečne i godišnje sume padavina za period 2016. i 1990-2016.

God	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec	God
2016	119	55.1	92.8	29.2	88.3	67.9	79.1	28	35.5	79.7	91.7	9.8	776.1
Psr	42.9	41.0	43.9	56.9	76.2	69.1	59.9	51.9	57.1	59.8	47.0	48.4	654.1
σ	29.2	21.0	24.5	29.7	35.3	40.7	36.5	43.6	42.4	37.9	31.4	29.3	152.5
Cv	0.7	0.5	0.6	0.5	0.5	0.6	0.6	0.8	0.7	0.6	0.7	0.6	0.2
Cs	1.2	0.3	0.5	0.8	0.6	0.6	0.5	1.2	1.2	0.2	1.3	0.7	-0.4



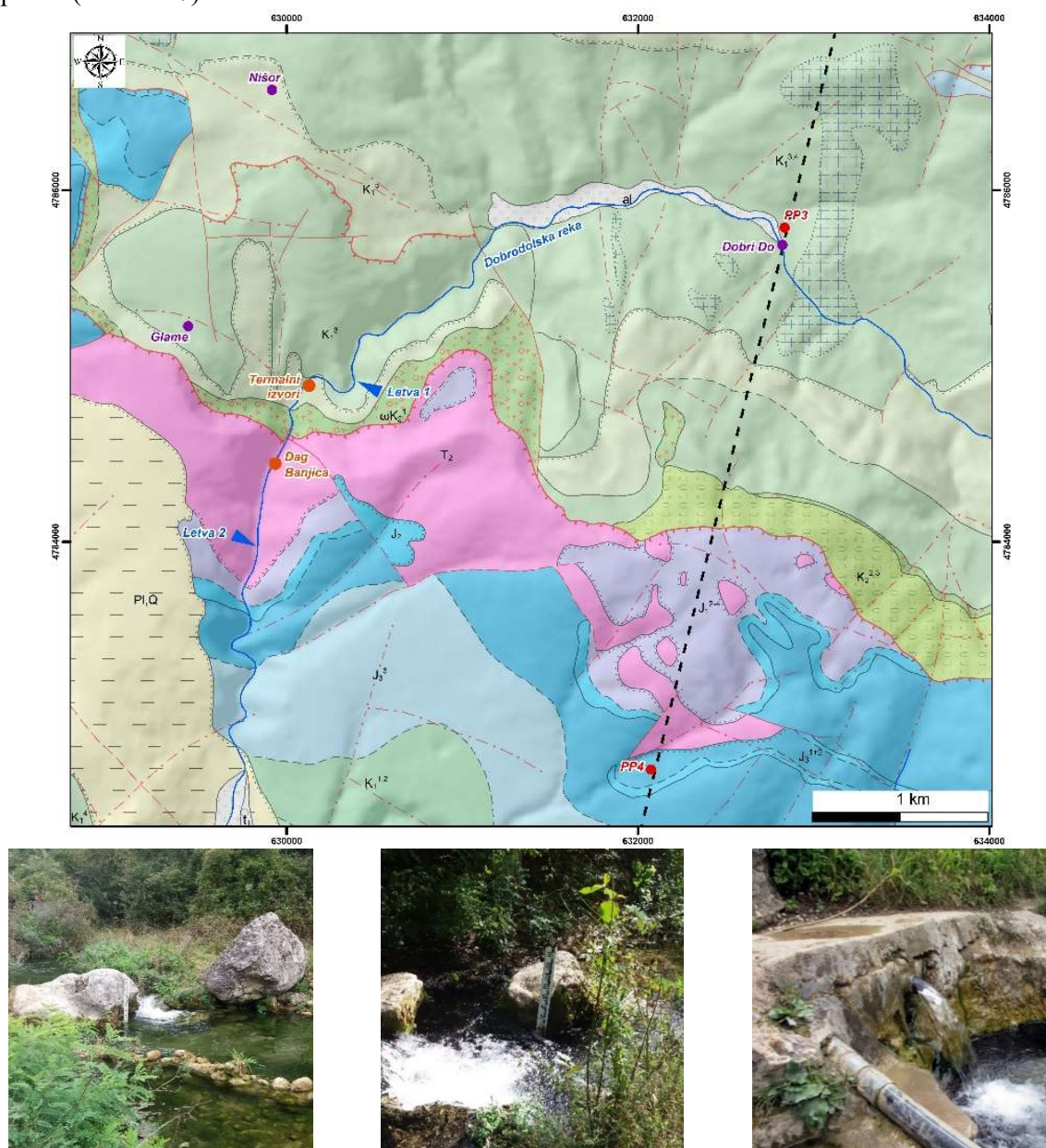
Slika IV.5. Uporedni dijagram unutargodišnje raspodele suma padavina tokom 2016. godine i višegodišnjeg perioda (1990-2016) – met. St. Dimitrovgrad. Krug označava osmatrački period.



Slika IV.6. Dnevne sume padavina za period septembar-novembar 2016. godine

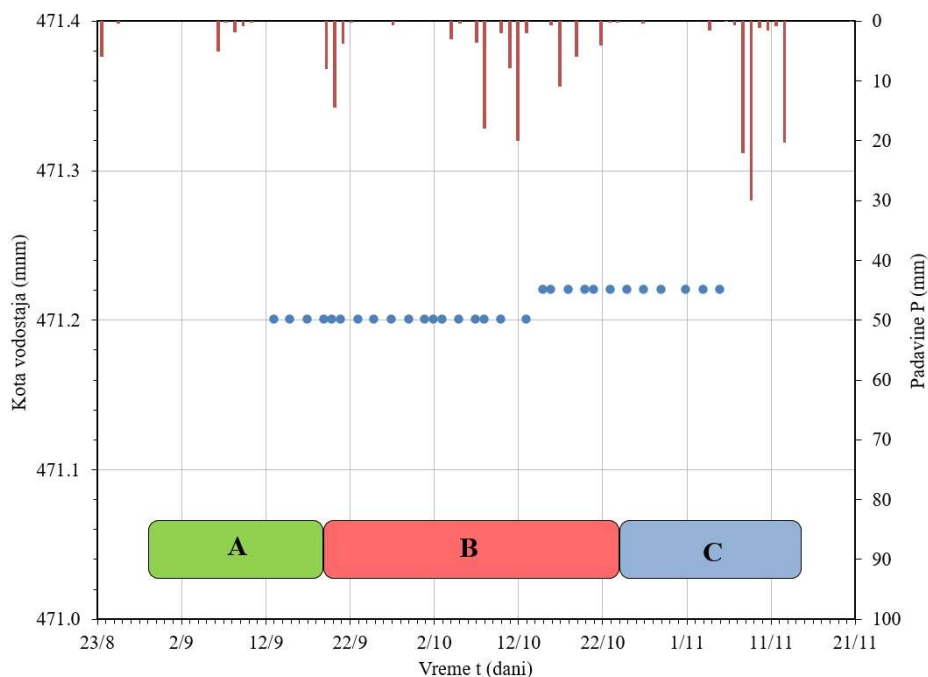
1.1.2. Rezultati hidroloških istraživanja

Sprovedena hidrološka istraživanja na istražnom području, obuhvatila su istraživanja na Dobrodolskoj reci, vodotoku koji jednim svojim tokom prelazi preko zone isticanja razbijenog termalnog izvorišta Dag Banjica. Isticanje termalnih voda detektovano je u samom koritu reke ali u njenom neposrednom slivnom području. U cilju određivanja potencijalnog uticaja različitog režima rada tunela na proticaj Dobrodolske reke kao i izvora koji ističu direktno u reku ali i njenom slivnom području, vršena su sukcesivna hidrometrijska merenja. Hidrometrijska merenja su vršena na 2 vodomerna prifila, uzvodnom (letva 1, na koti terena 471 m.n.v) na delu terena gde počinje zona isticanja termalnih izvora i nizvodnom (letva 2, na koti terena 432 m.n.v.) gde prestaje isticanje termalnih voda. U okviru ove zone, lociran je i najveći termalni izvor – Dag Banjica koji je primitivno kaptiran (slika IV.7).



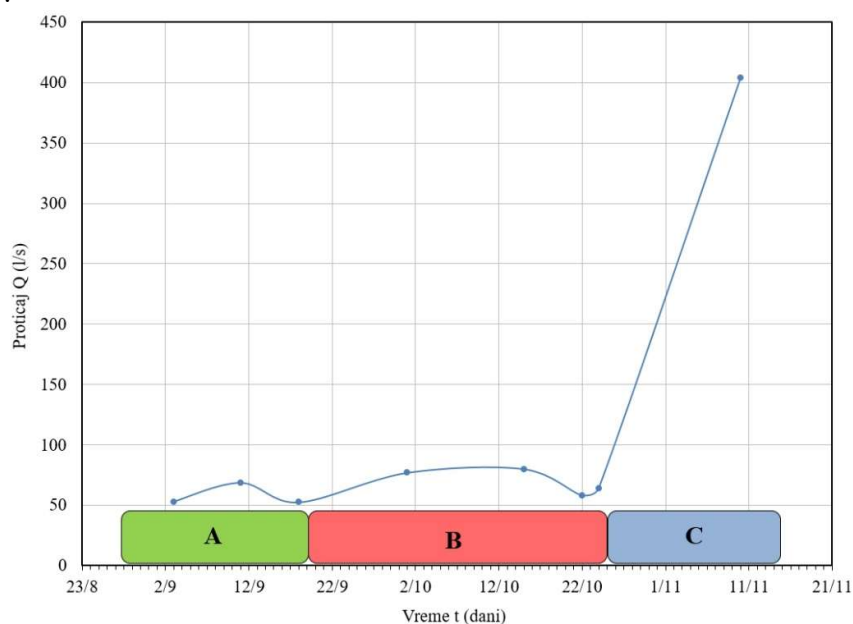
Slika IV.7. Dobrodolska reka sa prikazom položaja vodomernih profila i geološke građe terena (levo) i fotografije letve 1 i 2 kao i zone isticanja/primitivne kaptaže termalnog izvora Dag Banjice

Nivogram Dobrodolske reke na profilu 1 kao i dnevne sume padavina za period osmatranja prikazan je na slici IV.8.



Slika IV.8. Nivogram Dobrodolske reka na vodomernom profilu 1

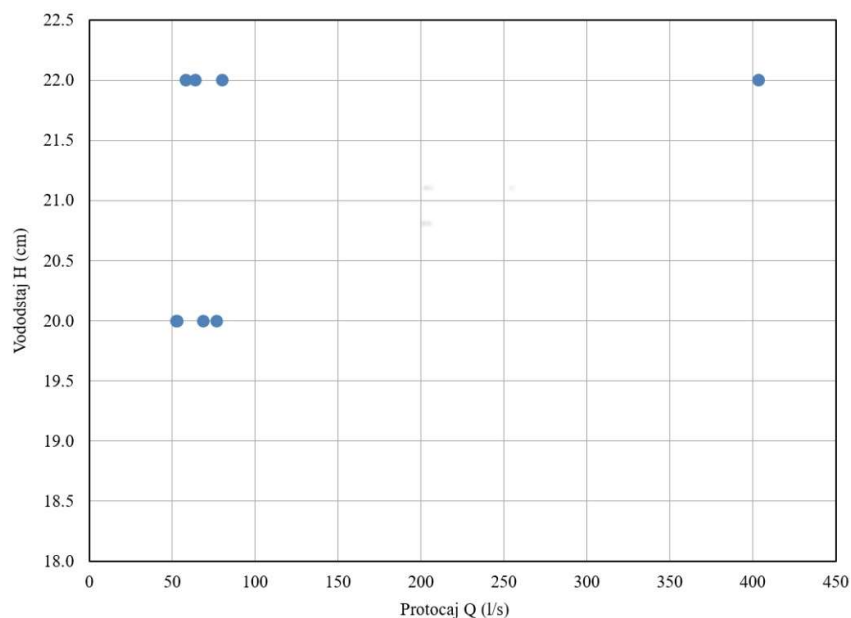
Hidrogram Dobrodolske reke na profilu 1, određen na osnovu izmerenih vrednosti proticaja prikazan je na slici IV.9.



Slika IV.9. Hidrogram Dobrodolske reka na mernom profilu 1

Formiranje krive proticaja nije bilo moguće prikazati u uobičajnom obliku, iz razloga relativno malog broja podataka prikupljenih u kratkom vremenskom periodu ali verovatno i nestabilnog režima Dobrodolske reke.

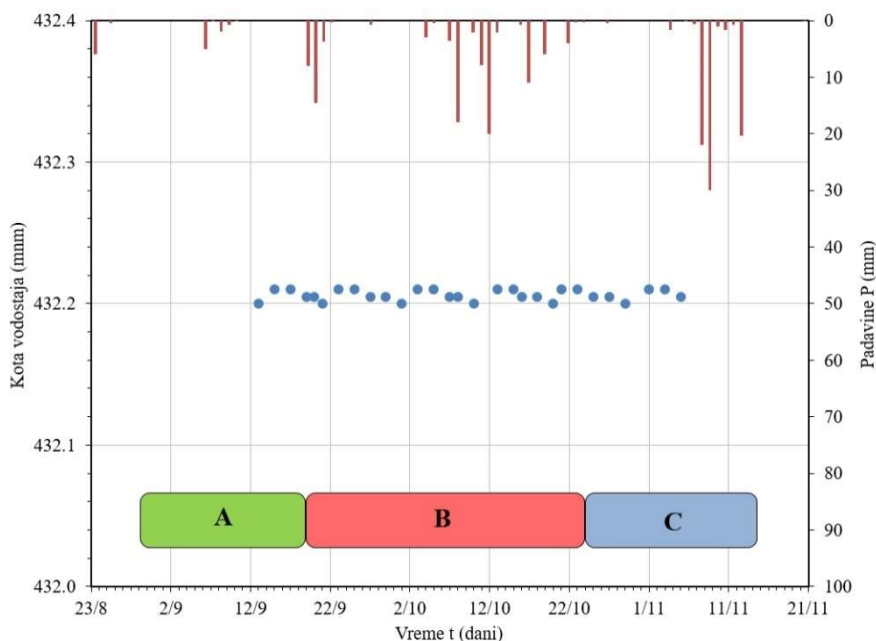
Iz tog razloga, prikazana je samo zavisnost proticaja i vodostaja (slika IV.10).



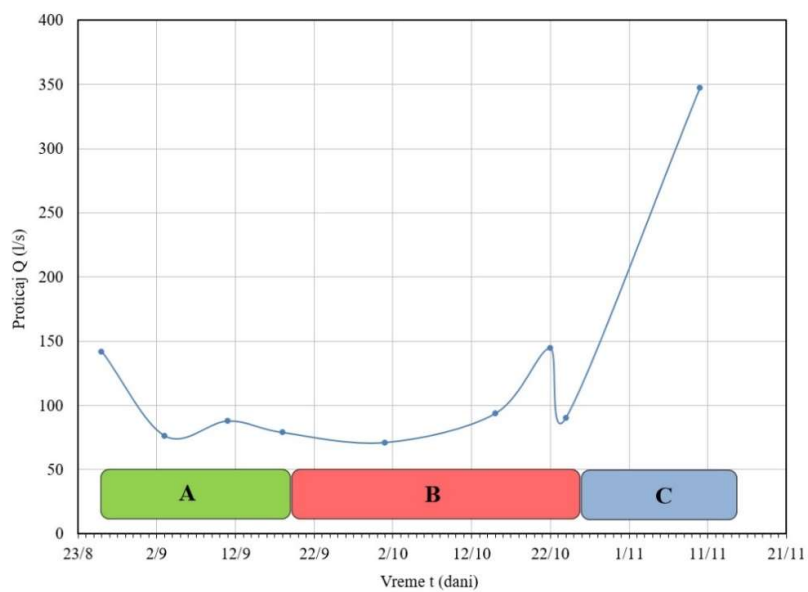
Slika IV.10. Zavisnost vodostaja i proticaja Dobrodolske reka na mernom profilu 1

Nizvodni profil (profil 2) (slika IV.7) obuhvatio je celu zonu isticanja termalnih voda od vodomernog profila 1/letva 1 do profila 2/letva 2. Ovim profilom obuhvaćeno je i isticanje, odnosno proticaj termalnog izvora Dag Banjica, najvećeg na istražnom području, kao i svi termalni izvori koji gravitiraju ka reci ili direktno ističu u samom njenom koritu.

Nivogram Dobrodolske reke na profilu 2, sa prikazom dnevne sume padavina za period osmatranja dat je na slici IV.11, dok su vrednosti izmerenih proticaja na ovom mernom profilu prikazane na hidrogramu (slika IV.12).

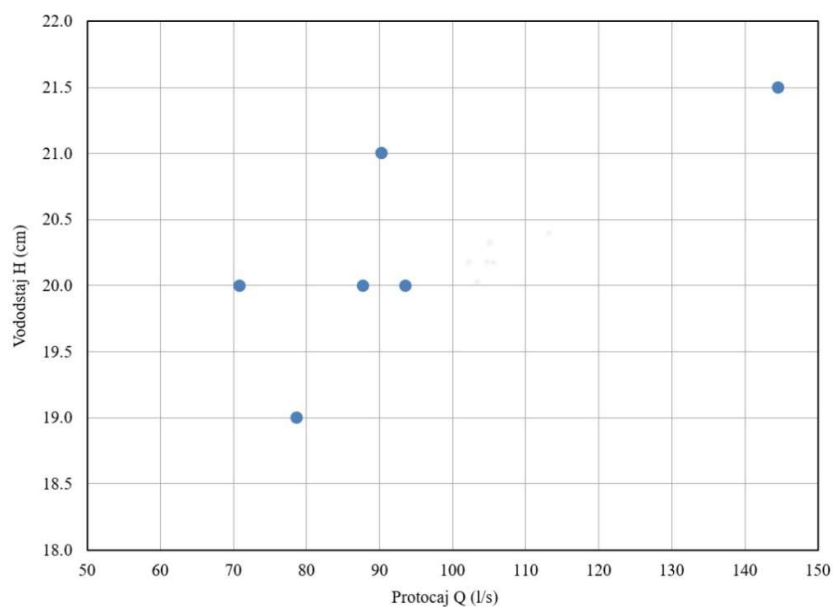


Slika IV.11. Nivogram Dobrodolske reka na mernom profilu 2



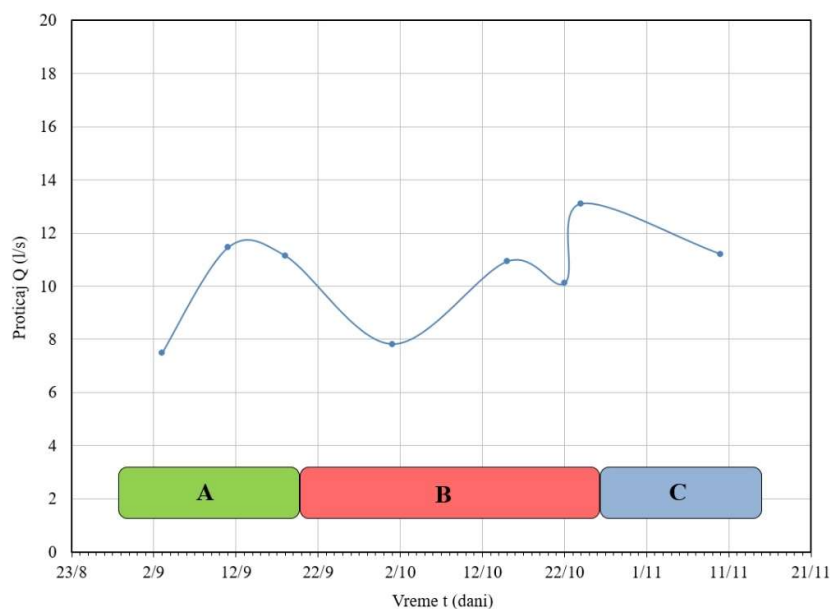
Slika IV.12. Hidrogram Dobrodolske reka na mernom profilu 2

Zavisnost proticaja i vodostaja na ovom mernom profilu prikazan je na slici IV.13.



Slika IV.13. Zavisnost proticaja i vodostaja Dobrodolske reka na mernom profilu 2

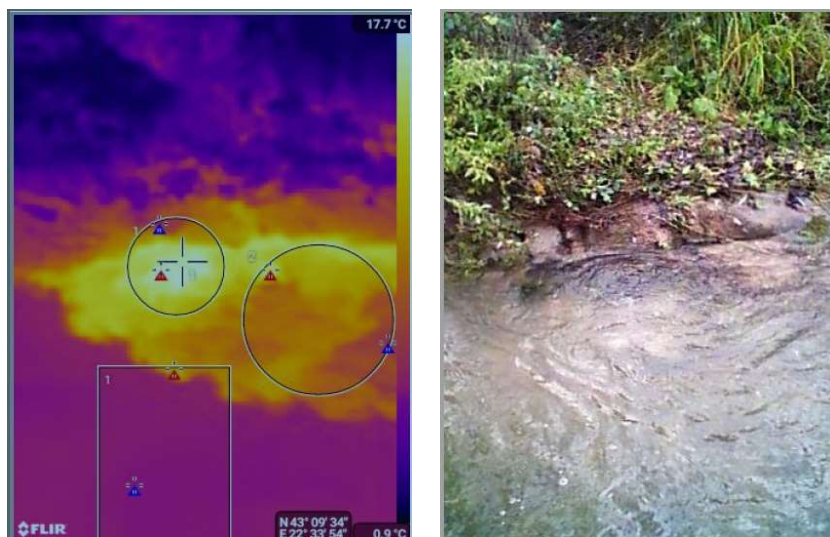
S obzirom da je razbijeno termalno izvoriste Dag Banjice locirano između ova dva analizirana merna profila, primitivno kaptirani termalni izvor najvećeg kapaciteta, izmerene vrednosti izdašnosti ovog izvora prikazane su na slici IV.14.



Slika IV.14. Izdašnost termalnog izvora Dag Banjice

Na pojedinim deonicama Dobrodolske reke vršena su sukcesivna termometrijska merenja u cilju utvrđivanja anomalija u protoku, odnosno utvrđivanja uslova isticanja podzemnih voda ili poniranja dela voda iz vodotoka, posebno u deonicama toka koje protiču preko karbonatnih/krečnjačkih stena, u zoni razbijenog termalnog izvorišta.

Primenom termovizijske kamere detektovana su isticanja termalnih izvora duž cele zone Vidličke navlake, na potezu od letve 1 do letve 2 postavljenih na Dobrodolskoj reci (slika IV.15).



Slika IV.15. Detektovanje direktnog isticanja termalnih voda u Dobrodolsku reku

Pored ove najkarakterističnije pojave isticanja koja je detektovana u koritu reke, osmotrena su i sva manja isticanja po obodnim delovima terena, gde su utvrđena procurivanja termalnih podzemnih voda (slika IV.16).



Slika IV.16. Prikaz termovizijskih merenja na potezu od letve 1 do letve 2 (termalna isticanja po obodnoj zoni doline Dobrodolske reke)

1.2. Rezultati hidrogeoloških istraživanja

Sprovedena istraživanja tokom 2016. godine vršena su za potrebe izrade doktorske disertacije, odnosno definisanja uticaja veštačkog objekta na hidrogeološku sredinu ali i za potrebe izrade studije [40]. Rezultati hidrogeoloških istraživanja, ujedno i najobimnijih istraživanja koja su sprovedena za potrebe rešavanja postavljenog naučnog problema, prikazani su kroz dve osnovne celine:

- Rezultate dobijenih kvantitativnih karakteristika podzemnih voda [40]
- Rezultate dobijenih kvalitativnih karakteristika podzemnih voda (rezultate hidrohemijskih istraživanja) [40]

1.2.1. Rezultati dobijenih kvantitativnih karakteristika podzemnih voda

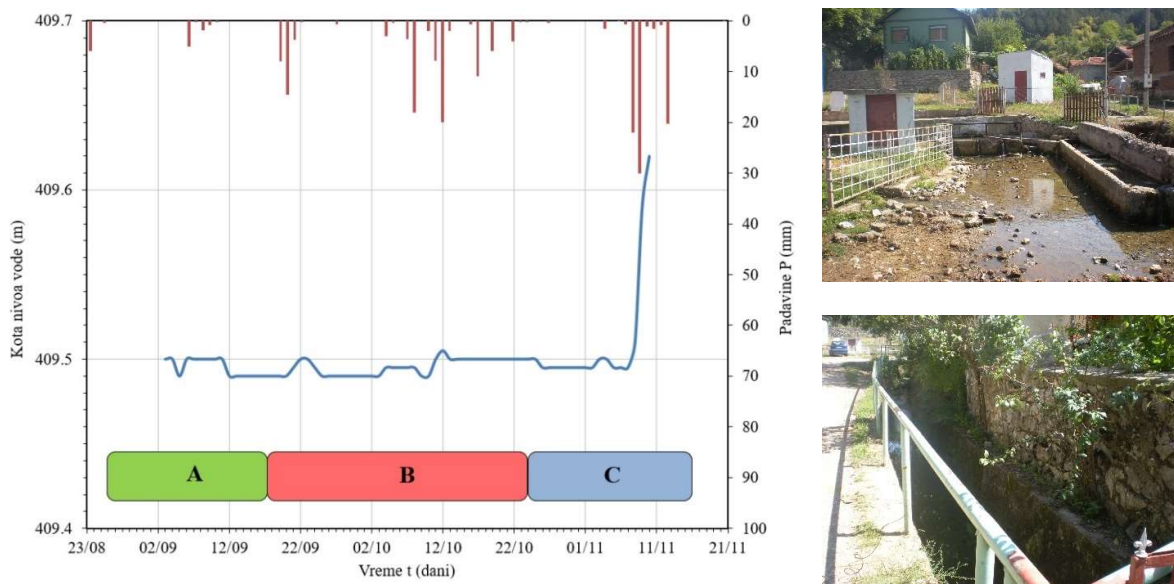
Dobijeni rezultati sprovedenih istraživanja kvantitativne analize podzemnih voda na istražnom području prikazani su kroz rezultate koji su dobijeni u toku različitog režima rada hidrotehničkog tunela (tabela IV.1), na:

- izvorima (sve faze A,B i C),
- pijezometrima (sve faze A,B i C),
- kota gornje vode akumulacionog jezera (sve faze A,B i C),
- tunelu (samo faza B/tunel van funkcije):
 - šahti tunelske zatvaračnice (merenje sumarnih gubitaka)
 - kanalu izlazne građevine
 - u tunelu / merenje količine dotoka voda u ispražnjen tunel

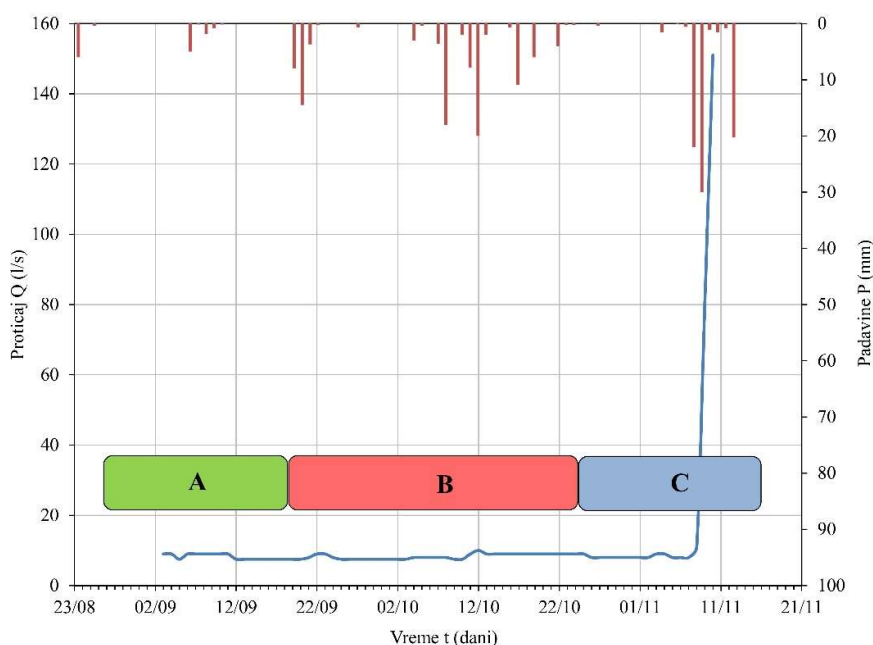
1.2.1.1. Rezultati kvantitativnih karakteristika podzemnih voda na izvorima

1. Izvor Izvor

Jedino na ovom izvoru izdašnost je merena hidrometrijskom metodom, gde su prikupljeni podaci o vodostaju, a hidrometrijskim merenjima dobijene su vrednosti proticaja. Rezultati osmatranja vodostaja na izvoru Izvor prikazan je na nivogramu (slika IV.17) gde je ujedno dat i prikaz izmerenih dnevnih suma padavina u toku osmatračkog perioda. Vrednosti proticaja koje su izmerene na ovom karstnom izvoru prikazani su hidrogramom na slici IV.18.



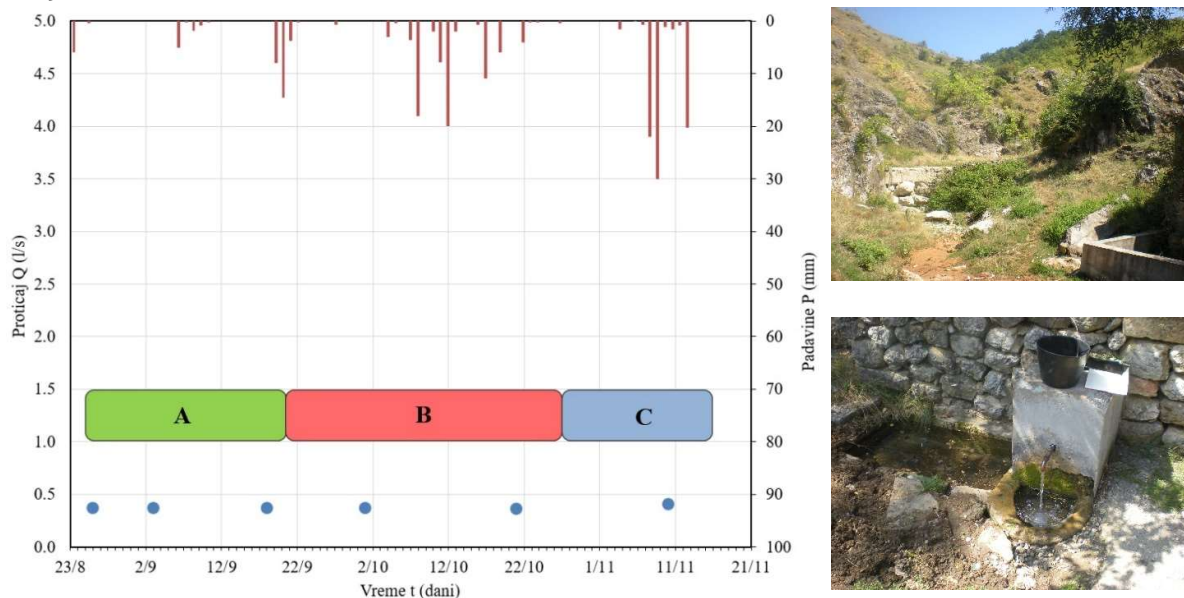
Slika IV.17. Nivogram izvora Izvor u zavisnosti od padavina kroz različite režime rada tunela: A, B i C (levo) i fotografije zone isticanja izvora Izvor/kaptaže i kanala na kome su vršena merenja (desno)



Slika IV.18. Hidrogram izvora Izvor u zavisnosti od padavina kroz različite režime rada tunela: A, B i C [104]

2. Izvor Berilovac

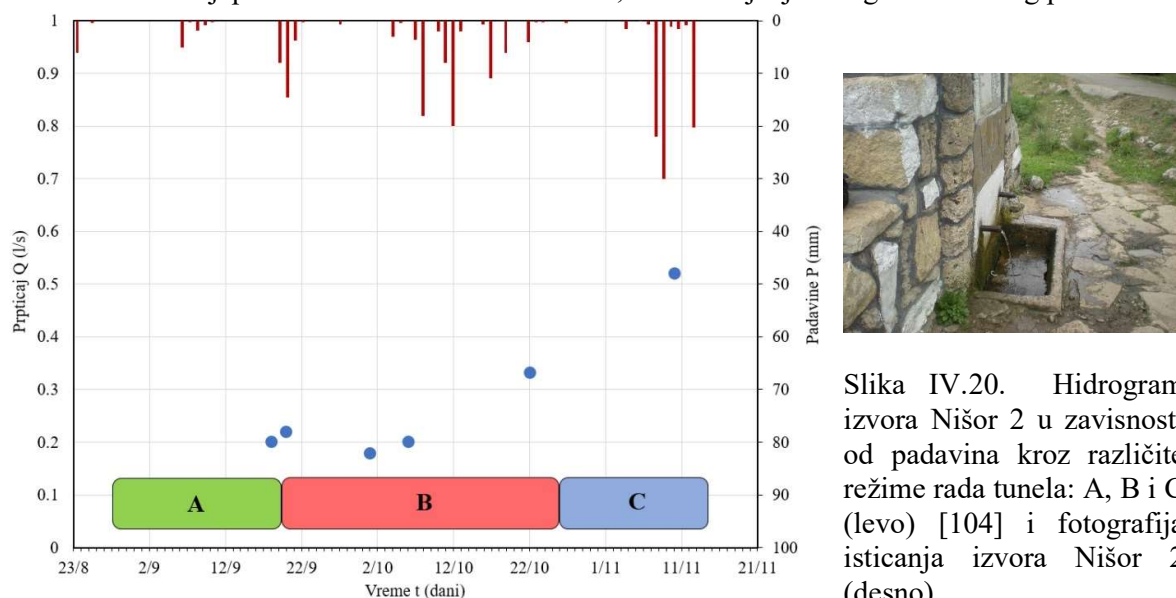
Iz tehničkih razloga (zatvorene kaptaze sa koje se voda distribuira na 16 česama u selu) merenje izdašnosti ovog vrela nije bilo moguće u delu njegovog direktnog pojavljivanja, pa je kao reprezentativna tačka osmatranja određena jedna česma. Rezultati izmerene izdašnosti izvora Berilovac dati su u vidu hidrograma, sa uporednim vrednostima dnevnih suma padavina na slici IV.19.



Slika IV.19. Hidrogram izvora Berilovac u zavisnosti od padavina kroz različite režime rada tunela: A, B i C (levo) [104] i fotografije zone isticanja izvora Berilovac iznad kaptaze i česma na kojoj su vršena merenja (desno)

3. Izvori Nišor 1 i 2

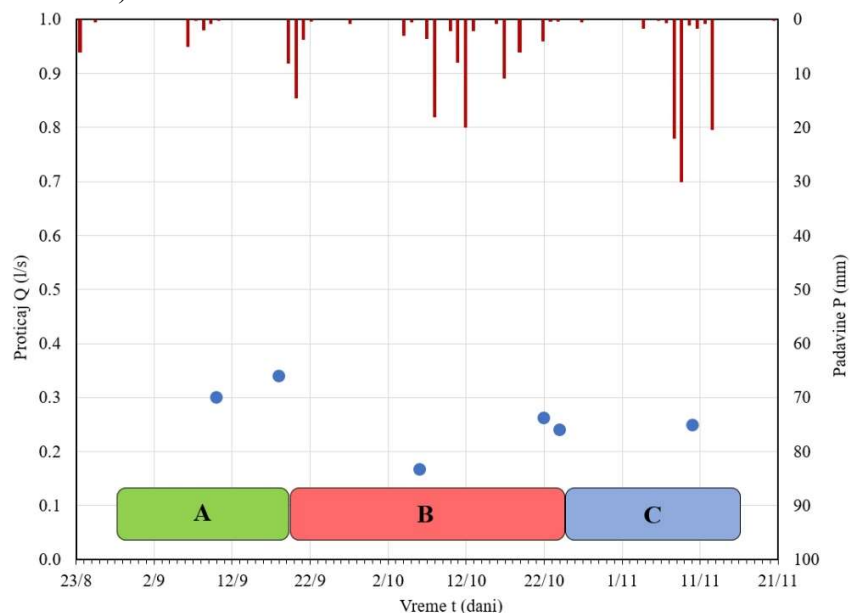
Merenja izdašnosti izvora Nišor 1 i 2 vršena su zapreminskom metodom, a rezultati izmerene izdašnosti izvora Nišor 2 prikazani su na hidrogramu, sa uporednim vrednostima dnevnih suma padavina na slici IV.20. Rezultati izdašnosti izvora Nišor 1 nisu prikazani zbog malih količina koje su izmerene u dijapazonu od 0.006 l/s do 0.007 l/s, tokom trajanja celog osmatračkog perioda.



Slika IV.20. Hidrogram izvora Nišor 2 u zavisnosti od padavina kroz različite režime rada tunela: A, B i C (levo) [104] i fotografija isticanja izvora Nišor 2 (desno)

4. Dobri Do

Merenja izdašnosti vrela Dobri Do nije bilo moguće iz istih razloga kao i kod vrela Berilovac (zatvoreni tip kaptaže), pa su kvantitativne karakteristike ovog izvora osmatrane na odabranoj reprezentativnoj česmi u istoimenom selu. Rezultati izdašnosti izvora Dobri Do, prikazani su na hidrogramu (slika IV.21).



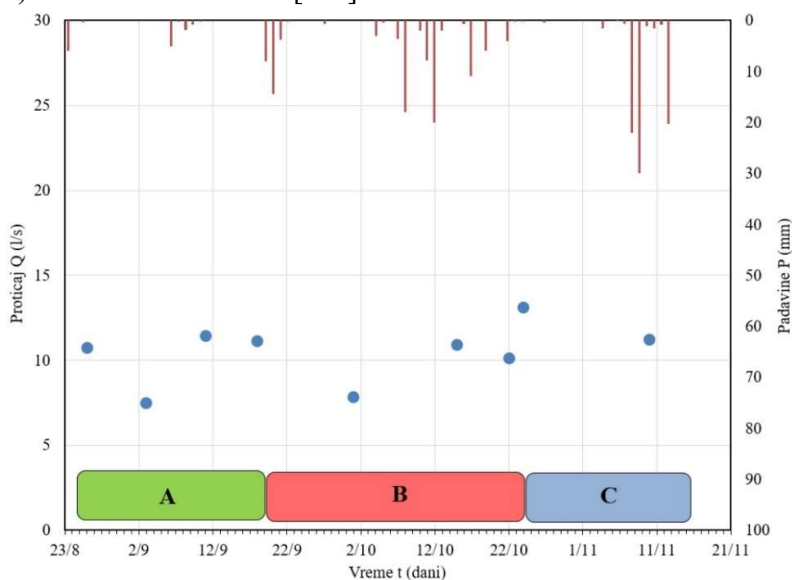
Slika IV.21. Hidrogram izvora Dobri Do u zavisnosti od padavina kroz različite režime rada tunela: A, B i C [104]

5. Izvor Glame

Izmerene vrednosti isticanja iz ovog izvora su tokom celog osmatračkog perioda iznosile $Q=0.01$ l/s.

6. Termalni izvor Dag Banjica

Rezultati izmerenih izdašnosti na termalnom izvoru Dag Banjica (glavnoj pojavi, odnosno primitivno kaptiranom izvoru) dati su na slici IV.22 [104].



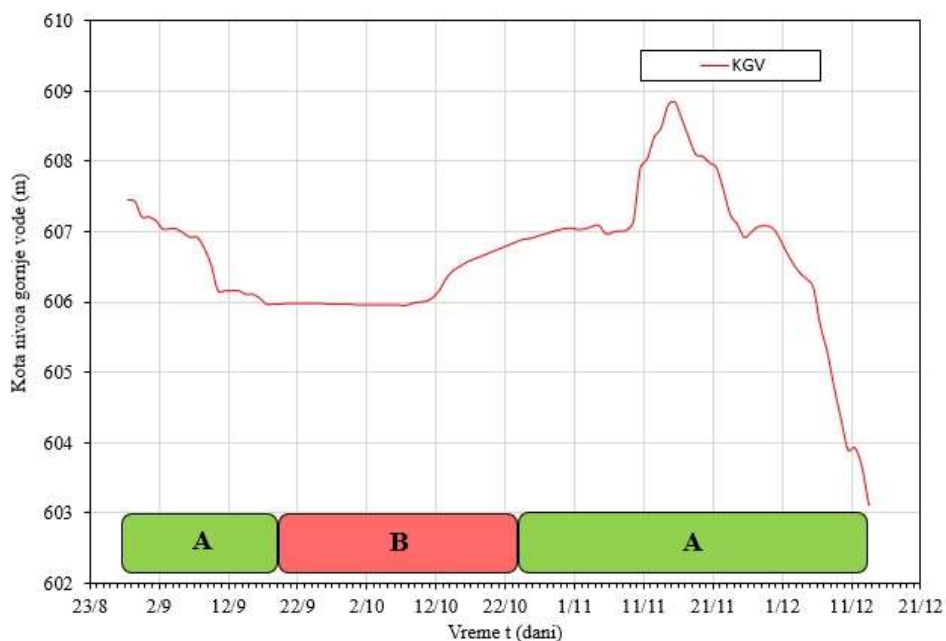
Slika IV.22. Hidrogram izvora Dag Banjica u zavisnosti od padavina kroz različite režime rada tunela: A, B i C [104]

1.2.1.2. Rezultati kota gornje vode akumulacionog jezera i kvantitativnih karakteristika podzemnih voda u pijezometrima

Rezultati kvantitativnih karakteristika podzemnih voda u sva tri pijezometra (PP-1, PP-3 i PP-4) pokazali su da nije bilo moguće istovetno izdvajanje faza različitog režima rada tunela (faze A, B i C) kao u slučaju izvora. Konkretno, faza C je u samim pijezometrima morala biti drugačije podeljena, jer je zbog detaljnosti podataka bilo jasno vidljivo da se hidrogeološka sredina usled punjenja tunela punila drugačijom dinamikom u delovima terena gde su izvedeni pijezometri. Posledica različitog trajanja faze C (punjenje tunela i hidrogeološke sredine) u PP-1 i PP-3 jeste činjenica da su pijezometri potpuno drugačije tehnički izvedeni, sa različitim dubinama i u okviru različitih litoloških jedinica terena. Međutim, rezultati kote gornje vode akumulacionog jezera prikazane su bez faze C, već samo u periodima kada je tunel bio u funkciji i van funkcije.

1. Kote gornje vode akumulacionog jezera

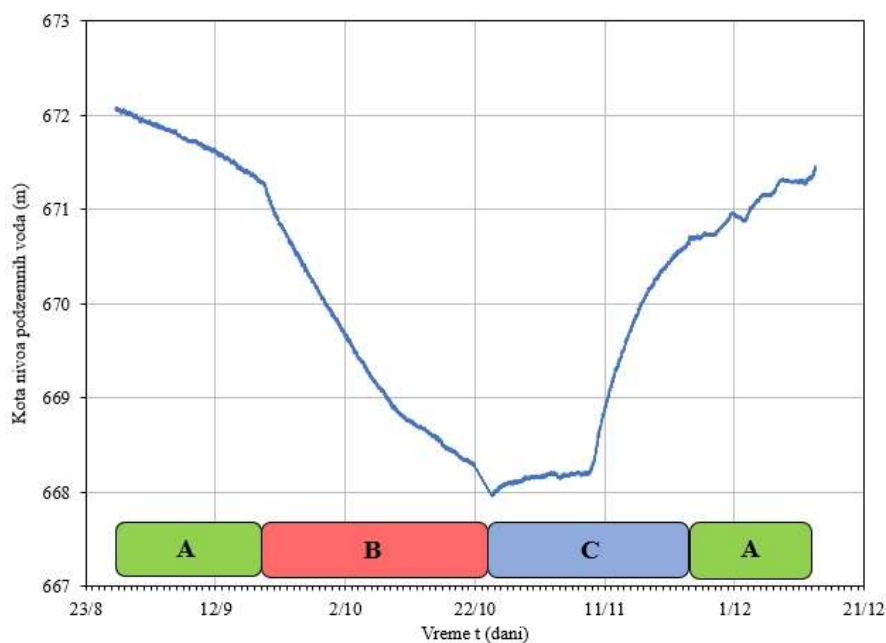
Oscilacije nivoa akumulacionog jezera u toku osmatračkog tromesečnog perioda prikazane su na slici IV.23. [40]



Slika IV.23. Oscilacije kota nivoa gornje vode akumulacionog jezera u toku celog osmatračkog perioda [17], [40]

2. Pijezometar PP-1

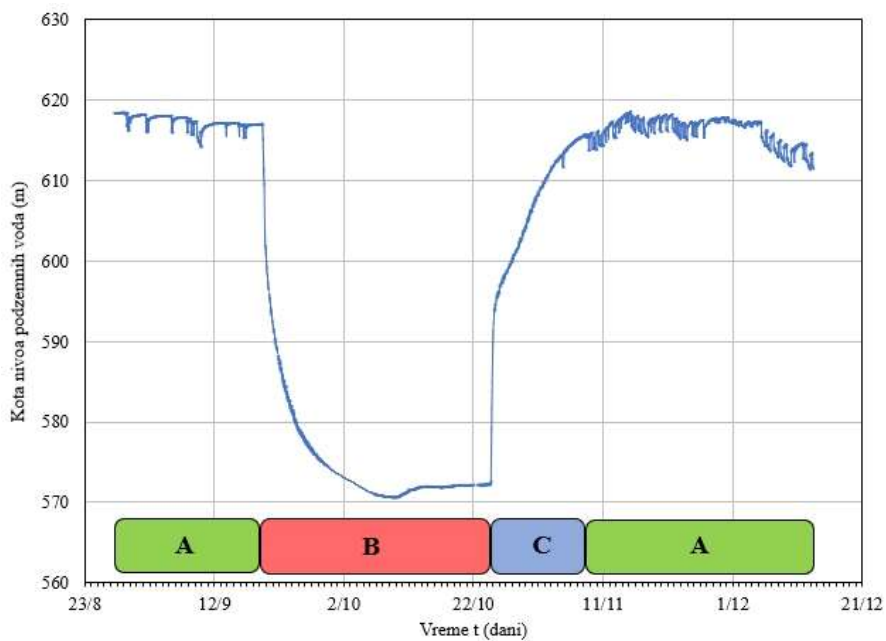
Oscilacije nivoa podzemnih voda u pijezometru PP-1, koji je lokacijski i najbliži akumulaciji (odgovara stacionaži tunela 1+400 m) smešten je na koti terena 770 mm, prikazane su na slici IV.24. Taložnik pijezometra se nalazi na koti 554 mm, dok je kota dna tunela na 559 mm.



Slika IV.24. Oscilacije nivoa podzemnih voda u piježometru PP-1 (interval osmatranja na 2 minuta) kroz različite režime rada tunela: A, B i C [17], [40]

3. Piježometar PP-3

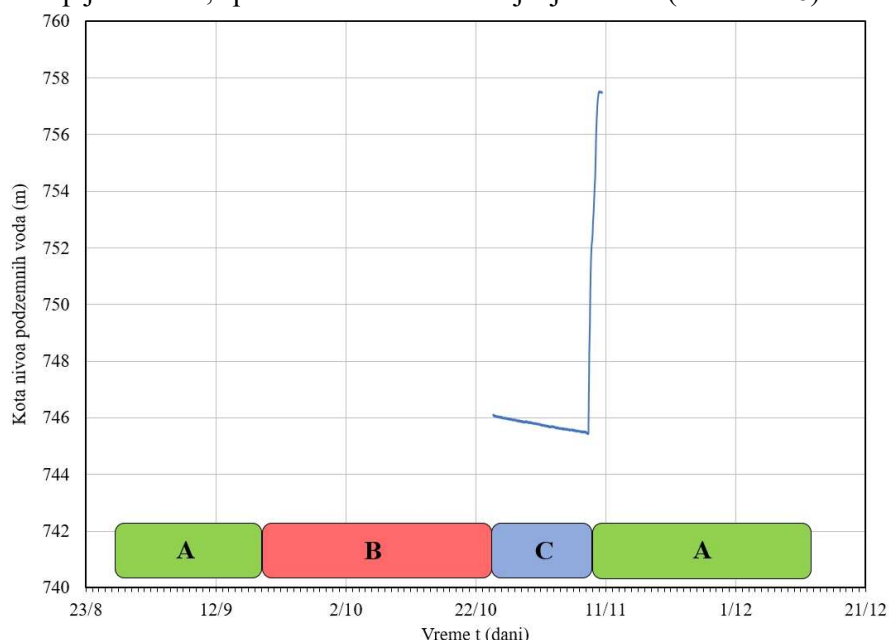
Piježometar PP-3 izveden je u izuzetno karstifikovanim krečnjacima (K_1^3 i K_1^{3+4} starosti), pozicioniran u Dobrodolskoj sinklinali, sa najmanjim nadslojem iznad tunela od samo 70 metara. Ovaj piježometar je lociran na stacionaži tunela 4+200 m i koti terena 630 mm.



Slika IV.25. Oscilacije nivoa podzemnih voda u piježometru PP-3 (interval osmatranja na 2 minuta) kroz različite režime rada tunela: A, B i C [17], [40]

4. Pijezometar PP-4

Pijezometar PP-4 se nalazi na koti terena 770 mm i stacionaži tunela 7+380 m. Ukupna dubina pijezometra je na 231 m, što odgovara koti od 539 mm, dok se dno tunela nalazi na koti 544 mm. Rezultate dobijene osmatranjima nivoa podzemnih voda u ovom pijezometru treba uzeti sa velikom rezervom, jer se ovaj pijezometar može označiti i kao nefunkcionalan. Već pri prvim osmatranjima u ovom pijezometru je detektovan visok nivo podzemne vode (samoizliv) iako je isti na koti terena 770 metara i najveće dubine u odnosu na pijezometre PP-1 i PP-3. Nakon izbacivanja nekoliko desetina zapremina uzorkivačem došlo je do sniženja nivoa ali ne i prihodnosti pijezometra, što je onemogućilo postavljanje dajvera. Iz tog razloga u početnom periodu nije bilo osmatranja na ovom pijezometru. Tek nakon završetka faze B, uspešno je postavljen dajver i jedina osmatranja koja su izvršena na ovom pijezometru, sprovedena su tokom trajanja faze C (slika IV.26).



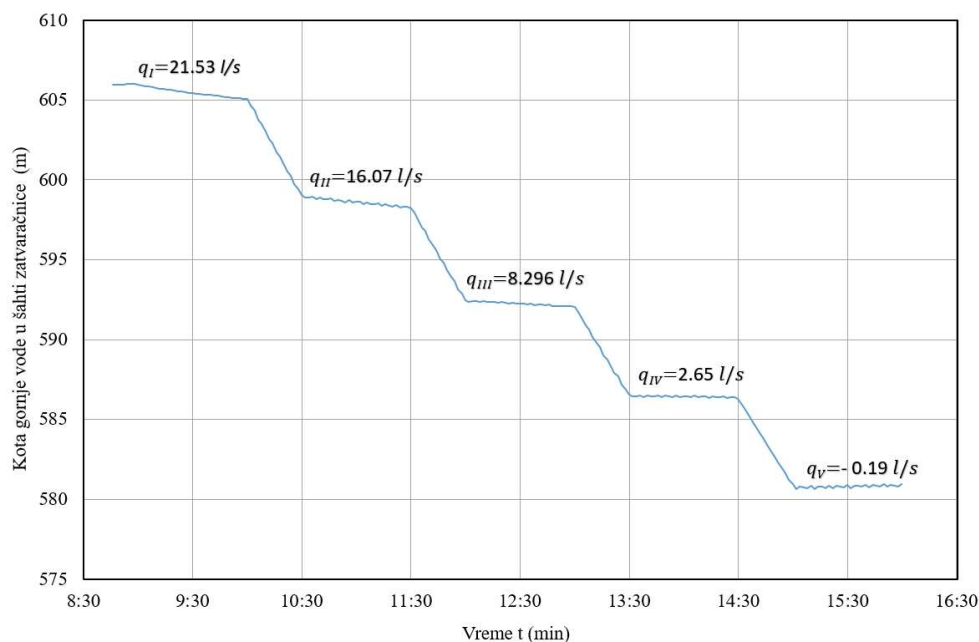
Slika IV.26. Oscilacije nivoa podzemnih voda u pijezometru PP-4 (interval osmatranja na 2 minuta) kroz različite režime rada tunela: A, B i C

1.2.1.3. Rezultati merenja sumarnih gubitaka u šahti tunelske zatvaračnice

Faza B je počela 19/9/2016 zatvaranjem tunela na glavnom zatvaraču ulazne građevine, kada su počela osmatranja promene nivoa vode u šahti tunelske zatvaračnice usled različitog vremenskog perioda držanja nivoa i ispuštanjem na turbinama hidroelektrane, za potrebe određivanja sumarnih gubitaka u tunelu. Merenjima promene nivoa vode u šahti zatvaračnice dobijene su sledeće vrednosti sumarnih gubitaka u tunelu (tabela IV.4), dok je njihov grafički prikaz dat na slici IV.27.

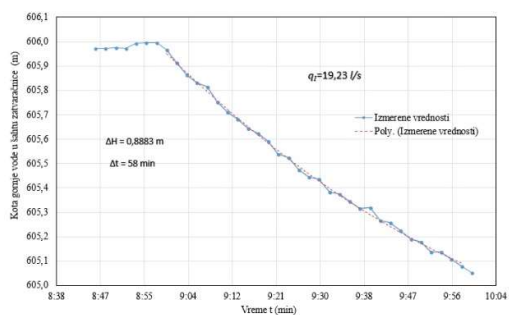
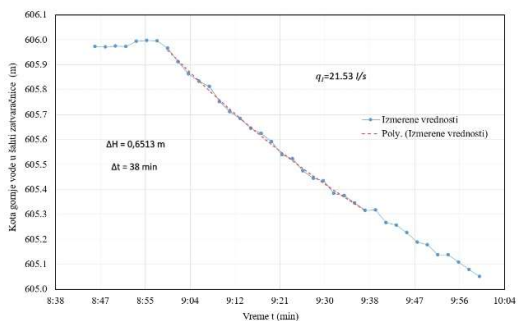
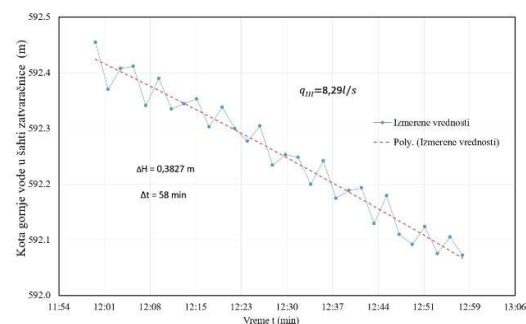
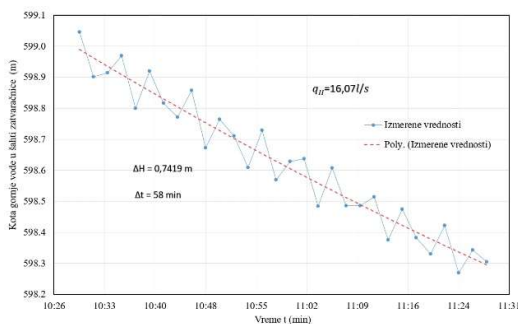
Tabela IV.4: Vrednosti sumarnih gubitaka q (l/s)

Stepenice merenja	Vrednost sumarnih gubitaka q (l/s)	Kota vode u šahti (mm)
I	21.53	605.97
II	16.07	599.05
III	8.29	592.45
IV	2.65	586.53
V	-0.19 (dotok)	580.94

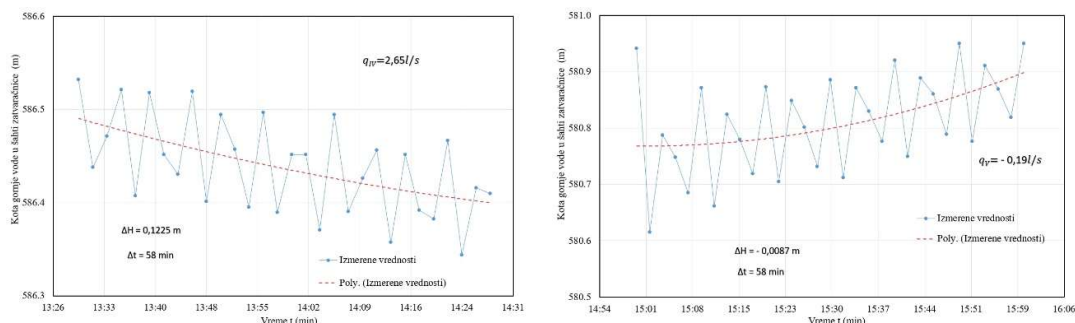


Slika IV.27. Sumarni gubici u tunelu po stepenicama držanja nivoa [17]

Rezultati izmerenih promena nivoa vode u šahti tunelske zatvaračnice pojedinačno, na svakoj stepenici držanja nivoa prikazani su na slikama IV.28, IV.29 i IV.30.

Slika IV.28. I stepenica merenja sumarnih gubitaka u tunelu za $t = 38 \text{ min}$ i $t = 58 \text{ min}$ 

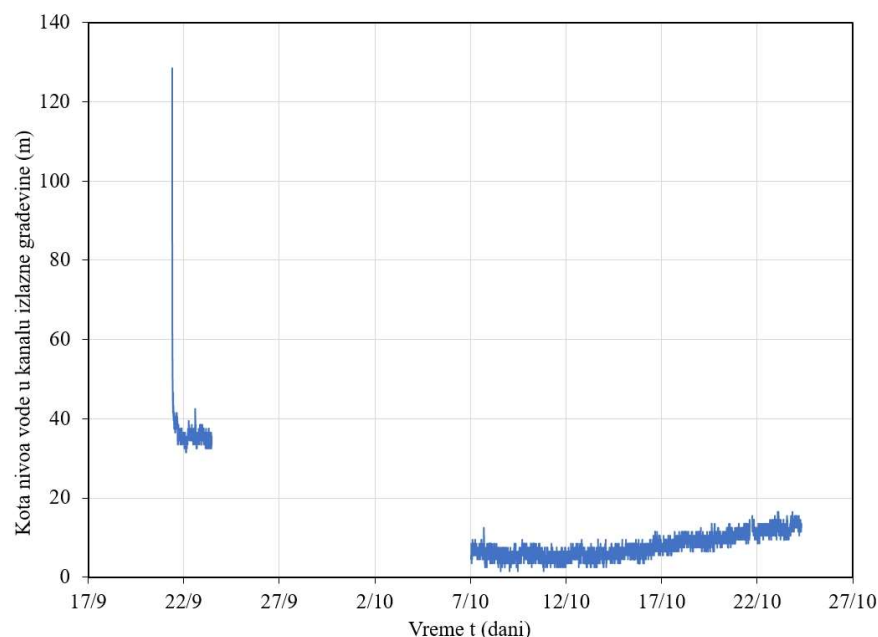
Slika IV.29. II i III stepenica merenja sumarnih gubitaka u tunelu



Slika IV.30. IV i V stepenica merenja sumarnih gubitaka u tunelu

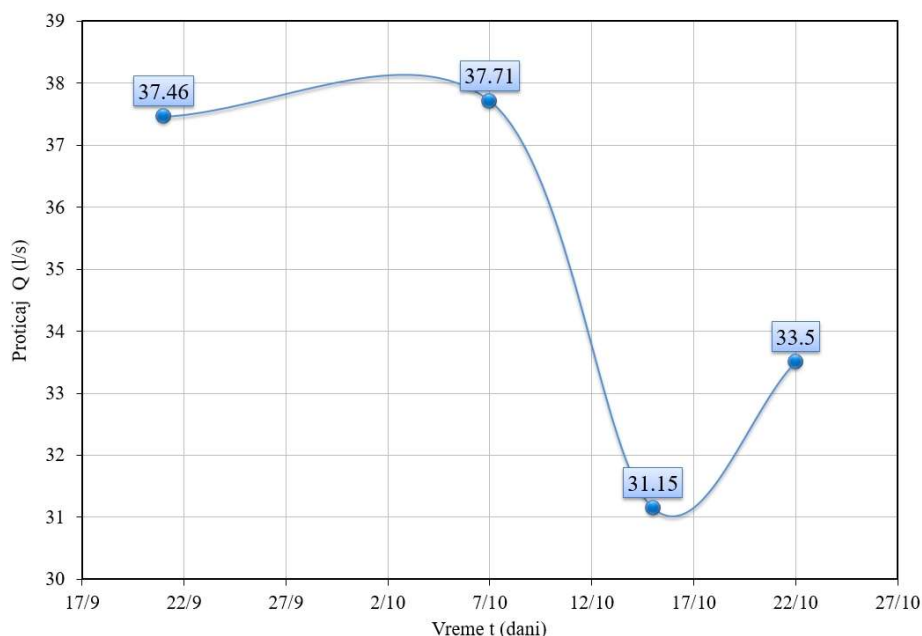
1.2.1.4. Rezultati merenja nivoa i proticaja vode na kanalu izlazne građevine tunela

Praćenje promene stanja nivoa voda koje se ispuštaju preko kanala izlazne građevine započeto je 21/9/2016., odnosno 2 dana nakon zatvaranja zatvarača i prestanka funkcionisanja hidrotehničkog tunela. U periodu pražnjenja tunela došlo je do tehničkih problema kada je tok vode iz tunela preusmeren je na drugi kanal gde nije bilo moguće izvršiti osmatranje nivoa vode. Iz tog razloga osmatrački period na ovom mernom mestu obuhvatio je dva perioda, odnosno sami početak isticanja koji je trajao dva dana (od 21/9/2016 do 23/9/2016) i period kada je tok vode vraćen na kanal izlazne građevine (od 7/10/2016 do 24/10/2016) (slika IV.31) [40].



Slika IV.31. Nivogram na kanalu izlazne građevine (intervan osmatranja 2 minuta) [40]

Na kanalu izlazne građevine, pored osmatranja promene nivoa vode vršena su i merenja proticaja. Rezultati osmotrenih vrednosti proticaja na kanalu izlazne građevine prikazan su na slici IV.32.



Slika IV.32. Vrednosti proticaja Q /hidrogram/ na kanalu izlazne građevine

1.2.1.5. Rezultati merenja veličine dotoka u ispražnjen tunel

Merenje dotoka voda u tunel bilo je moguće izvršiti u periodu remonta tunela, kada je isti bio van funkcije. Hidrometrijska merenja su vršena u tunelu na četiri merna profila i to u tri vremenske serije (tabela IV.5) kako bi se definisale iste zone/sekcije između određenih stacionaža i vrednosti doticaja u tim zonama. Uspostavljanje mernih/hidrometrijskih profila na određenim stacionažama u velikoj meri je bilo uslovljeno/ograničeno tehničkim uslovima koji vladaju u tunelu. U delu tunela koji je rađen tjubingom, usled ukopavanja mašine tokom iskopa došlo je do produbljivanja dna tunela što je u periodu kada je tunel van funkcije prouzrokovalo formiranje 5 jezera koji otežavaju proces hidrometrijskih merenja i postupka merenja dotoka. Iz tog zazloga u segmentu tunela od 3+120 m do 7+060 m nije bilo moguće uspostaviti vodomerni profil. Ukupno je formirano 5 jezera i to na stacionažama:

1. 3+650-3+750 m
2. 4+100-4+150 m
3. 5+780-5+930 m
4. 6+050-6+200 m
5. 6+850-7+000 m

Tabela IV.5: Rezultati merenja dotoka u tunel na stacionažama

Datum	Stacionaža / merni profil u tunelu – proticaj vode u tunelu (l/s)			
	0+030 m	3+160 m	7+060 m	8+530 m
21/9/2016	5.9 l/s	16.4 l/s	31.5 l/s	47.3 l/s
6/10/2016	5.7 l/s	22.9 l/s	27.9 l/s	49.3 l/s
21/10/2016	6.1 l/s	11.8 l/s	18.0 l/s	44.6 l/s

1.2.2. Rezultati dobijenih kvalitativnih karakteristika podzemnih voda (hidrohemijske karakteristike podzemnih voda)

Rezultati sprovedenih hidrohemijskih istraživanja na istražnom području, prikazani su po istom principu kao i rezultati kvantitativnih karakteristika, kroz faze različitog režima rada hidrotehničkog tunela, na:

- izvorima (sve faze A,B i C),
- piježometrima (sve faze A,B i C),
- tunelu (samo faza B/tunel van funkcije):
 - šahti tunnelske zatvaračnice (osmatranje kvalitativnih karakteristika voda tokom postupka merenja sumarnih gubitaka)
 - kanalu izlazne građevine
 - u tunelu/merenje kvalitativnih karakteristika podzemnih voda koje procureuju u tunel kroz betonsku oblogu

1.2.2.1 Rezultati kvalitativnih (hidrohemijskih) karakteristika podzemnih voda na izvorima

Izmerene vrednosti fizičko-hemijskih parametara podzemnih voda na svim izvorima sa prikazom izraženih promena koje su označene crvenom bojom prikazani su tabelarno. Rezultati dobijeni merenjima u uzorku multiparametarskom sondom u boci označeni su žutom bojom, jer takva merenja pokazuju manja odstupanja u vrednostima od merenja koja se vrše sondom direktno u zoni isticanja voda. Kod izvora Nišor 1 i 2, Glame i Dobri Do nije uzet uzorak u periodu punjenja tunela (faza C) pa iz tog razloga na ova 4 izvora nedostaju podaci o kvalitativnim karakteristikama podzemnih voda koji pripadaju fazi ponovnog punjenja tunela.

1. Izvor Izvor

Izmerene vrednosti fizičko-hemijskih parametara podzemnih voda na izvoru Izvor sa prikazom izraženih promena koje su označene crvenom bojom prikazani su u tabeli IV.6, dok je hemijski sastav uzorkovanih voda na ovom izvoru prikazan u tabeli IV.7.

Tabela IV.6: Fizičko-hemijski parametri podzemnih voda na izvoru Izvor (izražene promene označene crvenom bojom, podaci mereni u uzorku multiparametarskom sondom u boci označeni žutom bojom)

Faza režima rada tunela	Seriya uzorkovanja	pH	T (°C)	EC (μS/cm)	ORP (mV)
A	1	7.1	11.4	477	355
		7.0	11.5	480	289
B		7.2	11.5	468	210
		7.3	11.6	511	205
	2	7.2	11.5	502	249
		7.6	11.4	479	303
	3	7.5	11.4	494	159
C	4	7.0		512	271
A	5				

Tabela IV.7: Hemijski sastav podzemnih voda na izvoru Izvor (izražene promene označene crvenom bojom)

	HCO ₃	Cl	SO ₄	Na+K	Ca	Mg	CO ₂	TDS	Tip vode
	mg/L								
A	393	12.1	17	10.5	123	6.4	15.8	362	Ca-HCO ₃
B	390	10.6	16	17.3	120	3.4	14.9	360	Ca-HCO ₃
	394	12.1	21	10.7	122	8.5	14.1	368	Ca-HCO ₃
C	385	9.9	16	9.9	116	8.5	16.7	350	Ca-HCO ₃
A	397	7.1	12	20.7	114	4.3	14.1	353	Ca-HCO ₃

2. Izvor Berilovac

Rezultati fizičko-hemijskih parametara podzemnih voda sa izvora Berilovac prikazani su u tabeli IV.8, dok su rezultati hemijskog sastava uzorkovanih voda na ovom izvoru prikazani u tabeli IV.9.

Tabela IV.8: Fizičko-hemijski parametri podzemnih voda na izvoru Berilovac (izražene promene označene crvenom bojom, podaci mereni u uzorku multiparametarskom sondom u boci označeni žutom bojom)

Faza režima rada tunela	Seriya uzorkovanja	pH	T (°C)	EC (µS/cm)	ORP (mV)
A	1	7.3	14.0	388	300
		7.4	13.3	389	237
B		7.4	23.3	312	209
		7.7	13.0	417	271
	2	7.4	12.8	409	248
		7.8	12.6	420	287
	3	6.7	12.4	421	240
	4	7.4		512	271
C					
A	5				

Tabela IV.9: Hemijski sastav podzemnih voda na izvoru Berilovac, izražene promene označene crvenom bojom)

	HCO ₃	Cl	SO ₄	Na+K	Ca	Mg	CO ₂	TDS	Tip vode
	mg/L								
A	311	10.6	19	8.6	94.8	8.4	26.4	294	Ca-HCO ₃
B	317	10.6	21	5.5	102	7.3	18.5	303	Ca-HCO ₃
	342	12.1	23	9.6	104	9.9	15.8	326	Ca-HCO₃
C	348	10.6	15	14.1	61.1	32	18.5	304	Ca-Mg-HCO₃
A	311	5.7	18	14.6	74.2	16	22.9	281	Ca-HCO₃

3. Izvor Nišor 1/2

Izmereni fizičko-hemijski parametri podzemnih voda na izvorima Nišor 1 i 2 prikazani su u tabeli IV.10 i IV.11, dok su rezultati hemijskih analiza uzorkovanih voda ova dva izvora prikazani u tabeli IV.12. i IV.13.

Tabela IV.10: Fizičko-hemijski parametri podzemnih voda na izvoru Nišor 1 (izražene promene označene crvenom bojom)

Faza režima rada tunela	Seriya uzorkovanja	pH	T (°C)	EC (μS/cm)	ORP (mV)
A	1	7.7	15.6	582	214
B		7.2	13.8	464	269
	2	7.6	16.4	509	237
		7.7	12.0	511	217
	3	7.9	11.9	537	229
A	4				

Tabela IV.11: Fizičko-hemijski parametri podzemnih voda na izvoru Nišor 2 (izražene promene označene crvenom bojom)

Faza režima rada tunela	Seriya uzorkovanja	pH	T (°C)	EC (μS/cm)	ORP (mV)
A	1	7.3	12.6	401	248
B		7.3	12.5	358	210
	2	7.7	12.4	438	234
		7.4	12.9	427	225
	3	7.6	11.6	435	244
A	4				

Tabela IV.12: Hemijski sastav podzemnih voda na izvoru Nišor 1, izražene promene označene crvenom bojom)

	HCO ₃	Cl	SO ₄	Na+K	Ca	Mg	CO ₂	TDS	Tip vode
	mg/L								
A	421	14.2	13	7.8	122	12.3	16.7	371	Ca-HCO ₃
B	427	25	26	3.0	125	18.2	9.7	395	Ca-HCO ₃
	415	16.3	14	13.6	124	6.3	36.9	369	Ca-HCO ₃
A	451	7.8	21	10.5	139	7.9	16.7	407	Ca-HCO ₃

Tabela IV.13: Hemijski sastav podzemnih voda na izvoru Nišor 2, izražene promene označene crvenom bojom)

	HCO ₃	Cl	SO ₄	Na+K	Ca	Mg	CO ₂	TDS	Tip vode
	mg/L								
A	323	159	16	0.77	102	11	20.2	303	Ca-HCO ₃
B	348	171	13	11.7	101	12.6	9.7	334	Ca-HCO ₃
	305	150	23	11.3	102	4.6	17.6	307	Ca-HCO ₃
A	348	171	11	6.6	92	15.7	16.7	304	Ca-HCO ₃

4.Izvor Dobri Do

Rezultati fizičko-hemijskih parametara podzemnih voda sa izvora Dobri Do prikazani su u tabeli IV.14, dok su rezultati anjonskog i katjonskog sastava uzorkovanih voda na ovom izvoru prikazani u tabeli IV.15.

Tabela IV.14: Fizičko-hemijski parametri podzemnih voda na izvoru Dobri Do (izražene promene označene crvenom bojom)

Faza režima rada tunela	Seriya uzorkovanja	pH	T (°C)	EC (µS/cm)	ORP (mV)
A	1	7.4	17.6	364	314
	2	7.4	17.0	365	242
B	3	7.4	14.3	373	162
	4	7.6	12.4	378	191
A	5				

Tabela IV.15: Hemijski sastav podzemnih voda na izvoru Dobri Do, izražene promene označene crvenom bojom)

	HCO ₃	Cl	SO ₄	Na+K	Ca	Mg	CO ₂	TDS	Tip vode
	mg/L								
A	293	10.7	16	6.5	90.2	7.9	17.6	275	Ca-HCO ₃
	307	9.9	15	1.7	82.4	17.6	15.8	278	Ca-HCO ₃
B	305	11.3	18	4.5	89.8	12.4	15.8	286	Ca-HCO ₃
	299	11.3	23	20	91.6	3.2	15.8	296	Ca-HCO ₃
A	311	7.1	15	9.5	91.9	7.4	12.3	284	Ca-HCO ₃

5. Izvor Glame

Fizičko-hemijski parametri izmereni na terenu na izvoru Glame dati su tabelarno (tabela IV.16) kao i rezultati hemijskih analiza uzorkovanih voda (tabela IV.17)

Tabela IV.16: Fizičko-hemijski parametri podzemnih voda na izvoru Glame (izražene promene označene crvenom bojom)

Faza režima rada tunela	Seriya uzorkovanja	pH	T (°C)	EC (µS/cm)	ORP (mV)
A	1	7.0	17.8	831	202
	2	7.6	16.9	706	238
B	3	7.2	13.6	688	252
		7.4	12.4	680	258
A	4				

Tabela IV.17: Hemijski sastav podzemnih voda na izvoru Glame, izražene promene označene crvenom bojom)

	HCO ₃	Cl	SO ₄	Na+K	Ca	Mg	CO ₂	TDS	Tip vode
	mg/L								
A	427	38	34.7	11.5	142.5	14.1	12.3	451	Ca-HCO ₃ -SO ₄
B	439	31	24	5.1	142.3	15.3	20.2	434	Ca-HCO ₃ -SO ₄
	402	34	62	23	136.3	12.8	9.7	466	Ca-HCO ₃ -SO ₄
A	414	34	31	14.4	136.3	12.2	13.2	433	Ca-HCO ₃ -SO ₄

6. Dag Banjica

Fizičko-hemijski parametri izmereni na terenu (*in situ*) na termalnom izvoru Dag Banjica dati su tabelarno (tabela IV.18) dok su rezultati hemijskih analiza uzorkovanih voda prikazani u tabeli IV.19.

Tabela IV.18: Fizičko-hemijski parametri podzemnih voda na izvoru Dag Banjica (izražene promene označene crvenom bojom, podaci mereni u uzorku multiparametarskom sondom u boci označeni žutom bojom)

Faza režima rada tunela	Seriya uzorkovanja	pH	T (°C)	EC (µS/cm)	ORP (mV)
A	1	7.2	29.6	401	298
	2	7.3	29.7	344	221
B		7.6	29.5	414	257
		7.4	29.0	428	241
	3	7.2	29.7	414	248
		7.6	29.4	380	291
		7.3	29.5	395	221
C		7.4	29.7	289	178
	4	7.4		416	227

Tabela IV.19: Hemijski sastav podzemnih voda na izvoru Dag Banjica, izražene promene označene crvenom bojom)

	HCO ₃	Cl	SO ₄	Na+K	Ca	Mg	CO ₂	TDS	Tip vode
	mg/L								
A	323	9.2	17	4.9	70.1	26.8	15.8	287	Ca-Mg-HCO ₃
	323	22	11	7.6	76.2	24.6	21.1	300	Ca-Mg-HCO ₃
B	315	11.3	20	4.1	78.2	22.1	12.3	290	Ca-Mg-HCO ₃
C	317	7.9	14	4.4	70.9	23.8	14.9	276	Ca-Mg-HCO ₃

7. Dobrodolska reka

Osmatranje kvalitativnih karakteristika Dobrodolske reke vršeno je u delu toka koji protiče kroz zonu isticanja termalnih izvora Dag Banjice (Pirotske Banjice), na lokaciji između letve 1 i 2 (Slika IV.7)

Fizičko-hemijski parametri voda Dobrodolske reke koji su osmotreni *in situ* u ovoj zoni prikazani su u tabeli IV.20, dok su rezultati anjonskog i katjonskog sastava uzorkovanih voda dati u tabeli IV.21.

Tabela IV.20: Fizičko-hemijski parametri podzemnih voda na Dobrodolskoj reci (izražene promene označene crvenom bojom, podaci mereni u uzorku multiparametarskom sondom u boci označeni žutom bojom)

Faza režima rada tunela	Seriya uzorkovanja	pH	T (°C)	EC (µS/cm)	ORP (mV)
A	1	8.2	20.2	326	293
	2	8.1	21.5	321	250
B		8.2	19.6	335	258
		8.2	20.5	347	248
	3	8.1	18.8	354	245
		8.1	17.4	357	291
		7.7	18.0	351	223
C		8.1	19.4	296	157
	4	7.6		372	241

Tabela IV.21: Hemijski sastav površinskog toka Dobrodolske reke, izražene promene označene crvenom bojom)

	HCO ₃	Cl	SO ₄	Na+K	Ca	Mg	CO ₂	TDS	Tip vode
	mg/L								
A	267	9.2	15	6.9	58.1	21.3	15.8	242	Ca-Mg-HCO ₃
	275	8.5	10	8.7	60.1	19.1	11.4	241	Ca-Mg-HCO ₃
B	266	11.3	21	7.8	72.1	14.4	13.2	257	Ca-HCO₃
C	299	7.1	15	9.5	60.9	23.8	14.9	263	Ca-Mg-HCO ₃

1.2.2.2. Rezultati kvalitativnih (hidrohemijskih) karakteristika podzemnih voda u pijezometrima

Pijezometar PP-1

Izmerene promene fizičko-hemijskih parametara podzemnih voda uzorkovanih iz ovog pijezometra prikazane su tabelarno (tabela IV.22) dok je hemijski sastav podzemnih voda uzorkovanih u pijezometru PP-1 prikazan u tabeli IV.23.

Tabela IV.22: Fizičko-hemijski parametri podzemnih voda u pijezometru PP-1 (izražene promene označene crvenom bojom) [40]

Faza režima rada tunela	Seriya uzorkovanja	pH	T (°C)	EC (μS/cm)	ORP (mV)
A	1	8.24	12.35	261	-110
B	3	8.17	10.49	262	257
		7.91	11.05	268	133
C	4				

Tabela IV.23: Hemijski sastav podzemnih voda uzorkovanih u pijezometru PP-1 izražene promene označene crvenom bojom) [40]

	HCO ₃	Cl	SO ₄	Na	K	Ca	Mg	NO ₃	TDS	Tip vode
	mg/l									
A	190	12.4	16	7.7	1.4	58	4.2	12	303.9	Ca-HCO ₃
B	201	13.5	6.5	8.4	14.7	65.3	4.7	8.1	315.8	Ca-HCO ₃
C	224	48.5	2.5	5	2	72.5	6	1.4	333.1	Ca-HCO₃-Cl

Pijezometar PP-3

Rezultati fizičko-hemijskih parametara podzemnih voda uzorkovanih u pijezometru PP-3 prikazani su u tabeli IV.24.

Tabela IV.24: Fizičko-hemijski parametri podzemnih voda u pijezometru PP-3 (izražene promene označene crvenom bojom) [40]

Faza režima rada tunela	Seriya uzorkovanja	pH	T (°C)	EC (μS/cm)	ORP (mV)
A	1	9.85	12.34	625	173.3
		9.41	10.45	671	166.0
B		9.36	10.31	576	223.6
	2	8.5	10.31	1477	207.6
	3	7.51	10.37	1452	240.6
C	3*	7.62	10.67	1472	202.0
A	4				

Rezultati merenja EC i temperature voda po dubini, na svakih 5 metara, u različitim fazama režima rada tunela, u piježometru PP-3, dati su u tabeli IV.25. Rezultati anjonskog i katjonskog sastava uzorkovanih voda na ovom piježometru prikazani u tabeli IV.26.

Tabela IV.25: Prikaz vrednosti EC i T podzemnih voda po dubinama u piježometru PP-3 (izražene promene označene crvenom bojom) [17], [40]

Dub. (m)	EC	T	EC	T	EC	T	EC	T	EC	T	EC	T	EC	T	EC	T
	18-09-16		20-09-16		21-09-16		06-10-16		22-10-16		24-10-16		26-10-16		10-11-16	
	A		B								C				A	
15	672	11.6													1261	10.3
20	681	10.3													1267	10.2
25	689	10.2													1268	10.2
30	695	10.1													1263	10.2
35	697	10.1	737	10.8							1711	11.3	1426	10.3	1265	10.1
40	709	10	728	10.1							1700	10.3	1375	10.3	1444	10.1
45	787	10	725	10	700	10.2					1605	10.2	1212	10.3	1517	10.1
50	1077	10	727	10	710	10					1325	10.2	1133	10.2	1517	10.1
55	1519	9.9	730	9.9	695	10					843	10.1	1051	10.2	1523	10
60	1581	9.9	1818	9.9	1829	9.9	1576	9.8	1676	10.2	566	10.1	1614	10.2	1705	10
65	1585	9.9	1833	9.9	1832	9.9	1641	10.1	1693	10.1	489	10.1	1601	10.2	1764	10
68					2747	9.9	2164	10.2	1747	10.1	3063	10.2			3021	10

Tabela IV.26: Hemijski sastav podzemnih voda uzorkovanih u piježometru PP-3 izražene promene označene crvenom bojom) [40]

	HCO ₃	Cl	SO ₄	Na	K	Ca	Mg	NO ₃	TDS	Tip vode
	mg/l									
A	224	42.6	80	142	4.2	12.7	4.8	3.6	517.8	Na-HCO ₃ -SO ₄ -CO ₃
B	640	7.2	317	310	15.7	38.4	23.6	43.5	1401	Na-HCO ₃ -SO ₄
	689	52	270	305	1.4	124	26.4	47.5	1517	Na-Ca-HCO ₃ -SO ₄
C	522	147	212	298	0.7	52.6	25	38	1296	Na-HCO ₃ -SO ₄ -Cl
A	360	112	146	202	8.3	36.2	15.8	17.2	899.3	Na-HCO ₃ -Cl-SO ₄

Piježometar PP-4

Fizičko-hemijski parametri voda uzorkovanih u piježometru PP-4 prikazani su u tabeli IV.27. Prikaz dobijenih vrednosti EC i T podzemnih voda po dubini u ovom piježometru, na svakih 5 metara dati su u tabeli IV.28. Rezultati anjonskog i katjonskog sastava uzorkovanih voda prikazani su u tabeli IV.29.

Tabela IV.27: Fizičko-hemijski parametri podzemnih voda u piježometru PP-4 (izražene promene označene crvenom bojom) [40]

Faza režima rada tunela	Seriya uzorkovanja	pH	T (°C)	EC (µS/cm)	ORP (mV)
B	3	9.73	10.51	130	-509
A	4				

Tabela IV.28: Prikaz vrednosti EC i T podzemnih voda po dubinama u piježometru PP-4 (izražene promene označene crvenom bojom) [40]

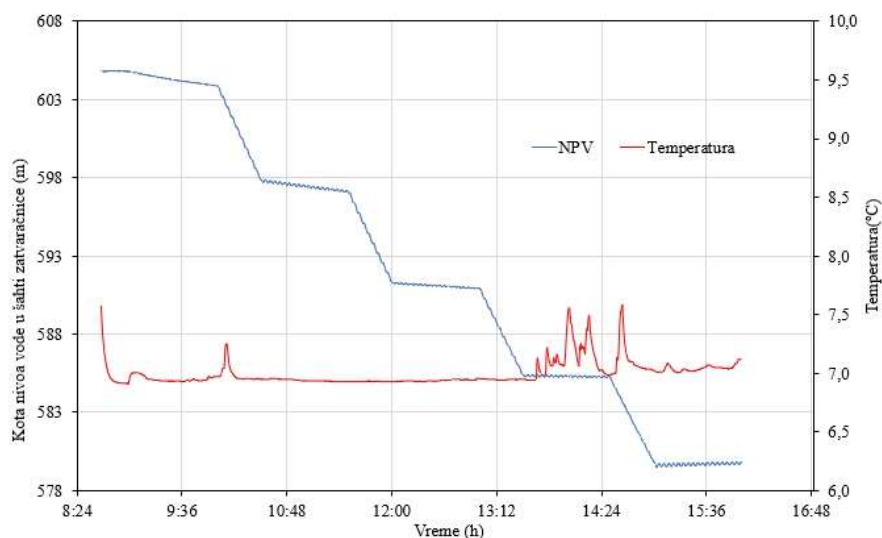
Dub.	EC	T	EC	T
	21.10.2016		24.10.2016	
	B		C	
5	197	11.6		
10	198	10.2		
15	198	10.2		
20	203	10.3		
25	205	10.3	205	10.5
30	209	10.5	202	10.5
35	212	10.5	204	10.6
40	213	10.6	207	10.7
45	215	10.7	210	10.8
50	220	10.8	212	10.8
55	222	10.9	214	10.9
60	224	11.0	215	11.0
65	225	11.1	217	11.1
70	227	11.2	218	11.2
75	227	11.3	220	11.3
80	222	11.5	222	11.5
85	230	11.6	223	11.6
90	230	11.7	224	11.7
95	230	11.8	227	11.8
100	230	11.9	228	11.9

Tabela IV.29: Hemijski sastav podzemnih voda uzorkovanih u piježometru PP-4 izražene promene označene crvenom bojom) [40]

	HCO ₃ (+CO ₃)	Cl	SO ₄	Na	K	Ca	Mg	NO ₃	TDS	Tip vode
	mg/l									
B	52 (+40)	25	12.8	28.5	3.6	86.3	3.3	7.3	220	Ca-Na-CO₃
A	60 (+32)	25	14.3	21.5	4	18.5	3.4	1	232	Na-Ca-CO₃

1.2.2.3. Rezultati merenja promene fizičko-hemijskih karakteristika voda u šahti tunelske zatvaračnice / period merenja sumarnih gubitaka

Rezultati izmerenih vrednosti temperature vode u tunelskoj zatvaračnici na stepenicama držanja nivoa, u toku merenja sumarnih gubitaka, na 10 sekundi prikazano je na slici IV.33.

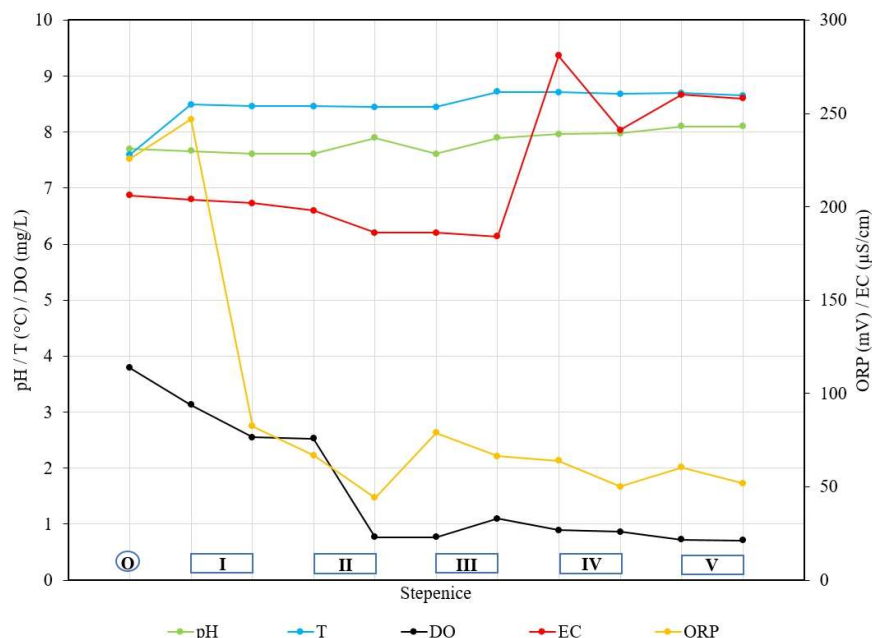


Slika IV.33. Promena temperature u tunelskoj zatvaračnici na stepenicama držanja nivoa u toku merenja sumarnih gubitaka na 10 sekundi [17]

Pre spuštanja pomoćnog zatvarača na šahti ulazne građevine izvršeno je merenje fizičko-hemijskih parametara voda. Merenja fizičko-hemijskih parametara (pH, T, EC, ORP i DO) su vršena na svakoj stepenici držanja nivoa tokom merenja sumarnih gubitaka i to na 5. i 55. minutu (tabela IV.30). Grafički prikaz dobijenih rezultata sa prikazom stepenica držanja nivoa vode prikazan je na slici IV.34.

Tabela IV.30: Rezultati fizičko-hemijskih parametara tokom merenja sumarnih gubitaka u zatvaračnici

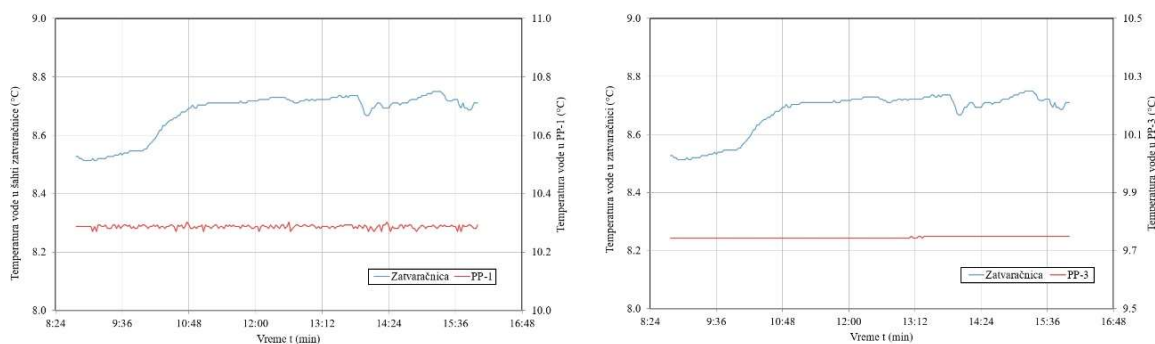
	pH	T (°C)	EC (μS/cm)	ORP (mV)	DO (mg/L)
Početno stanje	7.7	7.6	206	225.70	3.79
I stepenica	7.66	8.49	204	246.8	3.13
	7.61	8.46	202	82.4	2.55
II stepenica	7.61	8.46	198	66.8	2.53
	7.9	8.45	186	44.1	0.77
III stepenica	7.61	8.45	186	78.9	0.77
	7.9	8.72	184	66.3	1.1
IV stepenica	7.96	8.71	281	63.9	0.89
	7.98	8.68	241	50.0	0.86
V stepenica	8.1	8.7	260	60.4	0.72
	8.1	8.65	258	51.9	0.71



Slika IV.34. Promena fizičko-hemijski parametara voda u šahti zatvaračnice tokom merenja sumarnih gubitaka, na 5 stepenica držanja nivoa

1.2.2.4. Rezultati sinhronih merenja promene temperature i elektroprovodljivosti podzemnih voda u piježometrima u periodu merenja sumarnih gubitaka

U toku merenja sumarnih gubitaka, rezultati sinhronih merenja promena temperaturnog režima u piježometrima PP-1 i PP-3, sa vremenskim intervalom od 2 minuta prikazani su na slici IV.35.



Slika IV.35. Promena temperature voda u tunelskoj zatvaračnici i piježometrima PP-1 i PP-3, na stepenicama držanja nivoa u toku merenja sumarnih gubitaka na 2 minuta

Neposredno pre početka merenja sumarnih gubitaka i nakon završenog postupka merenja, u piježometru PP-1 pored merenja nivoa podzemnih voda vršeno je i osmatranje fizičko-hemijskih parametara *in-situ* (tabela IV.31).

Tabela IV.31: Fizičko-hemijski parametri sa nivoima podzemnih voda u piježometru PP-1 (I - pre merenja sumarnih gubitaka, II - nakon merenja sumarnih gubitaka)

Merenje	Datum merenja	NPV (m)	pH	T (°C)	EC (μS/cm)	ORP (mV)
I	19/9/2016	98.60	7.24	9.74	261	-110
II		98.59	7.28	9.84	279	-98

Terenska merenja fizičko-hemijskih parametara podzemnih voda u piježometru PP-3 izvršena su u dva navrata: pre merenja sumarnih gubitaka i neposredno po završetku merenja sumarnih gubitaka (tabeli IV.32). Rezultati izmerenih vrednosti EC i T podzemnih voda po dubinama, na svakih 5 metara za piježometar PP-3 dati su u tabeli IV.33.

Tabela IV.32. Fizičko-hemijski parametri nivo podzemnih voda u piježometru PP-3, merenje: I - pre merenja sumarnih gubitaka, II - nakon merenja sumarnih gubitaka; (crvenom bojom označene najizraženije promene)

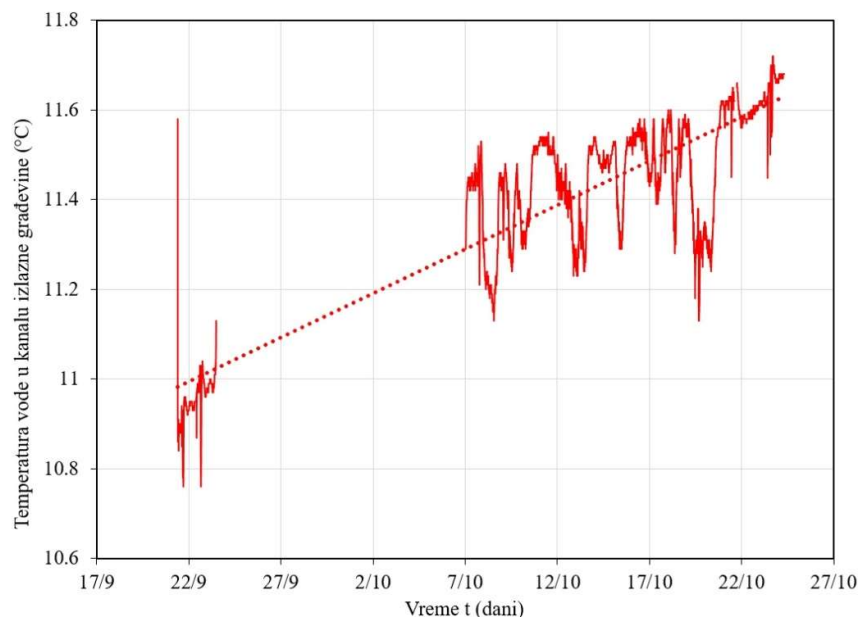
Merenje	Datum merenja	NPV (m)	pH	T (°C)	EC (μS/cm)	ORP (mV)
I	19/9/2016	14.00	7.6	10.6	1585	-76.6
II		21.19	7.9	10.8	1833	-8.7

Tabela IV.33. Prikaz vrednosti EC i T podzemnih voda po dubinama za piježometar PP-3 (karakteristične vrednosti označene crvenom bojom)

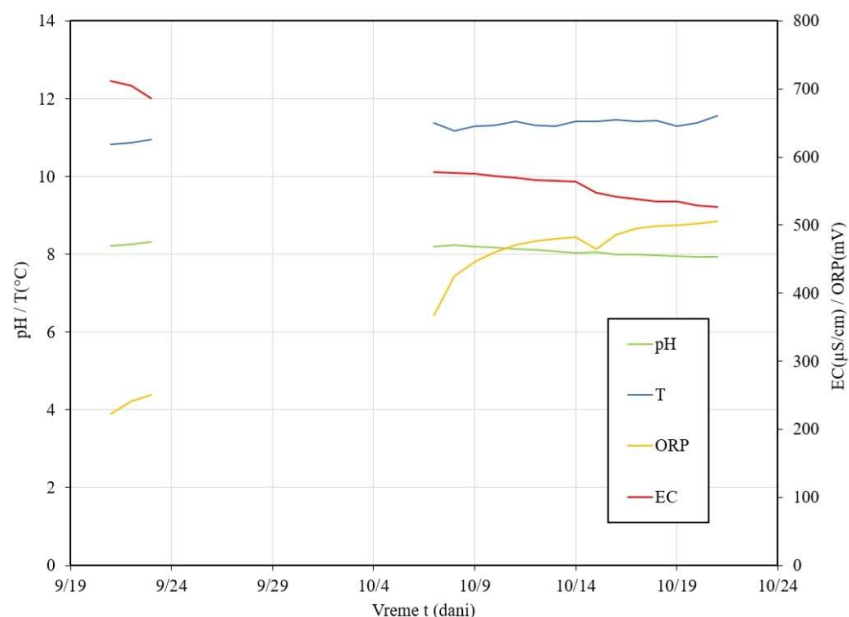
Dubina (m)	EC (μS/cm)	T (°C)	Dubina (m)	EC (μS/cm)	T (°C)
I			II		
Pre merenja sumarnih gubitaka			Nakon merenja sumarnih gubitaka		
15	672	10.6			
20	681	10.3			
25	689	10.2			
30	695	10.1			
35	697	10.1	35	737	10.8
40	709	10	40	728	10.1
45	787	10	45	725	10
50	1077	10	50	727	10
55	1519	9.9	55	730	9.9
60	1581	9.9	60	1818	9.9
65	1585	9.9	65	1833	9.9

1.2.2.5. Rezultati merenja fizičko-hemijskih parametara podzemnih voda u kanalu izlazne građevine

Rezultati izmerenih vrednosti temperature vode na kanalu izlazne građevine, sa intervalom osmatranja od 2 minuta prikazani su na slici IV.36, dok su vrednosti izmerenih fizičko-hemijskih parametara ovih voda date na slici IV.37 [40].



Slika IV.36. Promena temperature vode na kanalu izlazne građevine (interval osmatranja 2 minuta)

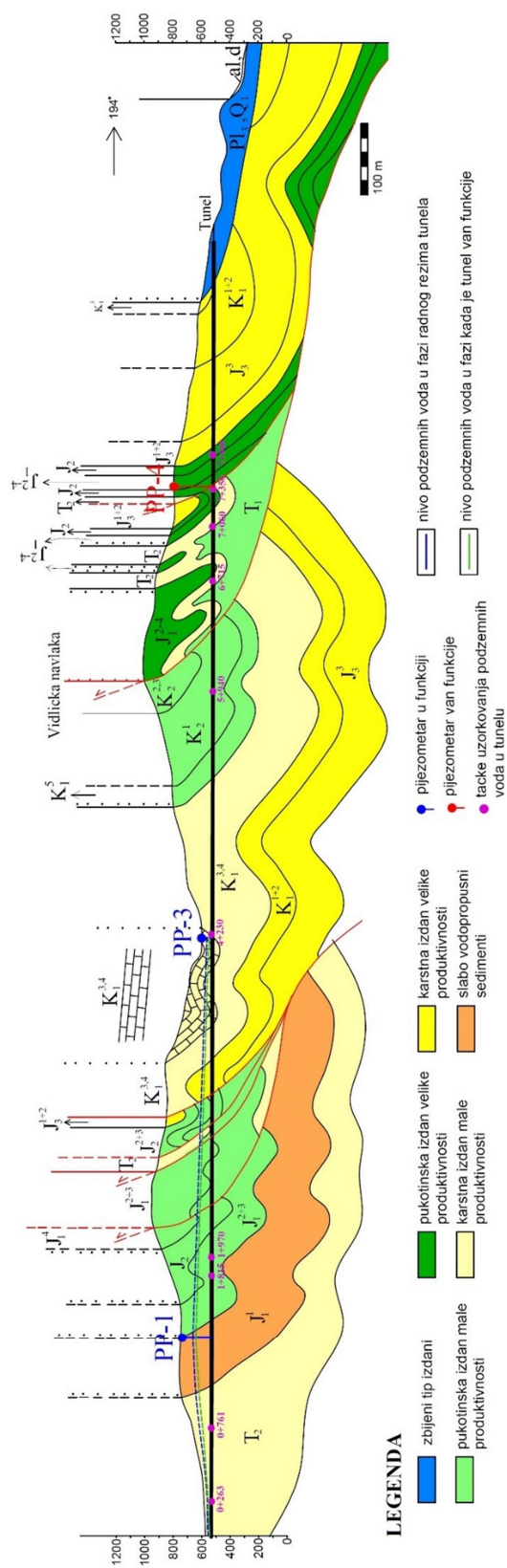


Slika IV.37. Promena fizičko-hemijskih parametara na kanalu izlazne građevine na dnevnom nivou

1.2.2.6. Rezultati kvalitativnih karakteristika voda uzorkovanih u tunelu

Tokom istraživanja vršenih u hidrotehničkom tunelu izvedeno je prvo osnovnih merenje fizičko-hemijskih parametara (multiparametarskom sondom, *in-situ*) na velikom broju pojava podzemnih voda koje ističu u tunel kroz betonsku oblogu. Na uzorkovanim vodama *in-situ* merene su vrednosti sledećih fizičko-hemijskih parametara: pH vrednosti, temperature voda (T), električne provodljivosti (EC) i oksido-redukcionog potencijala (ORP). Na osnovu dobijenih rezultata vršen je odabir karakterističnih tačaka u tunelu, odnosno lokacija sa kojih je uzorkovana podzemna voda na kojima će biti urađena hemijska analiza [40].

U prvoj seriji uzorkovanja (21/9/2016) uočene su određene specifičnosti izmerenih fizičko-hemijskih parametara podzemnih voda na više lokacija u tunelu koje su ukazivale na prisustvo podzemnih i akumulacionih voda kada je ujedno i njihova količina bila najveća. Međutim, tokom naredne dve serije uzorkovanja voda u tunelu (6/10/2016 i 21/10/2016) količina voda koje procuruju u tunel na karakterističnim tačkama kroz oblogu bio je vidljivo manja sa još izraženijim vrednostima navedenih parametara. Shodno rezultatima koji su dobijeni merenjima *in-situ* odabrano je ukupno 10 karakterističnih tačaka u tunelu sa kojih su uzorkovane podzemne vode za potrebe izrade hemijske analize [14]. Uzorkovane vode su odgovarale sledećim stacionažama tunela: 0+263 m, 0+761 m, 1+815 m, 1+970 m, 4+230 m, 5+940 m, 6+715 m, 7+060 m, 7+350 m i 7+600 m (slika IV.38) [40].



Slika IV.38. Hidrogeološki profil duž tunela pod pritiskom sa označenim stacionažama/tačkama uzorkovanja podzemnih voda

Fizičko-hemijske karakteristike podzemnih voda uzorkovanih u hidrotehničkom tunelu prikazane su u tabeli IV.34 sa izraženim promjenama označenim crvenom bojom, dok je njihov hemijski sastav dat u tabeli IV.35 [40].

Tabela IV.34. Fizičko-hemijski parametri uzorkovanih voda u tunelu na svih 10 stacionaža sa označenim porastom (↑) ili padom (↓) parametara tokom 3 serije uzorkovanja [40]

Stac. (m)	Datum	pH	↑↓	T (°C)	ΔT	EC (μS/cm)	ΔEC	ORP (mV)	ΔORP
0+263	21/9/2016	7.07	↑	9.82	↑	600	↓	282	↑
	21/10/2016	7.55		10.0		536		428	
0+761	21/9/2016	7.33	↑	9.44	↑	243	↑	243	↑
	21/10/2016	7.46		9.96		594		433	
1+815	21/9/2016	9.16	↓	8.35	↑	1688	↑	-114	↓
	21/10/2016	8.70		8.79		1886		-243	
1+970	21/9/2016	8.74	↓	8.84	↑	2037	↑	-104	↑
	6/10/2016	8.68		9.06		2181		-95	
	21/10/2016	8.87	↑	9.06	-	2131	↓	-277	↓
4+230	21/9/2016	7.88	↓	9.03	↑	4494	↑	318	↓
	6/10/2016	7.83		9.30		10200		191	
	21/10/2016	8.08	↑	9.17	↓	7700	↓	20	↓
5+940	21/9/2016	7.50	↑	15.26	↑	679	↓	216	↓
	21/10/2016	7.55		17.09		555		129	
6+715	21/9/2016	8.14	↑	11.81	↑	617	↑	234	↓
	6/10/2016	8.30		15.57		679		108	
	21/10/2016	8.27	↓	15.72	↑	666	↓	121	↑
7+060	6/10/2016	7.4	↓	13.94	↑	503	↑	248	↓
	21/10/2016	7.7		14.37		525		458	
7+350	21/9/2016	7.30	↑	13.88	↑	454	↑	212	↑
	6/10/2016	7.37		14.00		496		248	
	21/10/2016	7.55	↑	14.52	↑	488	↓	151	↓
7+600	21/9/2016	8.02	↓	9.32	↑	443	↓	75	↓
	6/10/2016	7.73		9.93		441		-71	
	21/10/2016	7.95	↑	10.44	↑	445	↑	-5	↑

Tabela IV.35. Hemijski sastav voda uzorkovanih u hidrotehničkom tunelu na svih 10 stacionaža [40]

Stac. (m)	Dat.	HCO ₃	Cl	SO ₄	Na	K	Ca	Mg	TDS	Tip vode
0+263	21/9/2016	390	7.6	87.3	10.7	1.2	120.6	15.6	626	Ca-HCO ₃ -SO ₄
	21/10/2016	345	6.4	52	4.8	1.1	108.4	14.6	532	Ca-HCO ₃
0+761	21/9/2016	394	2.5	62.5	16.8	3.4	88.6	31.7	593	Ca-Mg-HCO ₃
	21/10/2016	380	6.2	73	14.2	3.4	101	31.3	603	Ca-Mg-HCO ₃
1+815	21/9/2016	1160	51	100	568	2.3	2.4	1.1	1885	Na-HCO ₃
	21/10/2016	1070	70	130	535	2.5	2.9	1.2	1812	Na-HCO ₃
1+970	21/9/2016	1070	4	430	665	3.6	5.6	2.7	2183	Na-HCO ₃ -SO ₄
	6/10/2016	1010	17.5	512	600	3.8	5	2.6	2151	Na-HCO ₃ -SO ₄
	21/10/2016	910	40	460	557	3.6	4.7	2.4	1978	Na-HCO ₃ -SO ₄
4+230	21/9/2016	421	1880	1460	1840	7.5	74.6	72.2	5815	Na-Cl-SO ₄
	6/10/2016	445	2310	1700	2100	9.6	71.2	85.6	6721	Na-Cl-SO ₄
	21/10/2016	488	1860	1500	1880	10	74.7	68.4	5947	Na-Cl-SO ₄
5+940	21/9/2016	406	9	45	42.3	2.3	87.3	26	614	Ca-Mg-Na-HCO ₃
	21/10/2016	396	66.6	54	37.6	2.4	94.7	25	674	Ca-Mg-HCO ₃ -Cl
6+715	21/9/2016	464	3	40	178	2.2	6	2.7	697	Na- HCO ₃
	6/10/2016	458	6.8	37.2	190	2.4	5.4	2.7	708	Na- HCO ₃
	21/10/2016	458	6.3	38	188.5	2.4	6.3	2.4	702	Na- HCO ₃
7+060	6/10/2016	336	7	35.4	2.8	1.7	83.6	25	475	Ca-Mg-HCO ₃
	21/10/2016	332	8.5	38	4.2	1.7	89.5	24.1	481	Ca-Mg-HCO ₃
7+350	21/9/2016	328	2.5	37.5	5.1	1.5	99.2	15	484	Ca-HCO ₃
	6/10/2016	330	5.2	43	2.4	1.4	86.4	19.8	501	Ca-Mg-HCO ₃
	21/10/2016	330	6.1	40	2.8	1.4	96.8	19.3	498	Mg-Ca-HCO ₃ -SO ₄
7+600	21/9/2016	260	2.5	57.5	15.4	4.6	39.7	31.5	419	Mg-Ca-HCO ₃ -SO ₄
	6/10/2016	268	5.3	55	15	5.2	41.8	35	409	Mg-Ca-HCO ₃
	21/10/2016	270	4.8	54	12.5	4.8	43.2	33	431	Mg-Ca-HCO ₃

3. Rezultati stepena agresivnosti podzemnih voda na stanje betonske obloge tunela

Na osnovu EU standarda EN 206-1, standarda Kalifornijskog ministarstva saobraćaja (CDT 2003), Larson-Skold-ovog (LSkl) indeksa i agresivnih karakteristika podzemnih voda po [47], markirane su potencijalno kritične/ugoržene zone u tunelu sa aspekta agresivnosti podzemnih voda (tabela IV.36) i stabilnosti hidrotehničkog objekta.

Tabela IV.36: Klasifikacija podzemnih voda po stepenu agresivnosti uzorkovanih u tunelu [17]

Parametar	Granična vrednost	Referenca	Broj agresivnih voda	Lokacija/stacionaža u tunelu
pH	≤ 6.5	[31]	0	-
	< 7.0	[46]	0	-
Mg (mg/l)	> 300	[31]	0	-
	> 60	[46]	1	4+230 m
SO ₄ (mg/l)	≥ 200	[31]	2	1+970 m, 4+230 m
	> 250	[46]	2	1+970 m, 4+230 m
Cl (mg/l)	> 500	[31]	1	4+230 m
LSki	> 1.2	[2]	1	4+230 m

2. Analiza rezultata istraživanja

2.1. Analiza rezultata meteoroloških i hidroloških istraživanja

2.1.1. Analiza rezultata meteoroloških istraživanja

Analizirani tromesečni period, od septembra do novembra 2016. godine, ukazuje da su temperature vazduha bile u proseku više za 1 °C (oktobar i novembar mesec) u odnosu na višegodišnji razmatrani period, dok je septembar bio za 1 °C hladniji u odnosu na višegodišnji period. Dnevne oscilacije temperature vazduha u periodu septembar – novembar 2016. godine sa prosečnim temperaturama od 16.5 °C, ukazuju na dosta ujednačen temperaturni režim u prvoj polovini septembra, sa temperaturama iznad 16 °C. U drugoj polovini septembra temperature vazduha opadaju i kreću se ispod 15 °C. Maksimalna temperatura zabeležena je 19/9/2016 (22.5 °C) dok je minimalna zabeležena 22/23/9/2016 (9.7 °C).

Oktobar mesec je imao prosečnu temperaturu od 10.6 °C, sa ekstremnim vrednostima: maksimalnom temperaturom od 18.9 °C osmotrenom 3/10/2016 i minimalnom od 2 °C koja je zabeležena 29/10/2016. godine. Novembar mesec je bio najhladniji u osmatračkom periodu sa prosečnom temperaturom od 5.7 °C, kada je maksimalna temperatura vazduha zabeležena 7/11/2016 u vrednosti od 14.7 °C dok je minimalna temperatura zabeležena 30/11/2016 i iznosila je -4.1 °C.

U periodu kada su sprovedena detaljna hidrogeološka istraživanja (septembar-novembar 2016. godine) izmerene vrednosti padavine su bile manje u septembru, a veće u oktobru i novembru mesecu posmatrano kroz višegodišnji period, odnosno prosečne višegodišnje sume padavina. Najdrastičnija odstupanja ukupnih suma padavina zabeležene su u novembru mesecu 2016. godine u odnosu na razmatrani višegodišnji nivo kada su padavine u 2016. godini bile gotovo duplo veće nego za višegodišnji period. Ujedno novembar 2016. godine, posle 2006. godine kada su Psr iznosile 146.7 mm je bio najkišniji u odnosu na ceo razmatrani period i Psr je iznosilo 91.7 mm.

U septembru mesecu, u periodu trajanja 20 dana prisutno je potpuno odsustvo padavina, dok su srednje mesečne sume padavina iznosile 1.2 mm, sa maksimalnim zabeleženim padavinama od 14.5 mm (20/9/2016).

Tokom oktobra meseca zabeleženi period bez padavina trajao je 15 dana, dok su srednje mesečne sume padavina iznosile 2.6 mm. Maksimalnim padavine tokom ovog meseca iznosile su 20 mm i zabeležene su 12/10/2016. godine. U novembru mesecu u periodu od 16 dana nije bilo padavina. Srednje mesečne sume padavina iznosile su 3.11 mm, a maksimalne padavine zabeležene su 10/11/2016. godine u vrednosti od 30 mm.

Rezultati dnevnih vrednosti temperatura i padavina za razmatrani tromesečni period korišćeni su u analizi dobijenih hidroloških i hidrogeoloških rezultata istraživanja u cilju definisanja stepena zavisnosti/uticaja na hidrogeološku sredinu.

2.1.2. Analiza rezultata hidroloških istraživanja

Osmatranje režima Dobrodolske reka na prvom hidrometrijskom profilu koji je postavljen u zoni ulaska toka Dobrodolske reke u zonu termalnih isticanja podzemnih voda, ukazao je na postojanje konstantnog dotoka voda sa krednih krečnjaka bez detektovanih značajnih promena proticaja i vodostaja, posmatrano kroz periode različitog režima rada hidrotehničkog tunela.

Nivogram Dobrodolske reke na profilu 1 pokazuje da je jedino do značajnog porasta vodostaja sa 20 na 22 cm došlo 15/10/2016. godine. Međutim, ova promena režima vodotoka ne može biti posledica izazvana različitim režimom rada tunela, s obzirom na činjenicu da je u tom trenutku tunnel bio van funkcije 27 dana. Porast nivoa reke od 2 cm posledica je intenzivnih padavina koje su zabeležene 12/10/2016. u veličini od 20 mm. Osmatranje proticaja vršeno je sa vremenskim intervalom od 7 dana, što se posmatrano kroz osmatrački period od tri meseca pokazalo kao nedovoljan broj podataka za definisanje prirodnog režima Dobrodolske reke.

Hidrogram Dobrodolske reke na profilu 1, ukazuje da je proticaj varirao u opsegu od 50 do 80 l/s tokom gotovo celog osmatračkog perioda, bez određene zakonomernosti koja bi ukazala da su promene režima vodotoka prouzrokovane različitim režimom rada tunela. U uslovima ponovno uspostavljenog radnog režima tunela (17 dana nakon punjenja tunela) izmeren je najveći zabeleženi proticaj na ovom mernom profilu od 403.5 l/s. Ovako drastično veliki porast proticaja Dobrodolske reke u zoni razmatranog profila prvenstveno je posledica pluviografskog režima, odnosno intenzivnih padavina koje su se desile u periodu od 8/11/2016 do 11/11/2016., kada su registrovane sumarne padavine od 52.6 mm. Ovakav režim ujedno je i tipičan za površinske tokove koji su formirani na karstnim terenima, na kojima usled kišnih perioda dolazi do punjenja podzemlja/karstne izdani. Kao posledica zasićenja izdani dolazi do značajnog porasta proticaja na površinskim tokovima. Tokom trajanja navedenog perioda došlo je do formiranja poplavnog talasa koji je bio praćen velikim proticajem površinskog toka, koji je prouzrokovao odnošenje vodomerne letve i samim tim nedostatak podataka o stanju vodostaja za vreme intenzivnog kišnog perioda.

Prikazana zavisnost proticaja i vodostaja ukazuje na postojanje dosta nestabilnog režima razmatranog vodotoka, uzrokovanog nizom različitih faktora, pre svega geološke građe terena, pluviografskog režima, isticanja termalnih voda i specifičnosti karstnog terena.

Na mernom profilu 2 vodostaj je tokom celog osmatračkog perioda bio gotovo konstantan, sa vrednostima od 20 cm. Jedino značajnije odstupanje u vodostaju zabeleženo je u periodu od 15/9/2016 do 21/9/2016 godine, kada je vodostaj iznosio 21 cm. Porast vodostaja na letvi 2 od 1 cm najverovatnije je posledica dosta nestabilnog režima isticanja termalnih izvora, na šta ukazuju merenja proticaja na termalnom izvoru Dag Banjica, kao i specifični geološki i hidrogološki uslovi cele termalne zone.

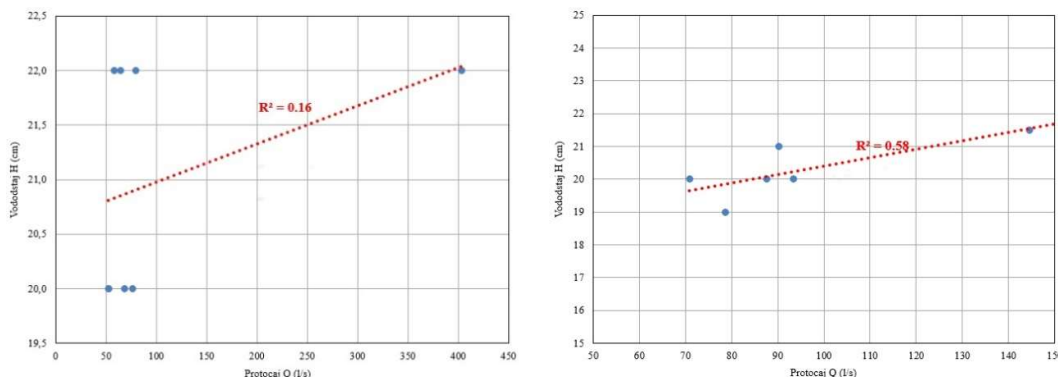
Međutim, iako se registrovane manje oscilacione promene nivoa površinskog toka/vodostaja, u periodu od 2/9/2016 do 15/10/2016 nije bilo značajnijih oscilacija proticaja (do ± 20 l/s). 22/10/2016 i 24/10/2016 registrovana je značajnija oscilacija proticaja Dobrodolske reke na ovom vodomernom profilu od ± 60 l/s što je takođe posledica režima isticanja iz Dag Banjice i verovatno isticanja svih termalnih izvora formiranih u zoni Vidličke navlake. U prilog navedenoj konstataciji ide podatak da je najveći proticaj na izvoru Dag Banjica zabeležen upravo u ovom trenutku.

Na profilu 2, kao i na profilu 1, 10/11/2016 došlo je do naglog porasta vodostaja, a samim tim i proticaja Dobrodolske reke uzrokovanih značajnom količinom padavina, što je ujedno prouzrokovalo i odnošenje vodomerne letve i na ovom profilu. U datom trenutku registrovan je proticaj od 347.2 l/s, što je duplo više u odnosu na ostale izmerene vrednosti proticaja u celom periodu osmatranja.

Zavisnost proticaja i vodostaja na ovom mernom profilu ukazuje na daleko bolju povezanost nego što je to slučaj na profilu 1, što nedvosmisleno ukazuje na postojanje dosta ustaljenijeg režima isticanja.

To potvrđuju i vrednosti koeficijenta determinacije R^2 dve varijable (slika IV.39), u ovom slučaju vodostaja i proticaja, na profilu 1 (0.16) i profilu 2 (0.58). Ovakvo stanje je prvenstveno posledica

postojanja termalnih izvora u razmatranoj zoni i njihovog konstantnog proticaja koji nije zavisen od dotoka iz izvora formiranih u lokalnim hidrogeološkim sistema (koji su direktno zavisni od padavina) već konstantnog dotoka podzemnih voda formiranih u dubokim, regionalnim hidrogeološkim sistemima.



Slika IV.39. Koeficijent determinacije R^2 vodostaja (H) i proticaja (Q) na letvi 1 i 2

Na osnovu obavljenih termovijskih snimanja duž cele razmatrane zone utvrđeno je direktno isticanje termalnih voda u tok Dobrodolske reke, kroz samo korito reke ali i po odbodnim delovima terena. U proseku, sve locirane pojave termalnih izvora imale su povišenu temperaturu za 5 – 10 °C u odnosu na temperaturu Dobrodolske reke.

2.2. Analiza rezultata hidrogeoloških istraživanja

2.2.1. Analiza rezultata dobijenih kvantitativnih karakteristika podzemnih voda

2.2.1.1. Analiza rezultata kvantitativnih karakteristika podzemnih voda na izvorima

1. Izvor Izvor

Izdašnost razmatranog vrela tokom celokupnog osmatračkog perioda je bila dosta ujednačena. U periodu sprovedenih istraživanja nisu registrovane promene izazvane različitim režimom rada tunela (tokom trajanja faza A, B i C). Relativno dobro ujednačen režim isticanja ovog vrela prisutan kroz ceo osmatrački period, odlikovao se konstantnim oscilacijama vrednosti vodostaja koji se kretao u dijapazonu od 49 do 50 cm. Usled značajnijih padavina koje su se izlučile na slivno područje razmatranog vrela 8/11/2016 došlo je do naglog porasta vodostaja već nakon jednog dana zakašnjenja, odnosno 9/11/2016. U tom periodu samo u toku jednog dana zabeleženo je povećanje vodostaja sa 50 na 59 cm, odnosno 10/11/2016 na 61 cm.

Oscilatorne promene proticaja vrela Izvor, isto kao i u slučaju promene vodostaja, direktno su zavisile od kiše koja je pala na slivno područje. Proticaj je u toku tromesečnih osmatranja oscilirao u dijapazonu od 6 l/s do 10 l/s, sa izuzetkom poslednjih merenja izvršenih 10/11/2016 kada je registrovan ujedno i najveći proticaj od 151.6 l/s, prouzrokovan velikim padavinama koje su registrovane u periodu od 8/11/2016 do 11/11/2016. godine.

2. Izvor Berilovac

Izmereni proticaji/izdašnost vrela kretala se u relativno uskom dijapazonu promena sa malim vrednostima od 0.37 l/s do 0.38 l/s, od početka osmatračkog perioda pa do 10/11/2016. 10/11/2016

registrovano je povećanje izdašnosti na 0.41 l/s što je svakako bilo prouzrokovano direktnim uticajem pojave kišnog perioda/epizode koja je registrovana od 8/11/2016 do 11/11/2016. godine.

3. Izvori Nišor 1 i 2

Izdašnosti izvora Nišor 1 je bila izuzetno mala i kretala se u dijapazonu od 0.006 l/s do 0.007 l/s, a izdašnost izvora Nišor 2 je izmerena u vrednosti od 0.18 l/s do 0.52 l/s, tokom trajanja celog osmatračkog perioda. Ove promene u izdašnosti izvora nisu ukazale na direktnu zavisnost sa fazama različitog režima rada tunela, već su zabeležene oscilacije izvora Nišor 2 uzrokovane pre svega pluviografskim režimom.

4. Dobri Do

Iako hidrogram na ovom izvoru ne ukazuje da je došlo do nekih drastičnijih promena u toku osmatračkog perioda, jedna značajnija promena je uočena u toku trajanja faze B (tunel van funkcije), što može biti pokazatelj potencijalnog uticaja tunela na režim isticanja ovog vrela. Međutim, ta promena treba biti uzeta sa velikom rezervom s obzirom na činjenicu da dobijeni rezultati nisu osmotreni na glavnoj zoni isticanja ovog vrela. Tačnije, proticaj izmeren 6/10/2016., 18 dana nakon praznjenja tunela bio je duplo manji ($Q=0.17$ l/s) nego onaj izmeren 10/9/2016 i 18/10/2016. godine ($Q=0.30$ l/s i $Q=0.34$ l/s) kada je tunel bio u funkciji (faza A). Međutim, 22/10/2016. godine kada je tunel bio i dalje van radnog režima došlo je do porasta proticaja na izvoru Dobri Do na $Q=0.26$ l/s što je suprotno očekivanom ukoliko postoji antropogeni uticaj. Ovaj porast isticanja najverovatnije ukazuje da je slivno područje izvora direktno pod uticajem atmosferskih taloga (padavina) izazvano registrovanim padavinama 17/10/2016. koje su se izlučile na slivu 5 dana ranije (10.9 mm). Ponovno punjenje tunela nije dovelo do značajnijeg porasta izdašnosti.

5. Izvor Glame

Rezultati merenja proticaja izvora Glame ukazuje na dosta stabilan/ujednačen režim isticanja, posmatrano kroz period trajanja istraživanja. U toku različitih faza režima rada tunela (faza A, B i C) isticanje iz ovog vrela je bilo dosta malo sa vrednostima od $Q=0.01$ l/s.

6. Termalni izvor Dag Banjica

Isticanje termalnog izvora Dag Banjica, omogućeno regionalnom tektonikom terena (Vidličkom navlakom) ukazao je na dosta ujednačen režim isticanja. Na osnovu proticaja ovog izvora uočava se da ne postoji direktna zavisnost padavina i proticaja, što je još jedna potvrda da voda koja ističe u celoj zoni ovog izvora a i samom izvoru dolazi sa značajnih dubina, gde je zona prihranjivanja dosta udaljena u odnosu na zonu isticanja. Samim tim, duboka cirkulacija podzemnih voda nema direktni kontakt sa vodama transportovanim tunelom pod pritiskom.

2.2.1.2. Analiza rezultata kota gornje vode akumulacionog jezera i kvantitativnih karakteristika podzemnih voda u piježometrima

1. Kote gornje vode akumulacionog jezera

Oscilacije nivoa akumulacionog jezera, odnosno kote gornje vode ukazuje na trenutne vrednosti kote uspora koja određuje i radni pritisak u tunelu. S obzirom na poznatu maksimalnu kotu uspora koja iznosi 645 m, kada se postiže pritisak u tunelu od oko 8 bara, evidentno je da pri ovom stanju kote

gornje vode u proseku od 606 m nije postignut maksimalni pritisak u tunelu, već je njegova vrednost iznosila oko 4 bara.

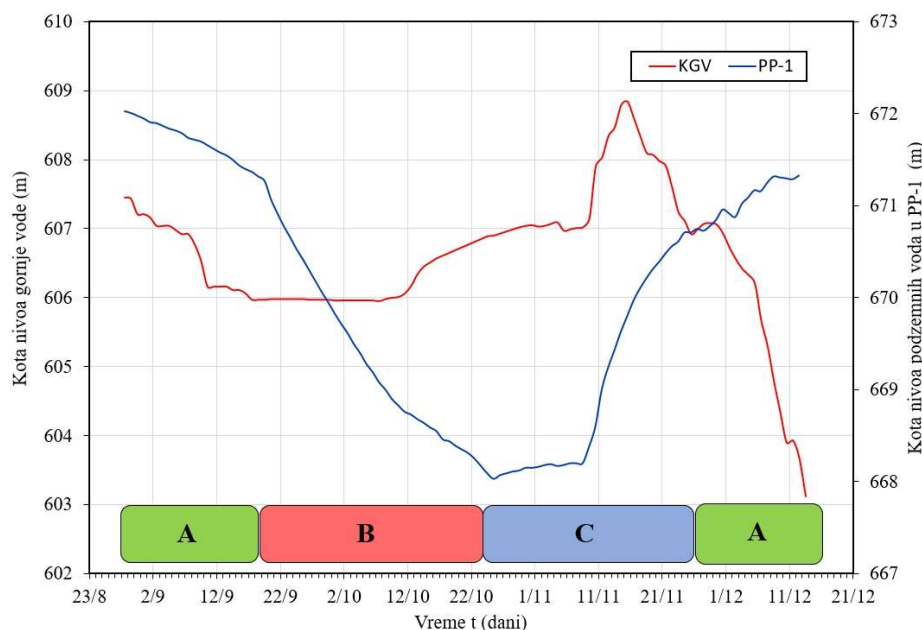
Definisanje radnog pritiska vrši se na osnovu poznatih vrednosti min. i max. kote uspora kao i poznate kote dna tunela u delu ulazne građevine, odnosno zatvaračnice. S obzirom da se kota dna zatvaračnice nalazi na 564 m, max. kota uspora na 645 m a min. kota uspora na 568 m, maksimalni radni pritisak u tunelu se postiže kada je visina vodenog stuba u zatvaračnici 81 metar (cc 8 bara), odnosno minimalni radni pritisak od oko 0.4 bara se postiže visinom vodenog stuba od 4 m.

1 bar = 10.1974442889221 m H₂O

2. Pijezometar PP-1

Oscilacije nivoa podzemnih voda u pijezometru PP-1 ukazuju na izuzetno visoko stanje podzemnih voda (početno stanje, faza A), dosta iznad nivoa akumulacionog jezera (kote gornje vode - KGV) [40]. Iako je pri punom radnom režimu tunela izmereni nivo podzemnih voda na 97.97 metara dubine (kota usta pijezometra 770 mm), taj nivo je 28/8/2016 godine bio 64.58 metara iznad nivoa kote akumulacionog jezera.

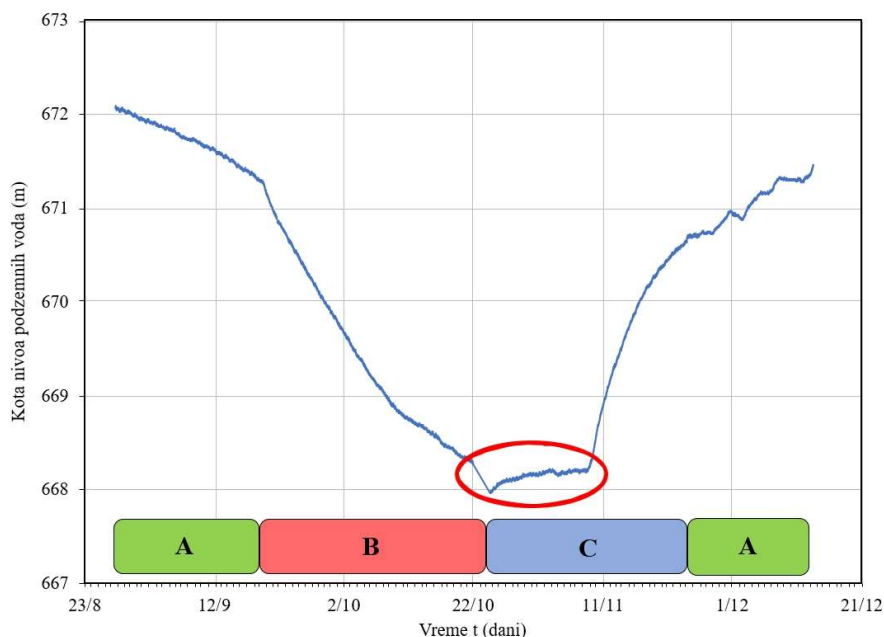
Na osnovu dvominutnih osmatranja kroz sve faze režima rada tunela došlo je do manjih oscilacija nivoa podzemnih voda u razmatranom pijezometru, ali izuzetno značajnih za analizu njihovih kvantitativnih karakteristika. Tokom trajanja faze A došlo je do sniženja nivoa od 0.76 m iako je tunel bio u funkciji. To je bio prvi pokazatelj da ovaj pijezometar usled specifičnih geoloških i hidrogeoloških uslova u kojima je izveden (pukotinska izdan) i visokog stanja podzemnih voda pokazuje zavisnost samo sa kotom gornje vode, gledano separatno samo kroz ovu fazu (slika IV.40).



Slika IV.40. Usporedni dijagram promene nivoa podzemnih voda u PP-1 i koti gornje vode akumulacionog jezera (interval osmatranja na 6 časova) kroz različite režime rada tunela: A, B i C [17], [40]

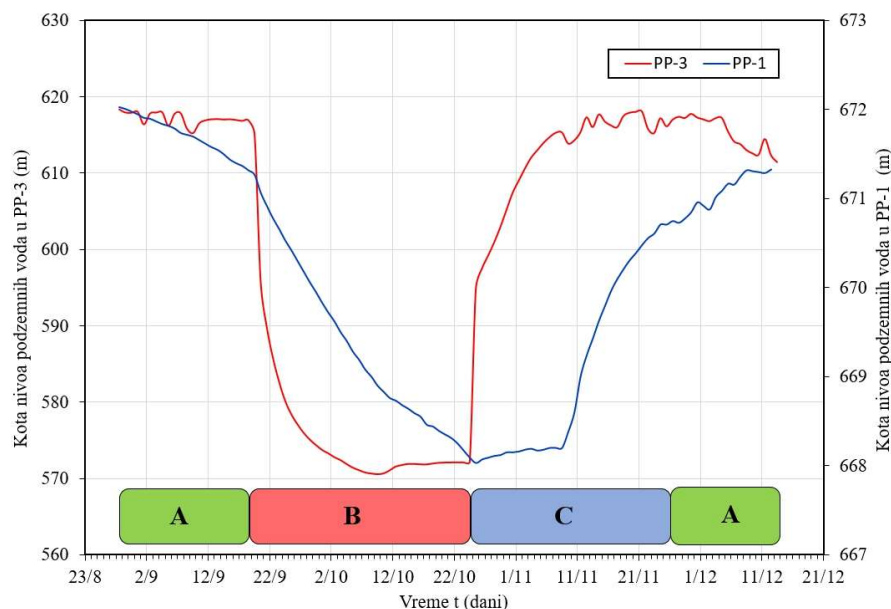
Tokom faze B dolazi do postepenog sniženja nivoa podzemnih voda izazvanih prestankom rada tunela, i kao posledica postepenog oslobađanja pritiska. Ovo sniženje je trajalo tokom cele faze B kada je registrovano ukupno sniženje nivoa podzemnih voda od 3.18 m. U toku faze C dolazi do postepenog

porasta nivoa za 0.51 m (slika IV.41), na osnovu čega bi površna analiza dobijenih rezultata mogla dovesti do donošenja pogrešnih zaključaka, tj. konstatacije da je ovaj porast nivoa direktna posledica ponovnog puštanja tunela u rad.



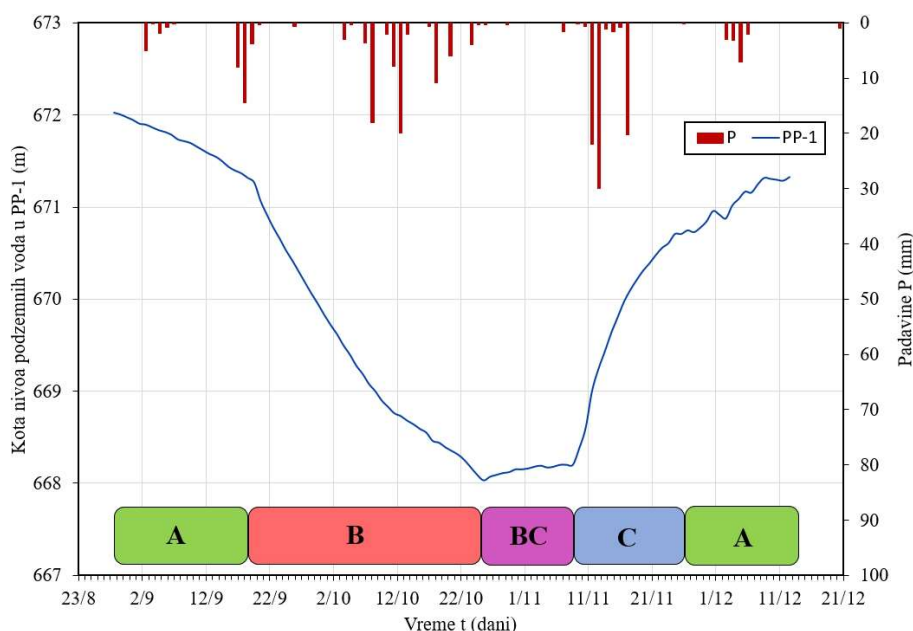
Slika IV.41. Oscilacije nivoa podzemnih voda u pijeziometru PP-1 (interval osmatranja na 2 minuta) kroz različite režime rada tunela: A, B i C (crveni krug označava blagi porast nivoa u toku faze C)

Mađutim, uporednom analizom razmatranog pijeziometra i pijeziometra PP-3 (slika IV.42) uočava se jasna međusobna zavisnost ova dva pijeziometra sa vidljivim vremenskim zakašnjenjem promene nivoa/stanja podzemnih voda (NPV) u pijeziometru PP-1 u odnosu na pijeziometar PP-3 (tokom faze C). Vremensko kašnjenje porasta NPV u pijeziometru PP-1 u odnosu na nivo podzemnih voda u PP-3 iznosi 16 dana. Ovakva dinamika promene stanja podzemnih voda izazvana je različitim pritiskom tunelske/akumulacione transportovane vode, koja ujedno i oslikava različit stepen inercije tunela i hidrogeološke sredine u zonama ova dva pijeziometra. Registrovani porast nivoa u PP-1 tokom trajanja faze C (na slici IV.66 označen crvenom bojom) može biti posledica „oporavka“ sistema nakon izazvanog naglog smanjenja pritiska usled pražnjenja tunela ili posledica padavina (slika IV.68) koje su zabeležene tokom trajanja faze B (8/10/2016) u vrednosti od 18 mm. Ove padavine koje su mogle izazvati porast nivoa kote gornje vode akumulacionog jezera (vremenski korak 1 dan) i nivoa podzemnih voda u pijeziometru PP-3 (vremenski korak 2 dana), usled specifičnih geoloških i hidrogeoloških uslova sredine koju oslikava pijeziometar PP-1 (pukotinska izdan, male produktivnosti formirana u okviru peščara, glinaca i konglomerata J_1^{2+3} starosti) indirektno su mogle uticati na porast NPV u pijeziometru PP-1. U prilog navedenoj konstataciji govori i činjenica da navedene padavine „kasne“ 15 dana u odnosu na promenu KGV, odnosno 16 dana u odnosu na NPV u PP-3.



Slika IV.42. Uporedni dijagram promene nivoa podzemnih voda u pijeziometrima PP-1 i PP-3 (interval osmatranja na 6 časova) kroz različite režime rada tunela: A, B i C [17], [40]

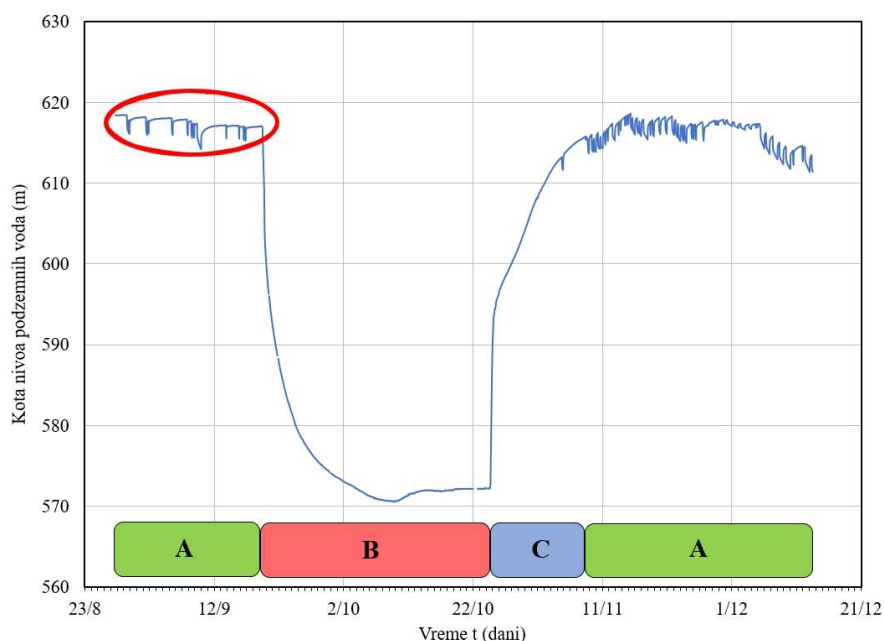
Prema tome, cela faza C u slučaju analize pijeziometra PP-1 morala je biti korigovana. Označeni deo faze C (slika IV.43) jednim delom oslikava fazu B koja je kao takva usvojena na ostalim mernim tačkama, samo što sa izvesnim vremenskim zakašnjenjem oslikava i dalje stanje pražnjenja hidrogeološke sredine. Shodno navedenom, Faza C je u slučaju analize kvantitativnih karakteristika podzemnih voda u pijeziometru PP-1 korigovana, tako što je označena podfaza BC (predstavlja prelaznu fazu) koja vremenski pripada fazi C ali oslikava zakasnelu reakciju stanja i uslova hidrogeološke sredine koji su karakteristični za fazu B (slika IV.43).



Slika IV.43. Formiranje nove faze - BC kod analize kvantitativnih karakteristika podzemnih voda u pijeziometru PP-1 sa prikazom uticaja padavina na promenu podzemnih voda u PP-1 (interval osmatranja 1 dan) kroz različite režime rada tunela: A, B i C

3. Pijezometar PP-3

Kao što je već napomenuto, istovetna podela faza u pijezometrima PP-3 i PP-1 nije bilo moguće formirati jer u zonama sredine koje reprezentuju navedeni pijezometri nije vršeno punjenje hidrogeološke sredine istom dinamikom. Kota dna tunela u ovoj zoni nalazi na 552 mm, pa se može konstatovati da je minimalni osmotreni nivo podzemnih voda u ovom pijezometaru 14 metara iznad kalote tunela. Ovo ukazuje da osmotreni nivo odgovara nivou prirodnog stanja podzemnih voda bez uticaja voda koje se transportuju tunelom pod pritiskom. Nivo podzemnih voda pri ustaljenom radnom režimu tunela, nalazi se 11 metara iznad kote nivoa akumulacionog jezera, dok se u periodu istražnjelog tunela (uzet minimalni osmotreni nivo podzemnih voda), u fazi B, nivo registruje ispod nivoa akumulacionog jezera i to 35 metara [40]. Već u prvoj fazi osmatranja (faza A) može se uočiti da se u ovoj zoni dešava intenzivna interakcija podzemnih i transportovanih tunelskih voda. Svaka promena pritiska koja se dešava u samom hidrotehničkom tunelu usled rada hidroelektrane, detektuje se i na ovom pijezometru (slika IV.44).

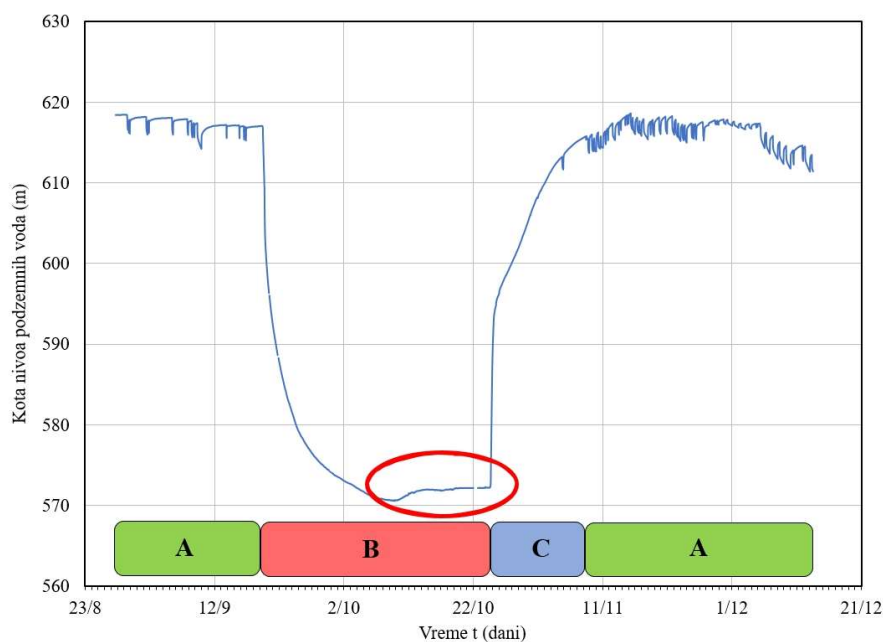


Slika IV.44. Oscilacije nivoa podzemnih voda u pijezometru PP-3 (interval osmatranja na 2 minuta) kroz različite režime rada tunela: A, B i C, sa posebnim akcentom na fazu A

To je bio prvi pokazatelj da se u ovom delu hidrogeološke sredine koju oslikava pijezometar PP-3 dešava izuzetno dinamičan proces utiskivanja transportovanih/akumulacionih voda, odnosno postoji direktan uticaj veštačkog objekta na prirodnu sredinu.

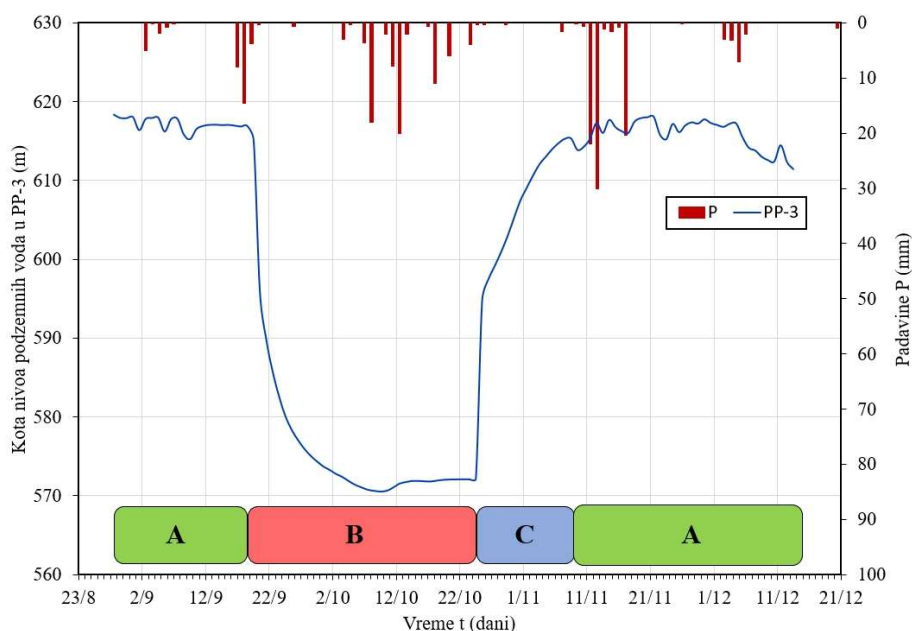
U fazi B već pri samom procesu ispuštanja vode iz tunela dolazi do naglog oslobađanja pritiska i u samoj hidrogeološkoj sredini, što izaziva velika sniženja nivoa podzemnih voda u ovom pijezometru. Tokom celog perioda kada je tunnel bio van funkcije došlo je do ukupnog sniženja nivoa od 43.03 metra. S obzirom na već utvrđeno početno stanje kote gornje vode, odnosno postignutog radnog pritiska koji je iznosio nešto više od 4 bara, odnosno 42 m vodenog stuba, očigledno je da se hidrogeološka sredina u ovoj zoni nalazi u direktnoj vezi sa tunelskom vodom. Međutim, važno je naglasiti da se i u ovom pijezometru, u periodu kada je tunnel bio van funkcije zabeležen porast nivoa podzemnih voda od oko 1.5 m. Ovaj porast NPVa može biti posledica „povratka” hidrogeološke sredine u svoje prirodno stanje (usled rasterećenja pritiska tunelske vode) ali je verovatnije posledica pojave kišnog perioda registrovanog 8/10/2016 (18 mm) usled čega je došlo do porasta nivo

podzemnih voda već nakon vremenskog pomeraja od 2 dana. Dodatna kiša, sa većim padavinama od 12/10/2016 (20 mm) i 17/10/2016 (11 mm) doprinele su konstantnom porastu NPV koji je ukupno u ovom periodu iznosio 1.5 metara (slika IV.45, slika IV.46)



Slika IV.45. Oscilacije nivoa podzemnih voda u pijeziometru PP-3 (interval osmatranja na 2 minuta) kroz različite režime rada tunela: A, B i C, sa posebnim akcentom na fazu B

Ovako brza propagacija padavina u zoni pijeziometra PP-3 dodatno ukazuje da se radi o zoni u kojoj se nalaze izuzetno kartsifikovani krečnjaci, čiji se formirani karstni kanali većih dimenzija brzo pune, sve do određene visine na 11 metara kada prestaje dejstvo tunela u zoni ovog pijeziometra.

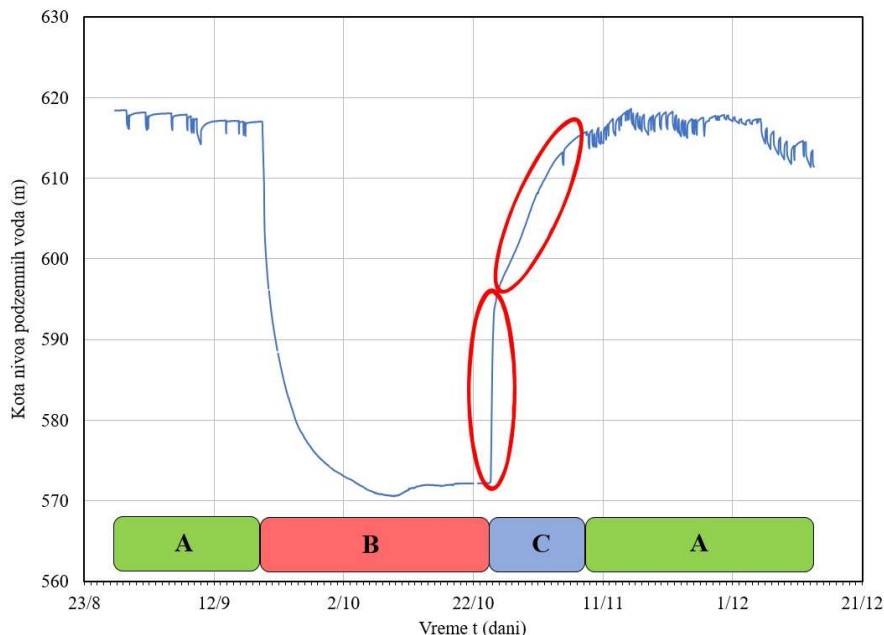


Slika IV.46. Uticaj padavina na promenu nivoa podzemnih voda u PP-3 (interval osmatranja 1 dan) kroz različite režime rada tunela: A, B i C

Prestanak dejstva postignutog pritiska u zoni navedenog pijezometra pri izdizanju vodenog stuba od 43 metra posledica je pre svega radnog pritiska koji stvara tunel.

Faza C oslikava fazu ponovnog punjenja tunela. U ovom pijezometru faza punjenja je trajala ukupno 18 dana i za ovaj period došlo je do ukupnog porasta nivoa za 42.12 metara, što odgovara vrednosti sniženja koje se desilo u fazi B. To govori da je celom sistemu, punjenju tunela i hidrogeološke sredine bilo potrebno tačno duplo manje vremena nego u periodu pražnjenja koji je trajao 36 dana. U periodu punjenja tunela i hidrogeološke sredine pod uticajem pritiska transportovane tunnelske vode jasno se može videti različita dinamika punjenja (slika IV.47).

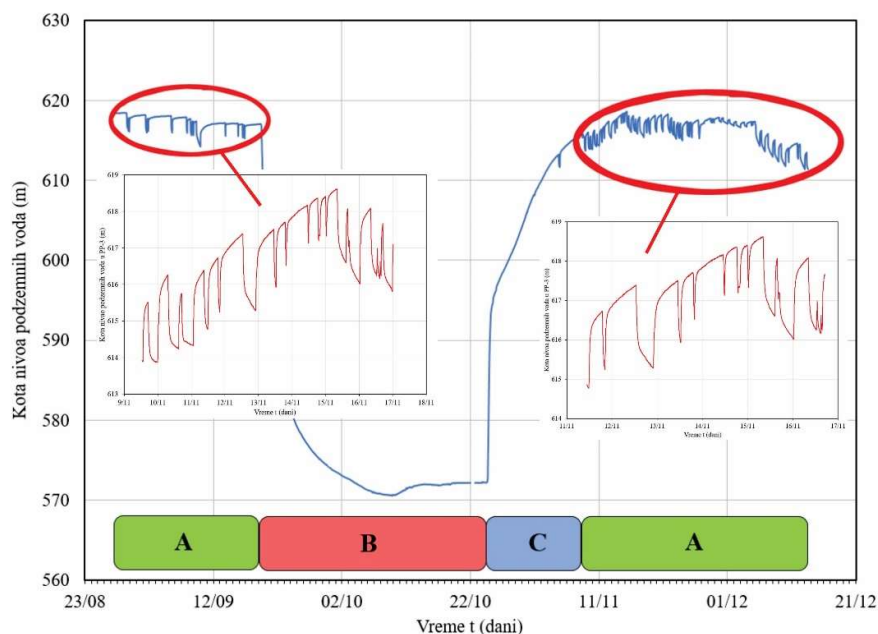
Za prva dva dana punjenja (24/10/2016 – 26/10/2016) došlo je porasta nivoa podzemnih voda u PP-3 za 25.36 metara, dok je tokom preostalih 16 dana punjenja hidrogeološke sredine nivo porastao za 16.78 m. To dodatno ukazuje na izuzetno veliku karstifikaciju terena u kome je izveden ovaj pijezometar, posebno intenzivnu zonu koja se nalazi u zoni samog tunela i delu stenske mase koja se nalazi oko 20 metara iznad tunela. Međutim, i ostalih 50 metara nadsloja koji se nalazi iznad tunela najverovatnije spada u dosta karstifikovanu zonu.



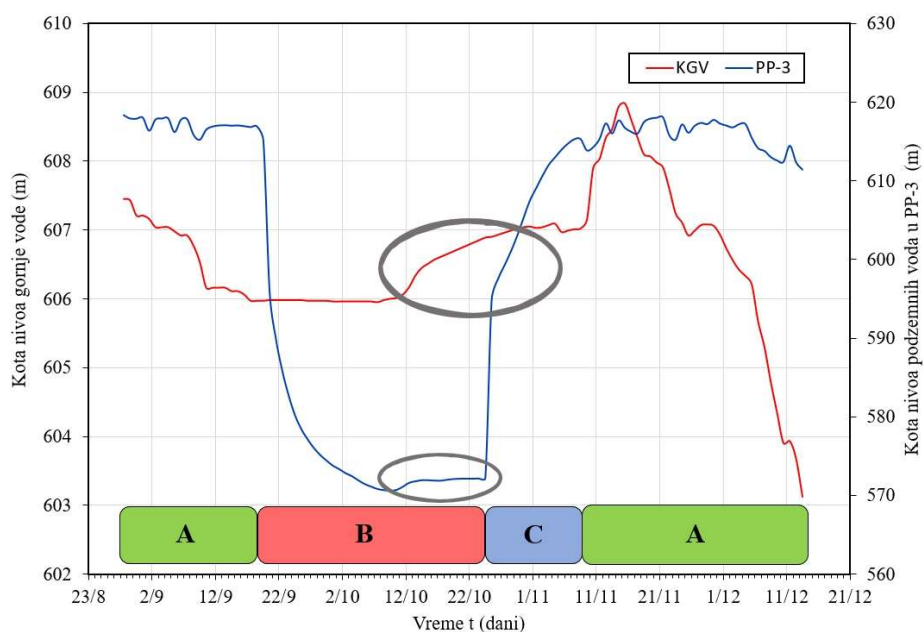
Slika IV.47. Oscilacije nivoa podzemnih voda u pijezometru PP-3 (interval osmatranja na 2 minuta) kroz različite režime rada tunela: A, B i C, sa posebnim akcentom na fazu C

Nakon postizanja početnog radnog pritiska u hidrogeološkoj sredini i stabilizacije nivoa došlo je i do uspostavljanja ponovnog radnog režima tunela (faza A). U ovoj fazi dolazi do ponovnog rada hidroelektrane i svaki rad hidroelektrane, ispuštanjem vode na turbinama izaziva opadanje pritiska i konstantne oscilatorne promene nivoa podzemnih voda (slika IV.48) [40]. Ova faza A, na prvi pogled može da ukaže da dolazi do različitih oscilacija nivoa podzemnih voda, međutim izdvajanjem segmenta od par dana u obe ove faze i analizom dvominutnih podataka jasno se uočava da je u pitanju ista dinamika oscilacija koje nastaju usled oslobađanja pritiska (sniženje nivoa) i porasta pritiska (porast nivoa) do postizanja tačke stabilizacije (slika IV.48).

S obzirom da je ovaj pijezometar pokazao postojanje aktivne hidrauličke zavisnosti tunela pod pritiskom u hidrogeološkoj sredini, kroz sve faze rada tunela, nivo podzemne vode je direktno i pod uticajem nivoa akumulacionog jezera (KGV) (slika IV.49).



Slika IV.48. Oscilacije nivoa podzemnih voda u pijeziometru PP-3 (interval osmatranja na 2 minuta) tokom faze A pod uticajem rada hidrotehničkog tunela [17]



Slika IV.49. Uporedni dijagram promene nivoa podzemnih voda u PP-3 i kote gornje vode akumulacionog jezera (interval osmatranja na 6 časova) kroz različite režime rada tunela: A, B i C

Tokom trajanja faze B jasno se može videti kako padavine utiču na porast nivoa akumulacionog jezera i da se taj porast jasno vidi u gotovo istom periodu na nivou podzemnih voda u PP-3 (slika IV.49).

4. Pijezometar PP-4

Iako je ovaj pijezometar označen kao potencijalno nefunkcionalan, njegov položaj na trasi tunela je izuzetno značajan jer odgovara stacionaži tunela 7+380 m gde se u blizini nalazi i vodostan, ali i najznačajnije isticanje podzemnih voda u ispražnjen tunel na stacionaži 7+350 m sa konstantnim protokom od oko 30 l/s. Jedini segment kvantitativne analize koja bi mogla da bude pokazatelj potencijalnih promena jeste period od prvih 14 dana osmatranja kada je došlo do opadanja nivoa za 0.53 metra. To može ukazati da je usled razrade pijezometra i izdavanjem određenje zapermine vode nivo malo opao. U prilog ovakvoj analizi ide i to da u datom periodu, kao i prethodnom periodu od 10 dana nije bilo značajnijih padavina. Međutim, nakon 14-og dana dolazi do naglog porasta nivoa od 12 metara i to za samo 4 dana. Međutim, u ovom periodu i 3 dana pre 4/11/2016 ukupno je palo 55 mm kiše, što je svakako još jedan dokaz moguće nefunkcionalnosti ovog pijezometra i potvrda da se isti ne može uključiti u analizu kao pouzdan. Promena stanja nivoa podzemnih voda najverovatnije zavisi od padavina koje se izluče u njegovoj užoj slivnoj zoni.

2.2.1.3. Analiza rezultata merenja sumarnih gubitaka u šahti tunelske zatvaračnice

Analizom dobijenih vrednosti sumarnih gubitaka po stepenicama držanja nivoa jasno se uočava trend smanjenja gubitaka na svakoj narednoj stepenici držanja nivoa, dok je na poslednjoj (petoj) stepenici registrovan porast nivoa vode u zatvaračnici [40].

Ovaj porast nivoa vode u šahti zatvaračnice je najverovatnije posledica registrovanog dotoka vode iz geološke/hidrogeološke sredine. Trend smanjenja gubitaka predstavlja posledicu smanjenja pritiska u tunelu, ali i posledicu priliva/dotoka voda u hidrotehnički tunel iz geološke/hidrogeološke sredine.

Na prvoj stepenici merenja koja je ujedno i najmerodavnija za gubitke u pogonskom stanju tunela (radni režim), sumarni gubitak iznosi 21.53 l/s posmatrano u periodu od prvih 38 minuta merenja, odnosno stabilizacije nivoa vode u uslovima zatvorenog tunela. Za ceo period merenja gubitaka na prvoj stepenici (58 minuta) registrovano je sniženje nivoa od 0.89 metara, odnosno sumarni gubitak je iznosio 19.23 l/s.

Tokom druge stepenice držanja nivoa u uslovima zatvorenog tunela za isticanje, došlo je do promene nivoa i sniženja od 0.74 metara.

Na trećoj stepenici, sniženje je iznosilo 0.38 m a na četvrtoj stepenici razlika nivoa na početku i na kraju merenja bila najniža i iznosila je 0.12 metara.

Na petoj stepenici držanja nivoa u tunelskoj zatvaračnici, došlo je do inverzije u pogledu promene nivoa u odnosu na prethodne stepenice, odnosno porasta nivoa u odnosu na početno merenje na petoj stepenici u vrednosti od 0.0008 m. Kao posledica toga, sumarni gubitak je iznosio -0.19 l/s, odnosno registrovan je dotok u tunel. To je ukazalo da već u početnoj fazi pražnjenja tunela imamo i dotok iz geološke/hidrogeološke sredine, koji tek u petoj stepenici postaje veći u odnosu na gubitke.

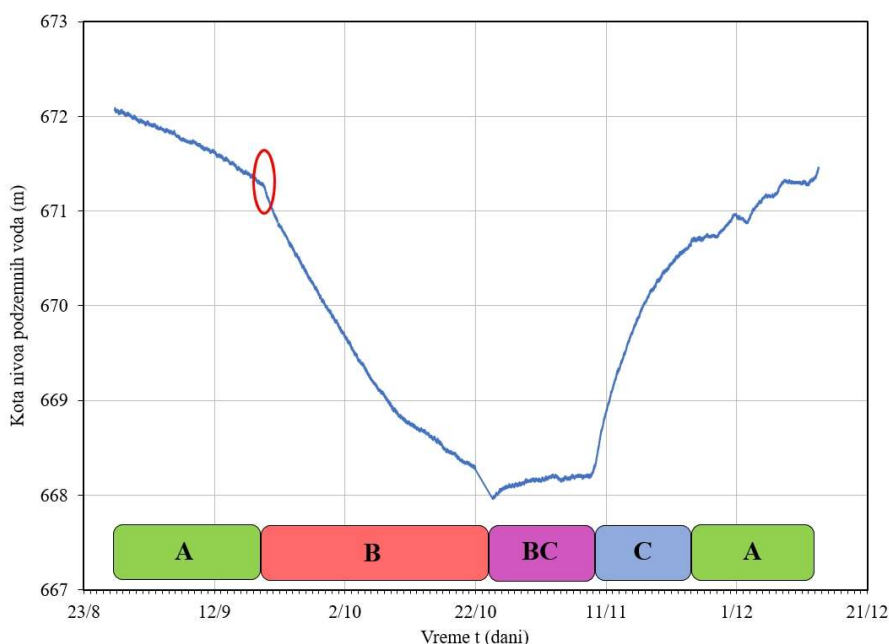
2.2.1.4. Analiza rezultata merenja promene nivoa podzemnih voda u pijezometrima za vreme merenja sumarnih gubitaka

Analiza promene nivoa podzemnih voda u pijezometrima PP-1 i PP-3 izvršena je na osnovu podataka koji su osmotreni samo u periodu od 9:00 do 16:00 časova (19/9/2016), odnosno u periodu merenja

sumarnih gubitaka [40]. Osnovni cilj uporedne analize rezultata osmotrenih nivoa u šahti tunelske zatvaračnice i pijezometrima bilo je utvrđivanja stepena interakcije geološke/hidrogeološke sredine i tunela u periodu kada dolazi do najvećeg oslobađanja pritiska transportovanih tunelskih voda na podzemne vode.

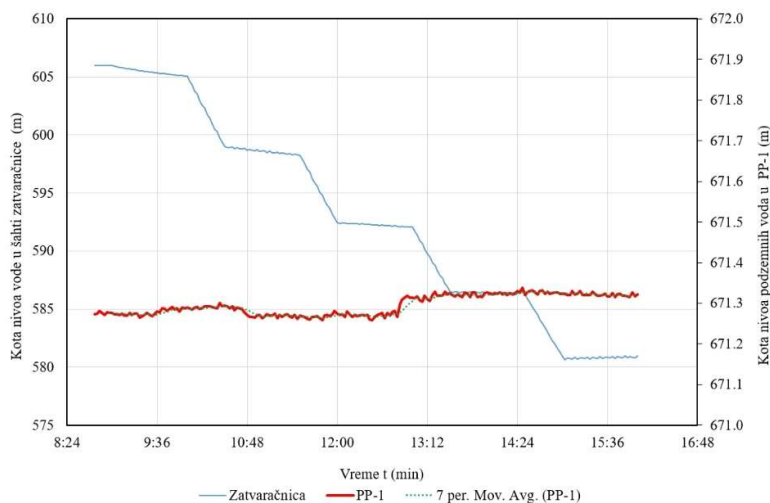
Pijezometar PP-1

Na početku merenja sumarnih gubitaka (19/9/2016, 9:00 h) (slika IV.50), nivo podzemnih voda u pijezometru PP-1 iznosio je 98.64 m, dok je na kraju merenja sumarnih gubitaka nivo iznosio 98.59 m [40].



Slika IV.50. Segment merenja sumarnih gubitaka u odnosu na ceo osmatrački period promene nivoa podzemnih voda u pijezometru PP-1 označen crvenom bojom

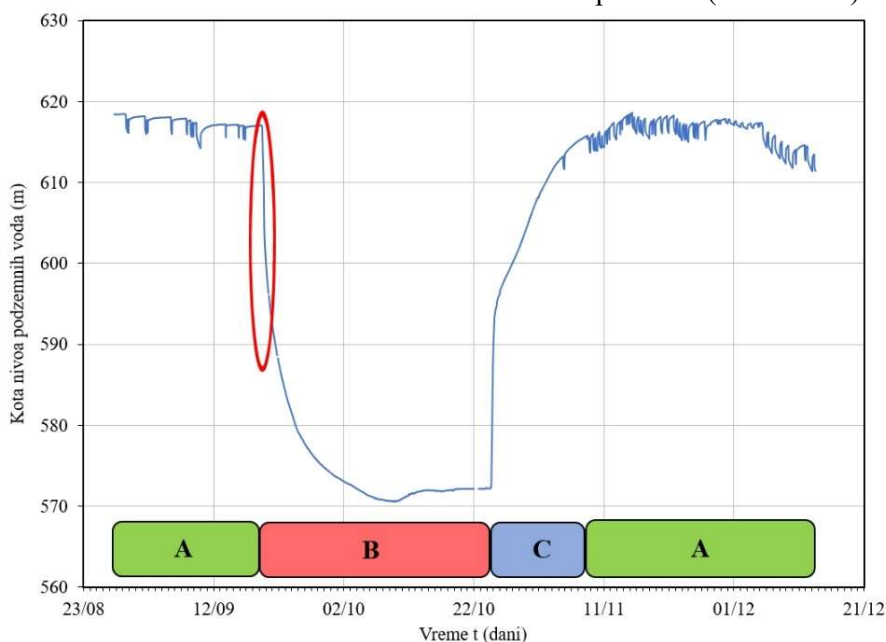
Ukupno sniženje nivoa u ovom pijezometru tokom merenja sumarnih gubitaka i spuštanja nivoa u šahti tunelske zatvaračnice (oslobađanje pritiska) iznosilo je $\Delta H = 0.05$ m (slika IV.51). Ovakav dosta stabilan hidraulički režim ukazuje da tokom merenja sumarnih gubitaka u ovoj zoni nije došlo do značajnijih promena. Komparativna analiza promene pijezometarskog nivoa i sniženja nivoa vode u zatvaračnici ukazuju na odsustvo hidrauličke zavisnosti razmatranog pijezometra sa tunelom. Ovakva konstatacija može biti posledica objektivnog odsustva hidrauličke veze šire zone u početnom delu tunela, gde je izveden ovaj pijezometar (stacionaža 1+400 m), odnosno dobrog stanja betonske obloge tunela (dobre izolovanosti) i/ili dosta visokog stanja podzemnih voda (period kašnjenja u odnosu na trenutno rasterećenje unutrašnjeg pritiska) [40].



Slika IV.51. Promena nivoa vode u zatvaračnici i pijeozmetru PP-1 za vreme merenja sumarnih gubitaka

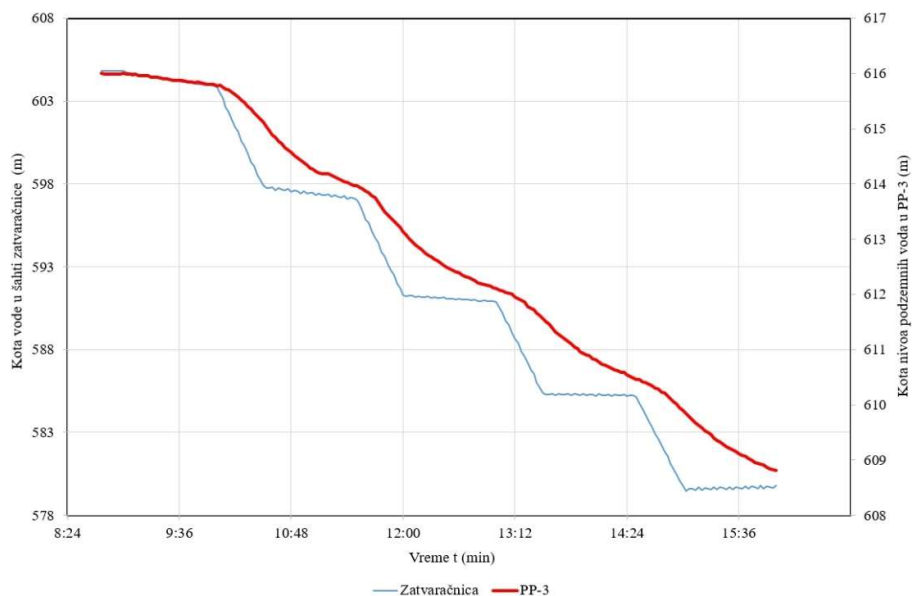
Pijeozometar PP-3.

Početni nivo podzemnih voda izmeren u pijeozmetru PP-3 u 9:00 h iznosio je 14 metara, dok je na kraju merenja sumarnih izmereni nivo bio na 21.19 metara od površine (slika IV.52).



Slika IV.52. Segment merenja sumarnih gubitaka u odnosu na ceo osmatrački period promene nivoa podzemnih voda u pijeozmetru PP-3 označen crvenom bojom

Ukupno registrovano sniženje nivoa tokom ovog testa u PP-3 iznosilo je $\Delta H = 7.19$ m (slika IV.53). Iako je statički nivo u ovom pijeozmetru na samom početku merenja sumarnih gubitaka (pod pritiskom) bio za 10.95 metara iznad kote gorenje vode akumulacionog jezera, odnosno zatvaračnice, na kraju izvedenih merenja nivo vode u pijeozmetru je bio za 28.77 m viši od nivoa vode u samoj šahti zatvaračnice.



Slika IV.53. Promena nivoa vode u zatvaračnici i pijeziometru PP-3 za vreme merenja sumarnih gubitaka [17]

Na uporednom dijagramu jasno se uočava kontinualni pad u pijeziometru u odnosu na kotu nivoa vode u zatvaračnici. Neophodno je naglasiti da čak i na prvoj stepenici dolazi do pada nivoa vode PP-3 za 0.22 m, dok je u zatvaračnici izmereno 0.92 m, za isti period, što ukazuje na direktnu interakciju voda iz tunela i geološke sredine u zoni pijeziometra PP-3. Tokom prvog ispuštanja nivoa, uočava se zakašnjenje reakcije u pijeziometru na minutnom nivou, tako da je za 6 m ostvarenog sniženja u zatvaračnici, tokom 30. minutnog ispuštanja vode iz tunela, došlo do sniženja u PP-3 za 0.22 m. Međutim strm trend pada nivoa vode u PP-3 i dalje se nastavlja i pored činjenice da je došlo do prekida u ispuštanju iz tunela, što je posledica indukovane inercije voda u geološkoj sredini i težnje izjednačavanja pritiska podzemnih voda sa pritiskom vode u tunelu. Strmi trend se nastavlja sve do polovine prve stepenice kada dolazi do ublaženja trenda pada pijeziometarskog pritiska u PP-3. Ovakvo stanje ukazuje na priliv voda iz geološke sredine u tunnel već na prvoj stepenici, stoga su računski gubici iz tunela verovatno značajno veći u odnosu na registrovanu vrednost, imajući u vidu kontinuirani priliv voda u tunnel u zoni pijeziometra PP-3. Slični trend krive imaju i sledeće stepenice, s tim što se strm trend pada nivoa vode u PP-3 postepeno vremenski skraćuje, kao posledica sve većeg priliva voda u tunnel iz hidrogeološke zone koju reprezentuje PP-3.

Tabela IV.37: Sniženje nivoa u šahti tunelske zatvaračnice i pijeziometru PP-3 po stepenicama merenja sumarnih gubitaka

Stepenica merenja	Gubitak u zatvaračnici (l/s)	Sniženje u zatvaračnici Δh_z (m)	Sniženje u PP-3 Δh_{pp-3} (m)	Разлика $\Delta h_{h_{pp3}-h_z}$ [m]
“0” – stac.	0.00	0.01	0.00	11.19
I	19.23	0.92	0.22	11.89
$\Delta 1$ ispust	-	6.00	0.67	17.22
II	16.07	0.84	1.15	16.92
$\Delta 2$ ispust	-	5.75	0.83	21.84

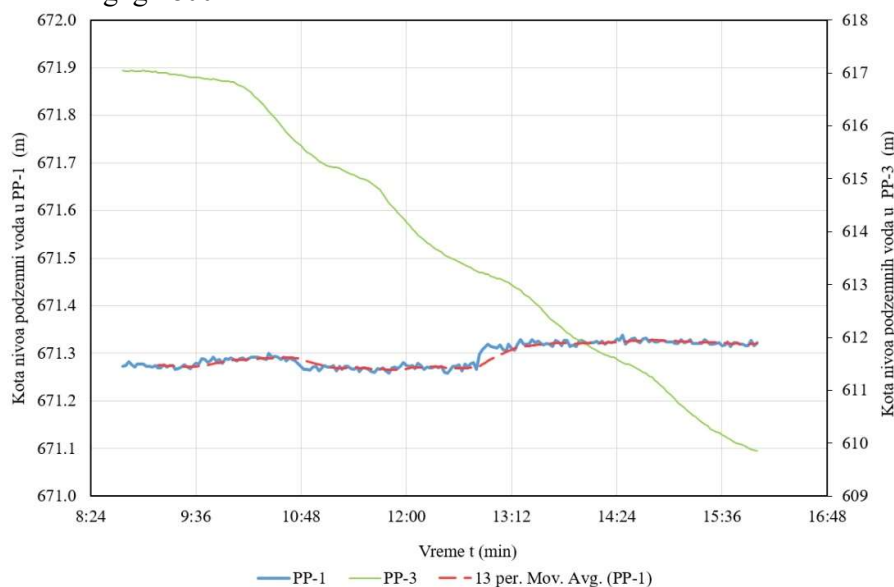
III	8.29	0.40	1.04	21.21
Δ 3 ispust	-	5.52	0.54	26.19
IV	2.65	0.22	1.10	25.31
Δ 4 ispust	-	5.37	0.57	30.12
V	-0.19	-0.01	1.09	29.02

Karakteristično je da od druge pa do pete stepenice razlika u nivou vode u pijeziometru PP-3 zadržava relativno konstantnu vrednost (veću od 1 m), dok razlika u sniženju u zatvaračnici se smanjuje, što takođe ukazuje na činjenicu da najverovatnije postoji priliv voda u tunel iz geološke sredine koji dospeva upravo iz ove zone.

Promene nivoa podzemnih voda u pijeziometru PP-3 pokazuje izuzetno visoku zavisnost sa nivoima u zatvaračnici, gde se svako držanje nivoa u zatvaračnici kao i svaki ispust jasno odražava na promene nivoa u ovom pijeziometru.

Komparativna analiza pijeziometara PP-1 i PP-3

Uporedna analiza razmatrana dva pijeziometra PP-1 i PP-3 tokom perioda merenja sumarnih gubitaka ukazuje na potpuno odsustvo njihove međusobne hidrauličke zavisnosti (slika IV.54). Međutim, izuzetno kratak vremenski interval (7 časova), u okviru kog je vršena ova analiza mogla je da ukaže samo na hidrauličku zavisnost tunela i pojedinačno pijeziometara, s obzirom da su ova dva pijeziometra udaljeni jedan od drugog 2800 metara.



Slika IV.54. Promena nivoa podzemnih voda u pijeziometrima PP-1 i PP-3 za vreme merenja sumarnih gubitaka

2.2.1.5. Analiza rezultata merenja nivoa i proticaja vode na kanalu izlazne građevine tunela

Praćenje promene stanja nivoa voda koje se ispušta preko kanala izlazne građevine započeto je 21/9/2016., odnosno 2 dana nakon zatvaranja zatvarača i prestanka funkcionisanja tunela. Tokom praćenja stanja promene nivoa vode odnosno praznjenja tunela, iz tehničkih razloga došlo je do

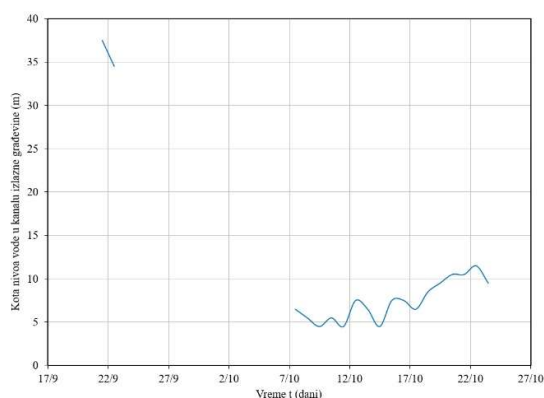
preusmeravanja voda koje se oceduju iz tunela ka ispustu u Berilovcu gde nije bilo moguće izvršiti merenja. Tako da je period osmatranja podeljen u dva dela:

- na početku (nakon otvaranja vrata tunela iz ulazne građevine) 21/9/2016-23/9/2016
- nakon ponovnog preusmeravanja toka u kanal izlazne građevine do zatvaranja tunela (7/10/2016 – 24/10/2016) [40]

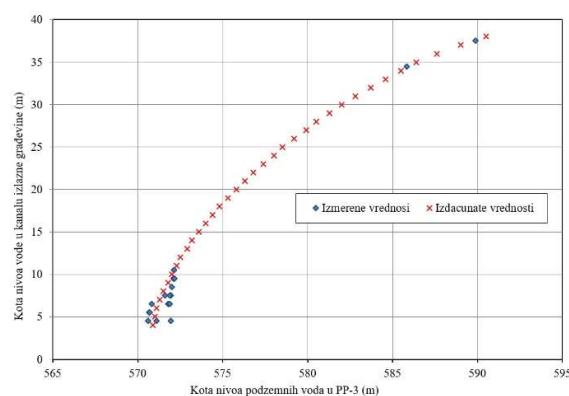
Prvi period pražnjenja tunela na kanalu izlazne građevine oslikava recesione uslove nakon dva dana od zatvaranja tunela, odnosno pražnjenje voda iz stenske mase, kao posledica rasterećenja pritiska u tunelu. Vode koje se dreniraju imaju karakter delom podzemnih voda kao i voda koje su utisnute u stensku masu u uslovima kada tunel radi pod pritiskom. Dijagram pražnjenja ukazuje na relativno brze recesione uslove što je posledica dobre hidrauličke veze voda iz stenske mase sa akumulacionim/tunelskim vodama. Nakon perioda relativno intenzivne recesije dolazi do stabilizacije nivoa, odnosno stabilizacije protoka (isticanja iz tunela), sa pojavom različitih pikova, koji mogu ukazivati na različite hidrauličke uslove pražnjenja voda iz stenske mase odnosno različitih sekcija u tunelu [40].

Kada je u pitanju drugi period osmatranja pražnjenja tunela na kanalu izlazne građevine, odnosno završni period pre ponovnog zatvaranja tunela i ponovnog puštanja u rad, može se konstatovati relativno stabilan režim pražnjenja tunela sa trendom porasta koji je posledica promene stanja podzemnih voda, odnosno priliva novoinfiltriranih voda.

Iz razloga nedostataka podataka u dosta značajnom osmatračkom periodu od 23/9/2016 do 7/10/2016 (ukupno 14 dana) i početnog momenta kada je naglo izašla voda na kanal, što je samo podatak vezan za taj trenutak, a ne i dinamiku pražnjenja hidrogeološke sredine, osmotreni 2-minutni podaci nivoa voda u kanalu izlazne građevine svedeni su na dnevni osmatrački interval sa ciljem dobijanja bolje analize (slika IV.55).



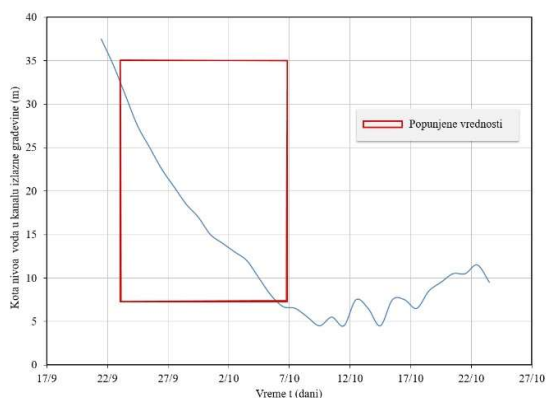
Slika IV.55. Nivogram na kanalu izlazne građevine (intervan osmatranja 1 dan)



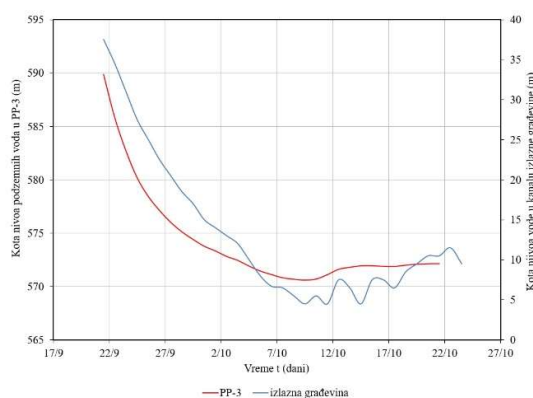
Slika IV.56. Dijagram izmerenih i izračunatih vrednosti vodostaja na kanalu izlazne građevine i pijeziometru PP-3

Analizom svih prikupljenih podataka u toku celog istraživačkog perioda, može se konstatovati da iz zone pijeziometra PP-3 dotiče najveća količina vode u tunel iz hidrogeološke sredine i da se shodno toj činjenici ovaj osmatrački objekat može smatrati pouzdanim za potrebe popunjavanja nedostajućih podataka na kanalu izlazne građevine. Na osnovu podataka o promeni nivoa podzemnih voda u PP-3 i osmotrenih podataka na kanalu izlazne građevine utvrđena je dobra međusobna zavisnost/kriva (slika IV.56) koja je bila osnova za dalji postupak popunjavanja nedostajućih podataka (formiranja nove krive) i njihove simulacije. Za formiranje krive zavisnosti i dalje proračune korišćeni su dnevni podaci o nivoima podzemnih voda u PP-3 ali i nivoima izmerenim na kanalu izlazne građevine.

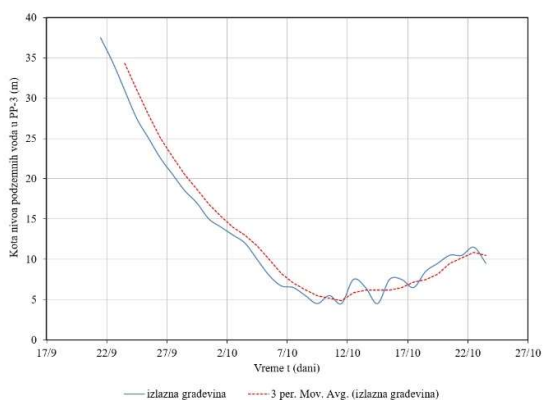
Na osnovu formirane nove krive popunjen je nedostajući niz podataka koji je simulirao period pražnjenja koji bi bio registrovan na izlaznoj građevini i tako omogućio sagledavanje realne slike isticanja podzemnih voda u tunnel (slika IV.57). Ovakav način simuliranja procesa pražnjenja hidrogeološke sredine u periodu remonta tunela pokazalo je dosta dobru korelacionu vezu realnih podataka nivoa podzemnih voda u piježometru PP-3 i simuliranih podataka na kanalu izlazne građevine (slika IV.58), sa koeficijentom determinacije od $R^2=0.96$.



Slika IV.57. Popunjene vrednosti vodostaja na kanalu izlazne građevine



Slika IV.58. Dijagram realnih vrednosti NPV u PP-3 i popunjenog niza na kanalu izlazne građevine (interval 1 dan)



Slika IV.59. Korekcija celog perioda (osmotrenog i izračunatog) vrednosti vodostaja na kanalu izlazne građevine sa osrednjavanjem svakog 3. podatka

Velike oscilatorne promene nivoa u kanalu izlazne građevine u periodu kada su vršena merenja (period 7/10/2016 – 24/10/2016) i odsustvo istih u periodu kada nije bilo merenja (simulacija) posledica su čestih prolazaka traktora kroz izlaznu građevinu, koji su izazivali promene u nivoima na samom kanalu. Iz tog razloga izvršena je korekcija osmotrenih i izračunatih podataka osrednjavanjem svakog trećeg podatka sa ciljem anuliranja ovog uticaja (slika IV.59).

Nakon osrednjavanja vrednosti i analiziranjem dobijenog nivograma na kanalu izlazne građevine može se konstatovati da je nakon perioda recesije koji je trajao do 12/10/2016 došlo do porasta nivoa što je ukazalo na porast dotoka u tunnel iz hidrogeološke sredine usled novoinfiltriranih voda formiranih u toku trajanja kišnog perioda od 8/10/2016-24/10/2016 (do kraja trajanja faze B).

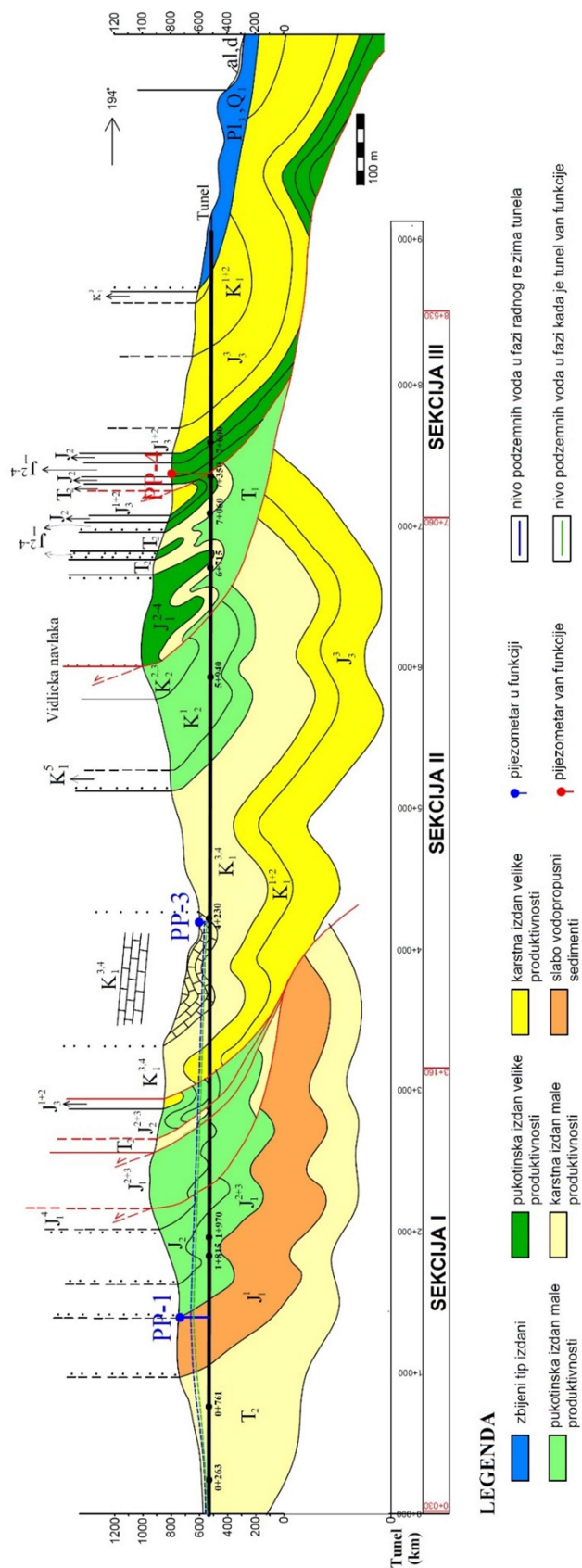
Merenjem proticaja na izlaznoj građevini dodatno je ukazalo da je 22/10/2016 došlo do porasta proticaja u odnosu na 15/10/2016 za 2.35 l/s, što je još jedna potvrda povećanja dotoka voda u ispražnjen tunel.

2.1.6. Analiza rezultata merenja veličine dotoka u ispražnjen tunel

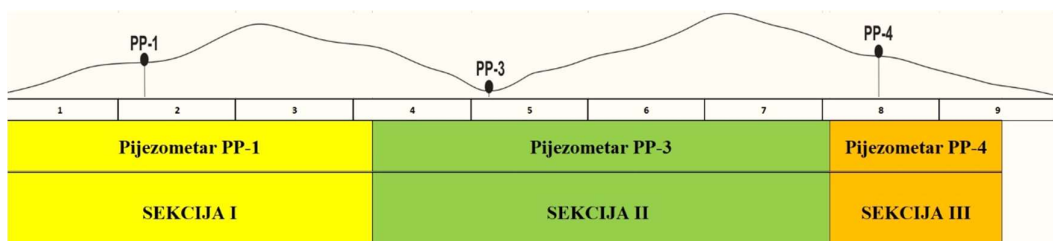
Na osnovu rezultata merenja proticaja na postavljenim mernim profilima, unutar tunela definisane su 3 Sekcije (tabela IV.38) kroz koje je vršena sva dalja analiza dotoka voda koje usled oslobođenog pritiska i gravitacionog pražnjenja hidrogeološke sredine u tunel. Svako formiranoj sekciji poziciono odgovara i jedan pijezometar koji je u značajnoj meri doprineo upotpunjavanju analize dotoka voda u tunel (slika IV.60).

Tabela IV.38: Prikaz položaja prijezometara sa prostornom pripadnošću određenim sekcijama

	Stacionaža od - do	Pijezometar	Stacionaža pijezometra
Sekcija I	0+030 – 3+160	PP-1	1+400
Sekcija II	3+160 – 7+060	PP-3	4+200
Sekcija III	7+060 – 8+530	PP-4	7+380



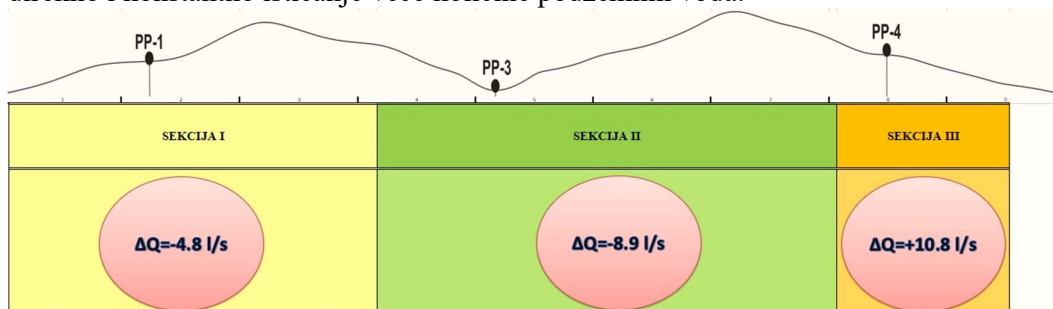
Slika IV.60. Geološki profil tunela sa prikazom sekcija merenja dotoka i osmatračkim piezometrima [17]



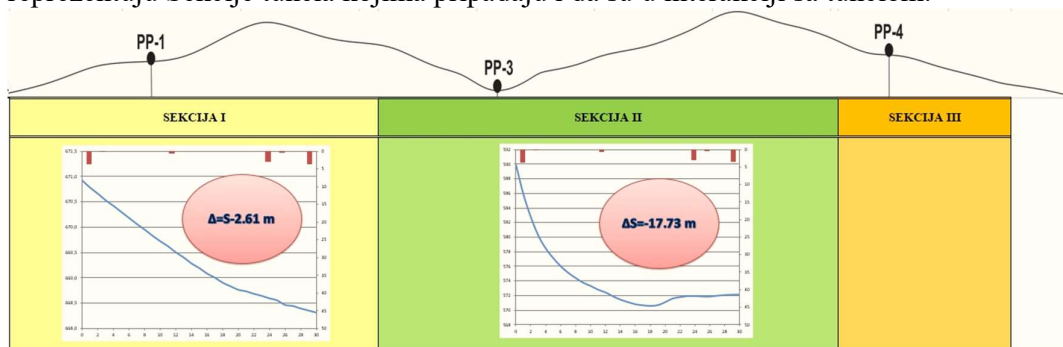
Slika IV.61. Skica profila tunela sa prikazanim sekcijama i odgovarajućim piježometrima

U cilju detaljnije analize doticaja voda u ispražnjen tunel merenja izvršena kroz tri vremenske serije posmatrane su kroz *ceo period* ali i dva odvojena perioda: period od prve do druge vremenske serije – *I period* (21/9/2016 – 7/10/2016 - trajanje 16 dana) i period druge i treće serije – *II period* (7/10/2016 – 21/10/2016 – trajanje 15 dana). Iako je faza B trajala ukupno 35 dana, period merenja dotoka u tunel bio je kraći 4 dana i trajao je 31 dan iz razloga tehničke prirode, tj. uslova kada je bilo moguće ući u tunel.

Za *ceo period* (slika IV.62), došlo je do smanjenja dotoka vode iz geološke/hidrogeološke sredine u tunel i u prvoj i drugoj Sekciji, dok u Sekciji III dolazi do povećanje dotoka. U Sekciji I i Sekciji II dolazi do ocedivanja hidrogeološke sredine u tunel, dok u Sekciji III imamo povećanje dotoka. Očekivano je bilo smanjenje dotoka/priliva u tunel kroz *ceo period* i kroz sve Sekcije, međutim u Sekciji III povećanje dotoka je potpuno opravdano zonom na stacionaži 7+350 m gde u tunelu imamo direktno i konstantno isticanje veće količine podzemnih voda.

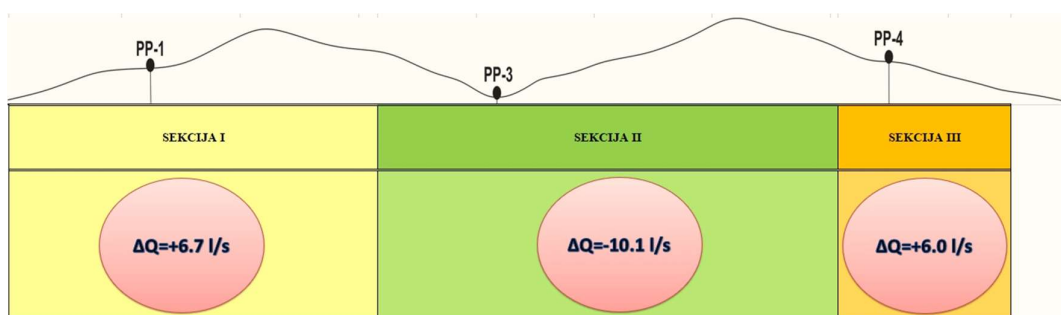
Slika IV.62. Promene vrednosti dotoka kroz Sekcije za *ceo period* (21/9/2016 – 21/10/2016)

Uporedna analiza promene veličine dotoka i promene nivoa podzemnih voda u piježometrima koji reprezentuju određenu Sekciju, posmatrano kroz *ceo period* ukazuje da je u Sekciji I došlo do ukupnog sniženja nivoa u PP-1 za 2.61 m, dok je u piježometru PP-3 došlo je do sniženja nivoa od 17.73 m (slika IV.63). Ovakava analiza je bila smo potvrda da piježometri PP-1 i PP-3 dosta dobro reprezentuju Sekcije tunela kojima pripadaju i da su u interakciji sa tunelom.

Slika IV.63. Sniženja nivoa podzemnih voda u reprezentativnom piježometru, kroz Sekcije za *ceo period* (21/9/2016 – 21/10/2016)

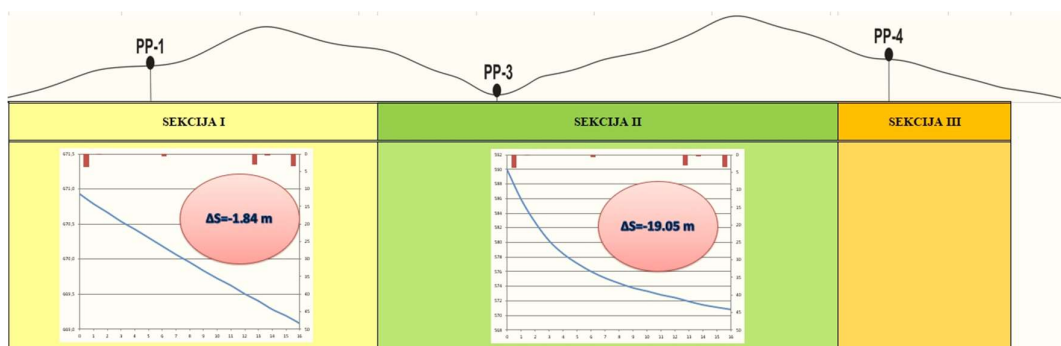
Razlaganje *celog perioda* osmatranja na dva odvojena perioda – *I period* i *II period* pokazuje se važnim za analizu i razumevanje dinamike procesa koji se odvijaju u hidrogeološkoj sredini uzrokovanih pritiskom transportovane tunnelske vode.

U *I periodu* koji je trajao 16 dana dotok voda iz hidrogeološke sredine u tunnel se povećao za 6.7 l/s u Sekciji I, dok je u Sekciji II došlo do smanjenja dotoka u vrednosti od 10 l/s (slika IV.64). Već na osnovu ovih veličina uočava se nešto drugačije stanje u odnosu na *ceo period* osmatranja. Povećani dotok u Sekciji I ukazuje na dosta spor proces ocedivanja hidrogeološke sredine koji se može opravdati dosta visokim stanjem podzemnih voda u (reprezentuje PP-1) i postepenim i dosta sporim oslobađanjem pritiska koji je postignut usled radnog režima tunela (ili dosta dobrim stanjem betonske obloge tunela). Veliko smanjenje dotoka u Sekciji II ukazuje na izuzetno dinamično ocedivanje ove zone, izazvano brzim oslobađanjem pritiska tunela (ukazuje na potencijalno oslabljeno stanje betonske obloge tunela).



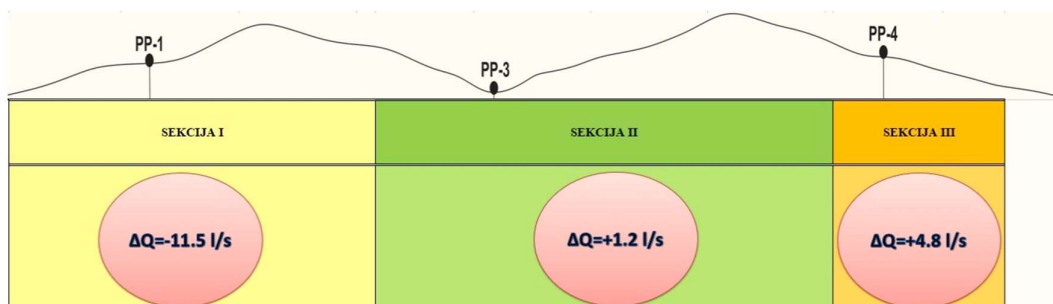
Slika IV.64. Promene vrednosti dotoka kroz Sekcije za *I period* (21/9/2016 – 7/10/2016)

U prilog ovakvog objašnjenja porasta dotoka na Sekciji I ukazuje i komparativna analiza kvantitativnih karakteristika podzemnih voda u pijeziometrima PP-1 i PP-3, gde je detektovano da dinamika sniženja nivoa u PP-1 kasni 16 dana u odnosu na reakciju PP-3 usled prestanka dejstva pritiska tunela. Sniženje nivoa podzemnih voda u pijeziometrima tokom *I perioda* ukazuje da je na PP-1 došlo do sniženja nivoa od 1.84 m, dok je na PP-3 sniženje iznosilo 19.05 metara (slika IV.65).

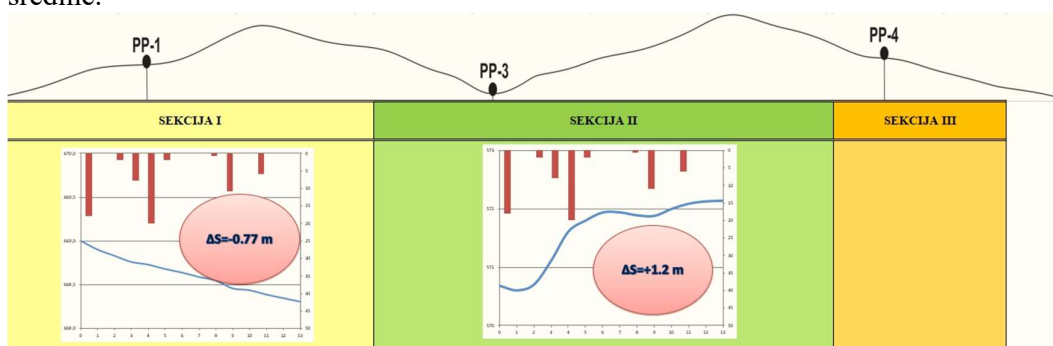


Slika IV.65. Sniženja nivoa podzemnih voda u reprezentativnom pijeziometru, kroz Sekcije za *I period* (21/9/2016 – 7/10/2016)

Tokom *II perioda* u Sekciji I dolazi do smanjenja dotoka od 11.5 l/s (slika IV.66) što ukazuje da je u ovom periodu došlo do oslobađanja pritiska u hidrogeološkoj sredini i pražnjenja ove zone. Teoriji koja ukazuje da je pražnjenje hidrogeološke sredine u Sekciji I omogućeno tek posle pražnjenja hidrogeološke sredine u Sekciji II ide u prilog povećan dotok u Sekciji II od 1.2 l/s.

Slika IV.66. Promene vrednosti dotoka kroz Sekcije za **II period** (7/10/2016 – 21/10/2016)

Povećanje dotoka u Sekciji II posledica je kišne epizode koji se javila u toku ovog perioda osmatranja što je potvrđeno i porastom nivoa podzemnih voda u pijeziometru PP-3 za 1.2 m (slika IV.67). Povećan dotok i porast nivoa u PP-3 ukazuju da je u zoni Sekcije II došlo do gotovo potpunog pražnjenja hidrogeološke sredine na početku ovog perioda i da je ova zona ne samo hidraulički najaktivnija, nego je dinamika pražnjenja hidrogeološke sredine usled oslobađanja pritiska tunnelske transporovane vode izuzetno velika. U pijeziometru PP-1 nastavlja se trend smanjenja nivoa za 0.77 m, što potvrđuje da se u Sekciji I tokom trajanja **II perioda** i dalje nastavlja pražnjenje hidrogeološke sredine.

Slika IV.67. Snižnja nivoa podzemnih voda u reprezentativnom pijeziometru, kroz Sekcije za **II period** (7/10/2016 – 21/10/2016)

U Sekciji III posmatrano kroz **I i II period** osmatranja nije došlo do smanjenja dotoka, već je on bio dosta konstantan i znosio je 6 l/s u prvom periodu i 4.8 l/s u drugom periodu. Konstantno povećan dotok u tunnel najverovatnije je posledica većeg isticanja podzemnih voda u tunnel na stacionaži 7+350 m gde se nalazi tkz. Čombetov izvor (dve cevi kojima je omogućeno direktno isticanje podzemnih voda u tunnel kroz betonsku oblogu u samom podu tunela) koja pripada ovoj Sekciji.

2.2.2. Analiza rezultata dobijenih kvalitativnih karakteristika podzemnih voda

Analiza rezultata kvalitativnih karakteristika podzemnih voda urađena je na osnovu rezultata izmerenih fizičko-hemijskih parametara *in situ* i na osnovu hemijskog sastava podzemnih uzorkovanih voda određenih u laboratorijskim uslovima.

Važan podatak, odnosno napomena, za analizu fizičko-hemijskih parametara podzemnih voda koje su uzorkovane *in situ*, jeste reprezentativnost određenih podataka koji su nastali usled par poteškoća prilikom primene multiparameterske sonde. Pre svega, zbog tehničkih problema, kiseonična sonda često nije bila u funkciji što je dovelo do značajnog nedostatka podataka o izmerenom rastvorenom kiseoniku (DO). Tokom poslednje serije merenja na terenu, koja je izvršena 10/11/2016 konstatovano je da je temperaturna sonda pokazivala veće vrednosti od realnih, u proseku 3 °C, što je priuzrokovalo dobijanje nerealnih rezultata pre svega elektorprovodljivosti i pH vrednosti podzemnih voda. Iz navedenih razloga, odlučeno je da rezultati merenja fizičko-hemijskih parametara podzemnih voda u toku ovog merenja budu isključeni iz analize, iz razloga njihove nereprezentativnosti. Na jednoj seriji uzoraka koji su uzeti za izradu hemijske analize, nisu mereni fizičko-hemijski parametri *in situ*, već u laboratorijskim uslovima ali primenom iste sonde, pa su iz ovog razloga ti uzorci u tabelama označeni žutom bojom.

2.2.2.1 Analiza rezultata kvalitativnih (hidrohemijskih) karakteristika podzemnih voda na izvorima

1. Izvor Izvor

Osmatranje kvalitativnih karakteristika podzemnih voda na izvoru Izvor, u prvom redu fizičko-hemijskih parametara osmotrenih *in situ*, potvrdili su pretpostavku donetu na osnovu analize kvantitativnih karakteristika, da različit režim rada hidrotehničkog tunela nije uticao ni na promenu kvalitativnih karakteristika voda ovog izvora.

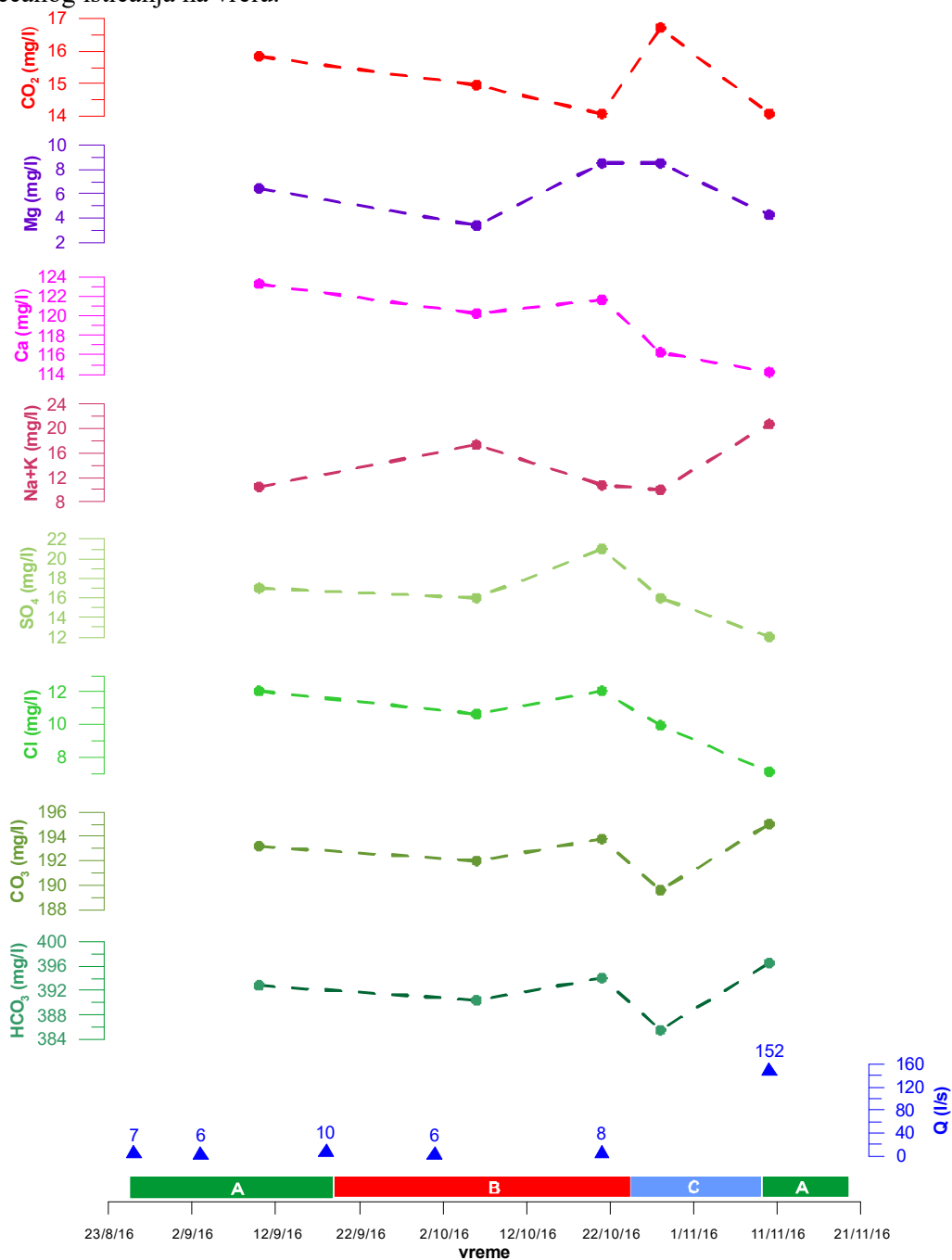
Vrednost ORP parametra ukazao je da padavine u najvećoj meri utiču na stanje podzemnih voda u karstnoj izdani koja se drenira preko ovog izvora. U periodu kada imamo odsustvo padavina ORP je najniži što ukazuje da se nivo vode nalazi na većoj dubini u tom periodu, dok se pri porastu nivoa povećavaju i ORP vrednosti, odnosno voda se nalazi u zoni koja je bliža površini terena i obogaćena kiseonikom. pH i EC vrednosti ukazuju da različit režim rada hidrotehničkog tunela nema vidljiv uticaj na promenu ovih kvalitativnih karakteristika podzemnih voda. Temperaturni režim ovog izvora je bio dosta stabilan u toku celo osmatračkog perioda.

Na osnovu anjonskog i katjonskog sastava podzemnih voda, na izvoru Izvor vidljivo je da se radi o tipičnim krečnjačkim vodama u čijem sastavu preovlađuje HCO_3 i Ca jon. Tokom trajanja svih faza različitog režima rada tunela hemijski sastav voda je ostao nepromenjen (Ca-HCO_3 tipa) bez evidentnog uticaja transportovanih/akumulacionih voda.

Jedina manja vidljiva promena hemijskog sastav podzemnih voda na ovom izvoru tokom celog osmatračkog perioda zabeležena je u promeni koncentracije Mg jona što je može biti posledica povećanog rastvaranja dolomitičnih stena. Takođe, blago povećanje SO_4 jona tokom faze B najverovatnije je posledica padavina koje mogu uticati na povećanje ovog anjona [34].

Momenat naglog porasta proticaja, usled pojave kišne epizode i potpunog punjenja podzemlja u karstnoj izdani, prouzrokovalo je i promene gotovo svih pokazatelja hemijskog sastava podzemnih voda na ovom izvoru (slika IV.68). Iako se ovaj momenat poklapa sa fazom punjenja, registrovani kišni period ukazuje da se najverovatnije radi o klasičnom procesu dreniranja karstne izdani, u kome

se padavine koje se izluče na slivno područje brzo infiltriraju, utiču na porast nivoa izdani i dovode do povećanog isticanja na vrelu.



Slika IV.68. Promena hemijskog sastava podzemnih voda izvora Izvor kroz faze rada tunela (A,B i C)

2. Izvor Berilovac

Rezultati fizičko-hemijskih parametara podzemnih voda sa izvora Berilovac su ukazali da vode ovog vrela imaju dosta slične karakteristike kao i one ozorkovane na vrelu Izvor.

Iako dobijeni rezultati ne ukazuju na sličnost ova dva izvora, važna je već navedena činjenica da je uzorkovanje voda na Izvoru izvršeno u primarnoj zoni isticanja, dok je na izvoru Berilovac uzorkovanje voda izvršeno na jednoj reprezentativnoj česmi. Međutim, vrednosti ORP i EC mogu ukazati da ovaj izvor ima nešto pliće isticanje iz izdani nego što je to u slučaju izvora Izvor. Samim tim su i oksidaciono-redukcioni uslovi na ovom izvoru dosta nestabilniji sa prisutnim konstantnim oscilacionim promenama. Temperaturni režim voda razmatranog vrela je dosta konstantan, sa uočenim blagim padom vrednosti koje mogu da idu u prilog pretpostavci da je ovaj izvor formiran u nešto plićej zoni nego izvor Izvor. Jedine značajnije promene su vidljive u pH vrednosti, kada tokom faze B imamo zabeležene najmanje vrednosti ovog parametra od 6.7. Atmosferske padavine koje su pale na istražno i slivno područje tokom trajanja ove faze uticale su na smanjenje pH vrednosti s obzirom na poznatu činjenicu da pH vrednost kišnice iznosi 5-5.5.

U pogledu promene anjonskog i katjonskog sastava podzemnih voda tokom celog perioda osmatranja uočene su jedino promene Ca i Mg jona, što je isključivo posledica dominantnog procesa rastvaranja krečnjačkih, odnosno dolomitičnih stena u određenom trenutku.

3. Izvor Nišor 1/2

Izmereni fizičko-hemijski parametri podzemnih voda na izvorima Nišor 1 i 2, nisu ukazali na važne promene. Jedine značajne promene razmatranih parametara zabeležene su u pogledu promene temperaturnog režima ovih voda. Temperatura podzemnih voda oscilirala je u zavisnosti od temperature vazduha, što je posebno izraženo kod izvora Nišor 1. Kod izvora Nišor 2 temperaturne oscilacije su dosta blaže ali su isto prouzrokovane temperaturnim promenama vazduha.

Promena anjonskog i katjonskog sastava podzemnih voda oba razmatrana izvora ukazuju da se radi o Ca-HCO₃ tipu voda, koji se tokom trajanja različitih faza režima rada tunela nije menjao. Jedine značajnije promene u koncentracijama jona vidljiv je kod jona magnezijuma, kada je tokom faze B došlo do smanjenja njegove koncentracije. Ovakve promene su najverovatnije posledica manjeg rastvaranja dolomitičnih stena u toku cirkulacije podzemnih voda.

4. Izvor Dobri Do

Rezultati fizičko-hemijskih parametara podzemnih voda na izvoru Dobri Do ukazali su da je do najznačajnijih promena došlo kod temperaturnog režima podzemnih voda. Tokom faze B, kada je tunel bio van funkcije pored zabeleženog smanjenja proticaja na ovom izvoru, u istom vremenskom periodu/seriji merenja došlo je do smanjenja temperature podzemnih voda za 3 °C, dok je vrednost ORP opala za 80 mV. Ovakve promene temperaturnog i oksido-redukcionog režima podzemnih voda mogu biti posledica opadanja stanja podzemnih voda usled oslobađanja pritiska koji hidrotehnički tunel vrši na hidrogeološku sredinu. Međutim, opadanje nivoa podzemnih voda u ovoj karstnoj izdani može biti posledica odsustva padavina, i nastupanja recesionog perioda. S obzirom da je ovaj izvor u neposrednoj blizini pijezometra PP-3 i da se radi o delu terena koji je izuzetno karstifikovan, sa potencijalnim razvićem hipogenog karsta, prisutna je izuzetno brza propagacija padavina u kartsnu izdan. Padavine koje su se desile tokom 4. serije uzorkovanja onemogućile su jasno sagledavanja postojanja potencijalnog uticaja tunela pod pritiskom na režim isticanja izvora Dobri Do.

Promena anjonskog i katjonskog sastava podzemnih voda izvora Dobri Do ukazuje da je do izraženijih promena došlo u pogledu koncentracije Mg jona. Promene koncentracije ovog jona je najverovatnije posledica većeg ili manjeg rastvaranja dolomitičnih stena u određenom vremenskom

periodu, koji je potpuno bio nezavisan od perioda trajanja različitih faza režima rada hidrotehničkog tunela.

Značajniji porast SO_4 jona u toku faze B je najverovatnije posledica pojave kišne epizode i brze propagacije padavina u izdan, dok je najznačajnija promena $\text{Na}+\text{K}$ jona verovatno posledica povišenog sadržaja Na jona koji u podzemne vode može dospeti kao produkt antropogenog dejstva [73].

5. Izvor Glame

Fizičko-hemijski parametri izmereni na terenu na izvoru Glame ukazuju jedino na promenu temperaturnog režima koji je direktno u zavisnosti sa režimom temperature vazduha.

Promena anjonskog i katjonskog sastava podzemnih voda ovog izvora ukazuje da tokom trajanja različitih faza režima rada tunela nije došlo do promene hemijskog tipa voda.

Podzemna voda koja ističe na izvoru Glame je $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ tipa, sa detektovanim promenama Mg, $\text{Na}+\text{K}$ i SO_4 jona u toku trajanja različitih faza režima rada tunela. Tokom faze B registrovane su padavine (3 serija uzoraka) koje su verovatno prouzrokovale porast $\text{Na}+\text{K}$ jona koji u izdan mogu dospeti spiranjem površine terene/zone prihranjivanja na kojoj se nalaze đubriva životinjskog porekla (stajnjak). Rastvaranje stajnjaka i infiltracijom ovakvih voda može doći do povećanja sadržaja Na jona u podzemnim vodama [73].

Porast sadržaja SO_4 jona je najverovatnije posledica kišne epizode koja je registrovana tokom faze B i to u svim razmatranim izvorima formiranim u lokalnim hidrogeološkim sistemima. U ruralnim područjima netaknute šume utvrđeno da kišnica u svom hemijskom sastavu ima najzastupljeniji jon - anjon SO_4 [34].

6. Dag Banjica

Dag Banjica kao najznačajnija pojava u ovoj zoni isticanja termalnih voda (primitivno kaptirani izvor), sa najvećom temperaturom od $29.6\text{ }^\circ\text{C}$ analizirana je sa aspekta promena kvalitativnih karakteristika. Svi osmatrani fizičko-hemijski parametri uzorkovanih voda ovog termalnog izvora su tokom celog perioda osmatranja bili konstantni.

Po anjonskom i katjonskom sastavu vode termalnog izvora Dag Banjice su pre svega Ca-Mg-HCO_3 tipa i tip voda se kroz različite faze osmatranja nije menjao. Ovaj izvor u odnosu na sve ostale razmatrane izvore ima najkonstantnije koncentracije svih komponenti hemijskog sastava podzemnih voda. Kvalitativne karakteristike voda termalnog izvora Dag Banjica ukazuju da se hemijski sastav nije menjao pod uticajem atmosferskih padavina, što je posledica dosta udaljenije zone prihranjivanja u odnosu na zonu isticanja, odnosno postojanja duboke/regionalne cirkulacije podzemnih voda.

7. Dobrodolska reka

Fizičko-hemijski parametri voda Dobrodolske reke koji su osmotreni *in situ* u ovoj zoni pokazali su da tokom različitog režima rada tunela, posmatrano kroz sve faze (A,B i C) režim fizičko-hemijskih parametara je bio dosta ustaljen. pH vrednost je bila konstantana, dok je temperatura vode bila

promenljiva. Temperaturne oscilacije su pre svega nastajale usled mešanja termalnih voda konstantnih temperatura i voda koje dotiču iz hladnih izvora kao i površinskog toka čija temperatura je bila direktno pod uticajem atmosferskog temperaturnog režima. ORP i EC vrednosti su bile dosta stabilne tokom različitih faza režima rada hidrotehničkog tunela što ukazuje da tokom celog istraživačkog perioda nije izmenjen kvalitativni režim podzemnih voda koje su osmatrane u razmatranoj zoni (na potezu od letve 1 do letve 2) toka Dobrodolske reke.

Po anjonskom i katjonskom sastavu uzorkovane površinske vode Dobrodolske reke (u zoni mešanja sa termalnim vodama) pokazuju veliku sličnost sa vodama sa izvora Dag Banjice. Ove vode su pretežno bile Ca-Mg-HCO_3 tipa, izuzev u periodu trajanja faze B kada voda prelazi u Ca-HCO_3 tip. Ovakva promena hemijskog tipa voda najverovatnije je posledica mešanja termalnih voda sa rečnom vodom koja postaje dominantnija u periodu intenzivnih padavina.

2.2.2.2. Analiza rezultata kvalitativnih (hidrohemijskih) karakteristika podzemnih voda u pijezometrima

Pijezometar PP-1

Izmerene promene fizičko-hemijskih parametara podzemnih voda uzorkovanih iz ovog pijezometra ukazuju da različit režim rada tunela uzrokuje određene promene navedenih parametara. U periodu kada je tunel van funkcije, kvalitet podzemnih voda u pijezometaru PP-1 je najmanje izložen uticaju transportovanih tunelskih voda. U ovom periodu zabeležena pH vrednost podzemnih voda bila je najniža i iznosila je 7.9. Sličan trend promene prisutan je i kod vrednosti temperature podzemnih voda. U periodu kada je tunel van funkcije (faza B) izmerena je najniža temperatura podzemnih voda, dok se pod uticajem utiskivanja transportovanih tunelskih/akumulacionih voda temperatura podzemnih voda u pijezometru PP-1 povećala. Podzemne vode iz pijezometra PP-1 se odlikuju veoma niskom mineralizacijom što se može prikazati parametrom EC. U periodu kada tunel nije u funkciji, ovaj parametar iznosi $237 \mu\text{S/cm}$, dok se pod uticajem utisnutih voda, vrednost EC blago povećala na $262 \mu\text{S/cm}$ [40].

Merenja ORP vrednosti su pokazala velike razlike između početne faze osmatranja (kada tunel radi ustaljenim režimom, faza A) i u periodu kada je tunel van funkcije (faza B) [40]. Negativne vrednosti ORP parametra ukazuju na prisustvo redukcionih uslova, što je u ovom slučaju i očekivano jer se nivo podzemnih voda u pijezometru PP-1 nalazi na velikoj dubini (gotovo 100 m od površine). Međutim, treća serija merenja ORP vrednosti je pokazala da nije dolazilo do naknadnih promena iako je tokom celog osmatračkog perioda došlo do relativno malih oscilatornih promena nivoa podzemnih voda (do 4 m).

Promena hemijskog sastava podzemnih voda u pijezometru PP-1, odnosno promene njihovog anjonskog i katjonskog sastava analiziran je na osnovu rezultata uzorkovanih voda kroz 3 vremenske serije, koje su obuhvatile tri osnovne faze režima rada tunela (faze A, B i C). Podzemna voda uzorkovana iz pijezometra PP-1 se odlikuje dosta malom mineralizacijom sa hemijskim sastavom koji odgovara vodama formiranim u karstnim izdanima (krenjačkim stenama).

Tokom faze ustaljenog režima tunela i faze kada je tunel bio van funkcije, došlo je do neznatnog povećanja mineralizacije, pri čemu se hemijski tip podzemne vode nije menjao [40]. U toku ova dva osmatračka perioda, u razmatranom pijezometru podzemna voda je bila Ca-HCO_3 tipa. Međutim, u toku faze ponovnog punjenja hidrotehničkog tunela, a time i hidrogeološke sredine, došlo je do promene hemijskog sastava podzemnih voda. U fazi C došlo je do značajnog povećanja koncentracije

Cl jona što je dovelo do promene hemijskog tipa podzemnih voda (u ovoj fazi voda je postala Ca-HCO₃- Cl tipa). Značajno povećanje Cl jona jedino se može objasniti pomoću detaljne analize pijezometra PP-3, što je bio slučaj i sa objašnjenjem kvantitativnih karakteristika voda ovog pijezometra. Povišen sadržaj hlorida u pijezometru PP-3 je prisutan kroz sve faze rada hidrotehničkog tunela, međutim najveća zabeležena koncentracija je u fazi C, ali iz već poznatog razloga postojanja različite dinamike punjenja hidrogeloške sredine u zoni pijezometra PP-1 i PP-3 ova faza je različita kod razmatranih pijezometara. Uzorak podzemne vode koji je analiziran u pijezometru PP-3 a oslikava fazu C uzorkovan je 25/10/2016, dok je uzorak koji oslikava fazu C na pijezometru PP-1 uzorkovan 10/11/2016 što odgovara ponovnoj fazi A u slučaju pijezometra PP-3 (postizanje ponovnog radnog pritiska tunela). Ovakvo pomeranje faza režima rada tunela na pijezometru PP-1 u odnosu na PP-3 u analizi rezultata kvalitativnih karakteristika podzemnih voda izvršeno je na osnovu podznatih podataka o promeni stanja nivoa podzemnih voda (kvantitativnih karakteristika) koji su pokazali da na poslednjoj seriji uzorkovanja (3 serija) na ovom pijezometru nije došlo do stabilizacije/ustaljenja nivoa. Hloridi koji su detektovani u PP-3 25/10/2016 (faza C) najverovatnije su dospeli u pijezometar PP-1 sa vremenskim zakašnjenjem od 17 dana, što je uočeno i detaljnom kvantitativnom analizom ova dva pijezometra, na osnovu koje je ustanovljeno da postoji period zakašnjenja punjenja hidrogeološke sredine pod pritiskom transportovane tunelske vode na PP-1 u odnosu na PP-3 od 16 dana.

Pijezometar PP-3

Tokom prve faze istraživanja, na osnovu merenja kvantitativnih karakteristika podzemnih voda u pijezometru PP-3 konstatovana je izuzetno velika reaktivnost ovog pijezometra, na osnovu čega je odlučeno da se na ovom osmatračkom objektu monitoring kvalitativnih karakteristika sprovede na detaljnijem nivou, odnosno sa većim brojem terenskih merenja i uzorkovanja voda za potrebe izrade hemijskih analiza, u odnosu na druga dva pijezometra. Izmereni fizičko-hemijski parametri voda iz ovog pijezometra ukazuju na prisustvo dosta dinamičnih procesa koji se odigravaju u hidrogeološkoj sredini, izazvanih pre svega različitim režimom rada hidrotehničkog tunela.

Tokom faze A, kada je tunel u radnom režimu, izmerena pH vrednost podzemnih voda je bila najveća i iznosila je 9.85. Međutim, tokom faze B, kada je tunel bio van funkcije (remont) došlo je do pražnjenja hidrogeološke sredine u zoni pijezometra PP-3, što je prouzrokovalo opadanje pH vrednosti podzemnih voda, na 7.51. Ponovnim puštanjem u rad tunela, i utiskivanjem transportovane tunelske vode u pijezometru došlo je do ponovnog postepenog rasta pH vrednosti.

Temperaturni režim podzemnih voda u ovom pijezometru ukazuju da su temperature najniže u periodu kada je tunel van funkcije (faza B) dok su u periodu ustaljenog režima (faza A) izmerene najviše vrednosti ovog parametra što može biti posledica mešanja podzemnih i transportovanih tunelskih/akumulacionih voda [40].

Merenja ORP vrednosti su pokazala trend porasta u periodu kada tunel nije bio u funkciji. Sa puštanjem tunela u rad je došlo do naglog opadanja ORP vrednosti, a kasnije sa ustaljenjem režima rada do ponovnog povećanja. Na osnovu ovih rezultata moguće je konstatovati da podzemna voda u uslovima radnog režima tunela, kada je hidrogeološka sredina zasićena, a nivo podzemnih voda u višim delovima sredine vladaju menje oksidacioni uslovi nego što je to slučaj u periodu kada je tunel van funkcije.

Izrazite promene kvalitativnih osobina podzemnih voda iz pijezometra PP-3 se najočiglednije odražavaju kroz promene mineralizacije (ustanovljene promenama EC vrednosti, merenim *in-situ*).

Tokom radnog režima tunela, u toku prvog osmatranja, EC vrednost je iznosila 625 $\mu\text{S}/\text{cm}$, što je odlika malomineralizovanih voda. Nakon isključenja tunela, dolazi do povećanja prirodne mineralizacije podzemnih voda i tada EC vrednost iznosi 1452 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Narednog dana, neposredno nakon puštanja tunela u rad, pod uticajem podizanja nivoa visokomineralizovanih voda sa stacionaže 4+230 m, dolazi do skoka EC vrednosti na 1472 $\mu\text{S}/\text{cm}$ [40]. U narednom periodu kada se prirodna izdanska voda meša sa vodama koje se utiskuju kroz tunel, na piježometru PP-3 registrovano je opadanje mineralizacije.

Na osnovu rezultata merenja vrednosti EC i temperature po dubini, na svakih 5 metara, u ovom piježometru bilo je moguće detaljnije analiziranje mešanja transportovanih tunelskih voda i podzemnih voda, kroz različite faze režima rada tunela. Tokom perioda kada je tunel bio u radnom režimu (faza A), u piježometru PP-3 je registrovan visok nivo podzemnih voda (na 11 m). U istom periodu registrovan je značajan porast elektroprovodljivosti sa dubinom (672 – 1585 $\mu\text{S}/\text{cm}$), dok su vrednosti temperature podzemnih voda blago opadale sa dubinom (11.6 – 9.9 °C). U hidrogeološkim sistemima, porast vrednosti elektroprovodljivosti i temperature sa porastom dubine predstavlja uobičajenu pojavu, pa ove vrednosti ukazuju da je transportovana akumulaciona voda u velikoj meri utisnuta u hidrogeološku sredinu. Pod ovako veštački izazvanim uslovima došlo je do razbleženja elektroprovodljivosti duž celog vodenog stuba, tako što se voda manje mineralizacije a samim tim i težine izdigla u više slojeve. Temperatura vode na 15 m dubine bila je veća za gotovo 2 stepena u odnosu na 65 metar dubine, što je posledica izdignute podzemne vode više temperature pod pritiskom akumulacionih voda niže temperature.

Tokom perioda kada tunel nije u funkciji (faza B), nivo podzemnih voda u piježometru PP-3 značajno opada (ukupno sniženje nivoa iznosi 43 metra). U tom periodu su u piježometru registrovane vode visokih vrednosti EC na 65. metru dubine, od 1693 do 1833 $\mu\text{S}/\text{cm}$, što najverovatnije predstavlja EC vrednost voda koje se prirodno nalaze u izdani. Međutim, iz tehničkim problema (neprohodnosti piježometra do dna tunela) u piježometru često nisu mereni podaci na 68. metru dubine. Međutim, ovaj podatak o vrednosti EC sa dubine od 68 m može biti od posebnog značaja, posebno za kasniju analizu voda koje ističu na stacionaži tunela 4+230 m u tunelu koja odgovara stacionaži ovog piježometra. Izmerena vrednost elektroprovodljivosti na ovom metru dubine iznosi u proseku od 1747 do 3063 $\mu\text{S}/\text{cm}$, i ova vrednost može biti pokazatelj realnih karakteristika izdani.

Tabela IV.39: Prikaz tehničkih karakteristika piježometra PP-3 u odnosu na tunel

Piježometar	Stacionaža tunela (m)	Ukupna dubina (m)	Dno tunela (m)	Filterska konstrukcija - interval (m)
PP-3	4+200	83	78	od 60 do 80

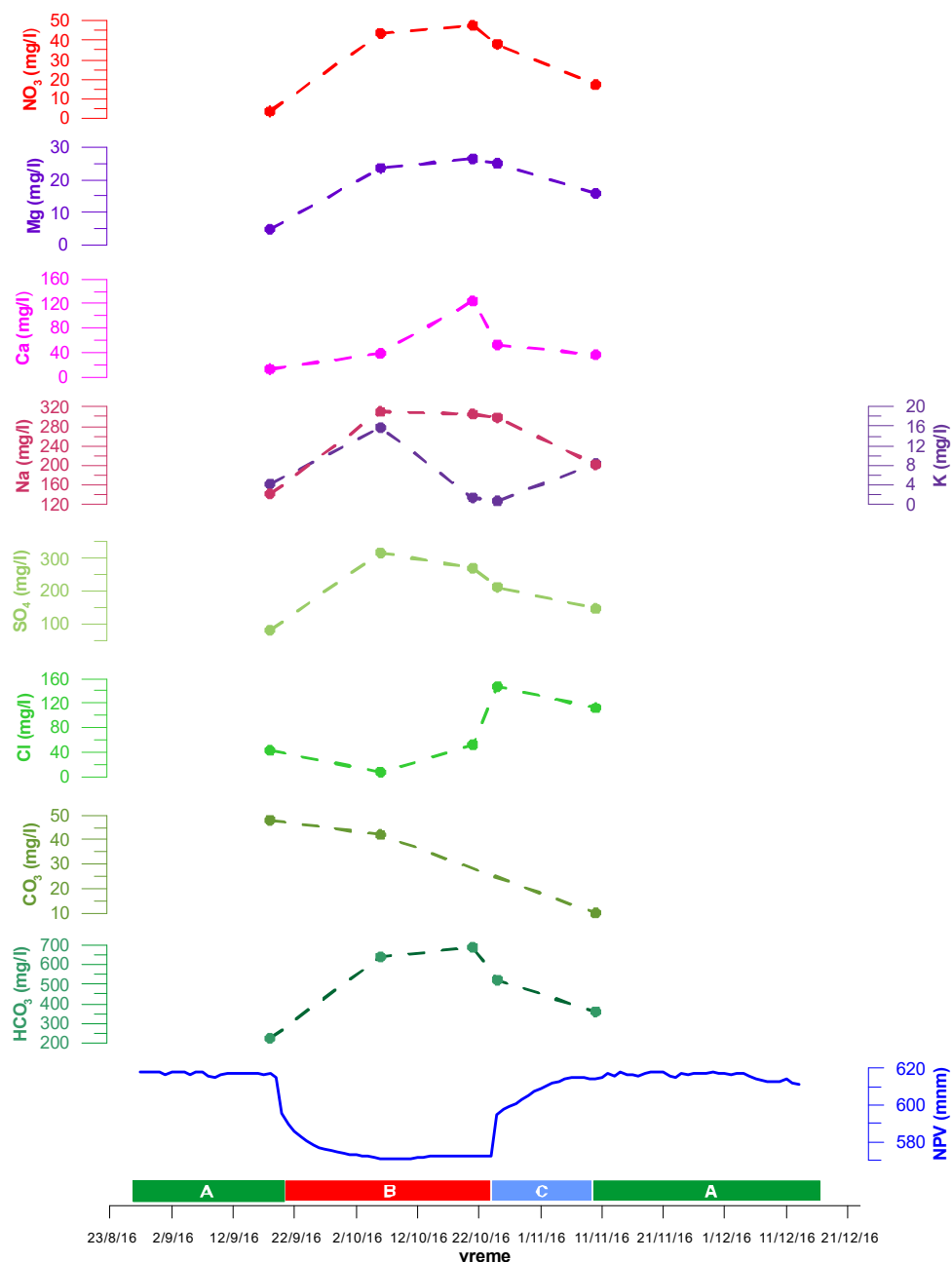
Prilikom punjenja tunela (faza C), osmatranja elektroprovodljivosti po dubini u piježometru PP-3 odražavaju uticaj hidrotehničkog tunela na prirodnu geološku/hidrogeološku sredinu. Ispucala stenska masa u kojoj je formirana izdan (slojeviti tamno-sivi laporac, sa žutim krečnjakom) omogućava dobru cirkulaciju voda. Nakon samo dva dana rada tunela, nivo vode u piježometru je porastao za 25 m, što je pratilo opadanje vrednosti elektroprovodljivosti sa dubinom. Ovakav uticaj se ostvaruje tako što malomineralizovane vode iz tunela, odnosno akumulacionog jezera, vrše pritisak na okolnu sredinu i potiskuju visokomineralizovane vode koje se prirodno nalaze u izdani (registrovane na stacionaži 4+230 m hidrotehničkog tunela). Prilikom sledećeg merenja, inverzija vrednosti elektroprovodljivosti više nije bila toliko očigledna, što je rezultat procesa mešanja voda različitih mineralizacija. U periodu kada tunel radi ustaljenim režimom, ponovo je prisutno povećanje vrednosti EC sa dubinom, dok su temperature voda gotovo konstantne.

Promene anjonskog i katjonskog sastava podzemnih voda uzorkovanih u ovom pijezometru, dodatno su ukazale na dinamičnost odvijanja procesa u hidrogeološkoj sredini pod uticajem različitog režima rada tunela, koju reprezentuje pijezometar PP-3.

U periodu ustaljenog radnog režima tunela (faza A) voda je Na-HCO₃-SO₄-CO₃ tipa, sa dosta manjim koncentracijama većine komponenti u odnosu na fazu B, što je posledica izmešane podzemne i transportovane/akumulacione vode. HCO₃ i CO₃ jon ukazuje da je i akumulaciona i podzemna voda najvećim delom formirana u karbonatnim stenama. Konkretno, CO₃ jon u ovoj fazi A ukazuje da akumulaciona voda ima primat u odnosu na prirodnu izdansku vodu u vodama pijezometra PP-3.

Značajne promene koncentracije gotovo svih komponenti hemijskog sastava podzemnih voda u razmatranom pijezometru kroz različite faze režima rada tunela ukazuju da transportovana tunelska/akumulaciona voda u značajnoj meri utiče na izmenu kvalitativnih karakteristika podzemnih voda. Tokom trajanje faze B (period od mesec dana) kada tunel nije bio u funkciji, u pijezometru PP-3 je uočen porast gotovo svih komponenti osnovnog sastava (posebno značajno Ca, Mg, HCO₃, SO₄ jona). Posledica ovakvog povećanja koncentracije određenih jona jeste uspostavljanje prirodnog stanja podzemnih voda na čiji kvalitet i njegovu promenu više ne utiče transportovana akumulaciona voda.

Odmah nakon puštanja tunela u rad, na uzorkovanoj vodi iz pijezometra PP-3 je uočeno smanjenje koncentracija svih komponenti, izuzev hlorida koji su prisutni kao rezultat podizanja Na-Cl voda, koje su locirane na stacionaži 4+230 m [40].



Slika IV.69. Promena hemijskog sastava podzemnih voda u piježometru PP-3 kroz faze rada tunela (A, B i C)/(serije uzorkovanja date u tabeli IV.27)

Piježometar PP-4

Osmatranja fizičko-hemijskih karakteristika podzemnih voda na piježometru PP-4 su obuhvatila dva perioda, odnosno faze režima rada hidrotehničkog tunela: faze B i C. Dosta visoko stanje podzemnih voda u piježometru PP-4 u toku oba razmatrana perioda ukazalo je da se ovaj piježometar nalazi pod uticajem atmosferskih padavina. U toku faze B, odnosno faze kada je tunel van funkcije/ispražnjen, ORP je ukazao na izuzetno redukcijske uslove sredine (-509 mV). Najznačajnije promene su zabeležene kod vrednosti elektroprovodljivosti, gde je EC od 130 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ukazala da se radi o vodama

male elektoprovodljivosti koja je karakteristika kišnice, što potencijalno ukazuje na to da ovaj pijezometar nije u vezi sa tunelom i da je isključivo pod uticajem atmosferskih padavina [40].

Prilikom prvog merenja EC i T po dubini, iz pijezometra PP-4 je izvučeno 30 zapremina vode uzorkivačem. Veoma spor povratak nivoa podzemnih voda je uočen prilikom sledećeg merenja (nivo podzemnih voda oboren za 15 m), što ukazuje na najverovatnije postojanje usporene zone cirkulacije. Ovaj pijezometar je ujedno i najdublji pijezometar koji je izveden na trasi tunela pa vertikalno sondiranje nije izvršeno duž celog pijezometra usled nedovoljne dužine sonde.

Tabela IV.40: Prikaz tehničkih karaketristika pijezometra PP-4 u odnosu na tunel

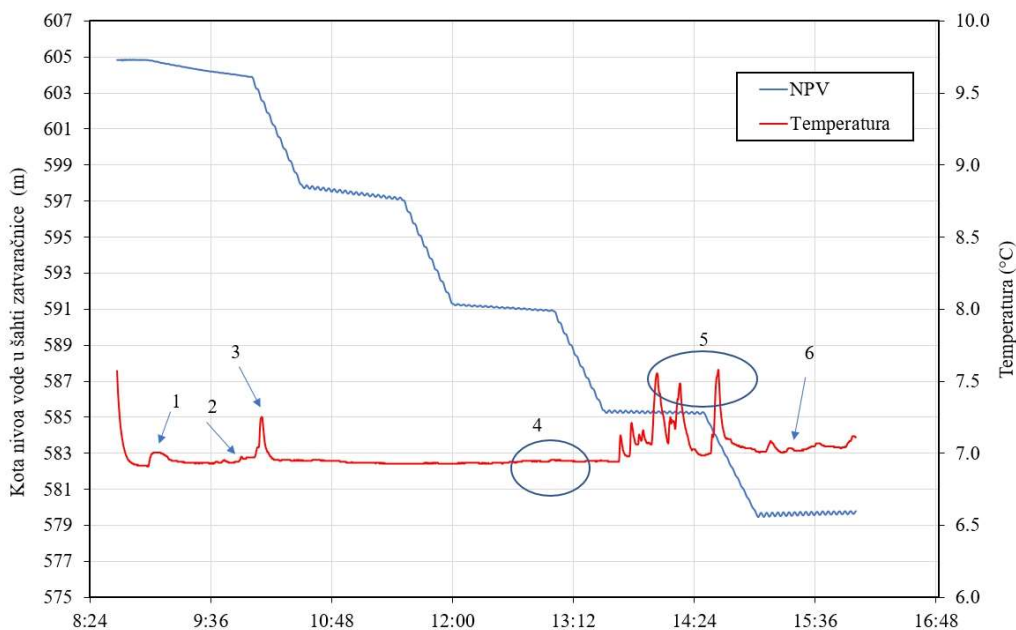
Pijezometar	Stacionaža tunela (m)	Ukupna dubina (m)	Dno tunela (m)	Filterska konstrukcija - interval (m)
PP-3	7+380	231	226	od 208 do 228

U pijezometru PP-4 je dobijena uobičajena slika kada je u pitanju promena vrednosti EC po dubini, a takođe i vrednost temperature je rasla skladno sa porastom dubine (tabela IV.33) [40].

Anjonski i katjonski sastav podzemnih voda u pijezometru PP-4, kroz dve serije uzorkovanja je bio dosta stabilan. Podzemna voda iz razmatranog pijezometra se odlikuje malom mineralizacijom: 220 mg/L i specifična je zbog visoke pH vrednosti (9.73), koja u osnovnom sastavu uslovljava prisustvo CO₃ anjona u vodi. U periodu kada tunel nije bio u funkciji, voda se odlikovala visokim sadržajima Ca kao osnovnim jonom (86.3 mg/L), međutim sa ponovnim ustaljenjem radnog režima tunela došlo je do značajnog smanjenja koncentracije Ca jona u vodi [40].

2.2.2.3. Analiza rezultata merenja promene fizičko-hemijskih karakteristika voda u šahti tunelske zatvaračnice / period merenja sumarnih gubitaka

Promena temperature vode u šahti zatvaračnice su veoma značajne sa aspekta razmatranja stanja podzemnih i akumulacionih/tunelskih voda tokom merenja sumarnih gubitaka. Nakon početne stabilizacije nivoa na oko 6.9 °C, došlo je do privremenog porasta temperature izazvanog spuštanjem pomoćnog zatvarača (slika IV.70, tačka 1). Tokom držanja prve stepenice temperatura je bila konstantna osim na samom kraju kada je došlo do neznatnog rasta za oko 0.03 °C, što potencijalno može ukazati na mogući priliv voda koje imaju temperaturu nešto višu u odnosu na vodu u samom tunelu (tačka 2). Potencijalni prilivi proporcionalno su značajno manji od gubitaka izazvanih prostrujavanjem voda iz tunela, ali ih svakako ne treba zanemariti [40].



Slika IV.70. Promena temperature u tunelskoj zatvaračici na stepenicama držanja nivoa u toku merenja sumarnih gubitaka na 10 sekundi [40]

Na samom početku prvog ispuštanja vode iz tunela dolazi do pojave pika temperaturne promene od $+0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$, što predstavlja posledicu dospevanja vode iz viših (toplijih) zona iz zatvaračnice (tačka 3). Na drugoj stepenici nisu uočene značajne promene temperature, osim izvesnog blagog pada koji se nastavio sve do treće stepenice kada je vidljiv blagi porast temperature, najverovatnije izazvan prilivom podzemnih voda nešto više temperature (tačka 4). Tokom četvrte stepenice jasno su uočljivi pikovi promene temperature i generalni porast temperature, što izvesno ukazuje na priliv podzemnih voda povišene temperature (tačka 5). Na petoj stepenici je vidljiva stabilizacija temperature i mogući kontinuirani priliv voda izazvan snižavanjem unutrašnjeg pritiska u tunelu.

Rezultati terenskih merenja pH vrednosti analiziranih voda u zatvaračnici su bili u opsegu od 7.61 do 8.1. Najniža pH vrednost zabeležena je pre početka merenja sumarnih gubitaka, dok je tokom držanja nivoa uočen pozitivan trend rasta ovog parametra (tabela IV.35). Temperatura vode, kao jedan od najvažnijih faktora pri proučavanju hemije voda, je dosta pouzdanije izmeren pomoću dajvera postavljenog u šahti zatvaračnice (kontinualno merenje) u odnosu na merenja izvršena multiparametarskom sondom (tabela IV.35, slika IV.75). Međutim, izmereni podaci temperatura vode multiparametarskom sondom, iako sa relativno malim oscilatornim intervalom od od 8.52 do $8.75\text{ }^{\circ}\text{C}$, pokazuje jasan trend porasta nakon prvog sata merenja, što ukazuje na priliv podzemnih voda povišenih temperatura u tunel.

Značajnije promene mineralizacije voda iskazane kroz vrednost elektroprovodljivosti (EC) ukazuju da je nakon III stepenice držanja nivoa registrovan značajniji porast sa 184 na $260\text{ }\mu\text{S/cm}$. Trend rasta EC nastavljan je do kraja trajanja postupka merenja sumarnih gubitaka. Ovakav trend porasta EC vrednosti već na trećoj stepenici držanja nivoa najverovatnije je izazvan prilivom voda iz zone pijezometra PP-3 gde su detektovane vode povišene mineralizacije.

Parametar oksido-reducionog potencijala (ORP) pokazuje značajne oscilacije tokom perioda osmatranja, pri čemu se beleži njegov trend opadanja (od 246.8 do 50 mV). Generalno, površinske vode odlikuju se višim redoks potencijalima od podzemnih voda, odnosno višim sadržajem kiseonika (DO) koji je u početnom trenutku merenja bio najviši i iznosio je 3.79 mg/L . Izražene promene

navedenih parametara uočavaju se od druge stepenice, što može da potvrdi raniju pretpostavku o dodatnom prilivu podzemnih voda u trenutku smanjenja pritiska u tunelu.

2.2.2.4. Analiza rezultata sinhronih merenja promene temperature i elektroprovodljivosti podzemnih voda u pijezometrima u periodu merenja sumarnih gubitaka

Na osnovu sinhronih merenja promene nivoa podzemnih voda u šahti zatvaračnice i pijezometrima PP-1 i PP-3 osmatrane su i promene temperaturnog režima analiziranih voda, sa vremenskim intervalom od 2 minuta.

Temperaturni režim je bio stabilan u oba razmatrana pijezometra, dok je temperatura u zatvaračnici dosta oscilirala. Ovakve promene temperaturnog režima u šahti zatvaračnice posledica je dotoka voda razlilitih temperatura iz geološke/hidrogeološke sredine u tunel, dok je u pijezometrima temperaturni režim ostao nepromenjen s obzirom da je došlo samo do gravitacionog praznjenja sredine usled oslobađanja radnog pritiska tunela.

Pijezometar PP-1

Ukupno sniženje nivoa tokom merenja sumarnih gubitaka i spuštanja nivoa u zatvaračnici odrazilo se na sniženje nivoa u pijezometru PP-1 u vrednosti od $\Delta H=0.01$ m. Na osnovu merenja fizičko-hemijskih parametara podzemnih voda izvršenih multiparametarskom sondom ne može se sa sigurnošću govoriti o promena tokom ova dva merenja.

Pijezometar PP-3

Na osnovu izmerenih vrednosti fizičko-hemijskih parametara u vodma uzorkovanih u pijezometru PP-1 može se konstatovati da su najjasnije promene uočene pri merenju EC i ORP vrednosti. Nakon merenja sumarnih gubitaka, dolazi do povećanja mineralizacije podzemnih voda i smanjenja ORP vrednosti, što potvrđuje brzo reagovanje pijezometra PP-3 usled rasterećenja pritiska tunela. Parametar ORP pokazuje značajne promene tokom perioda osmatranja, pri čemu se beleži njegov trend porasta (od -76.6 do -8.7 mV). Porast ORP vrednosti i smanjenje sadržaja DO (od 3.35 do 2.86 mg/L) su najverovatnije posledica napuštanja utisnutih tunelskih transportovanih/akumulacionih voda (koje odražavaju karakter oksidacione sredine) iz hidrogeološke sredine (koja odražava karakteristike redukcione sredine).

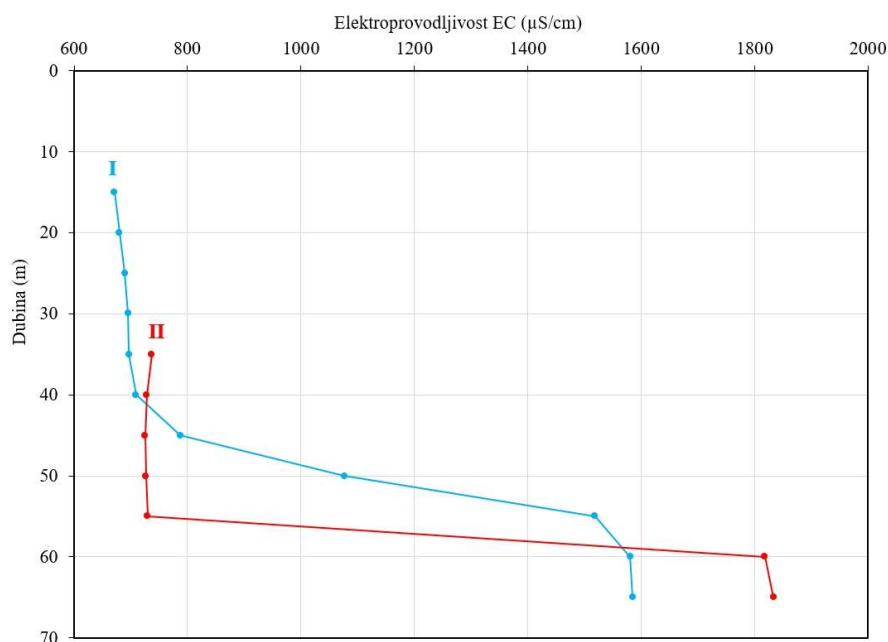
Ukupno izmereno sniženje nivoa podzemnih voda tokom merenja sumarnih gubitaka u pijezometru PP-3 iznosi $\Delta H=7.19$ m. Ovako značajna promena nivoa vode u pijezometru ukazuje na aktivnu hidrauličku vezu pijezometra i tunela. Pošto je ustanovljena velika reaktivnost pijezometra PP-3, na ovom osmatračkom objektu vršeno je vertikalno sondiranje (određivanje fizičko-hemijskih parametara po dubini) tokom dve serije merenja: neposredno pre početka merenja sumarnih gubitaka i nakon završenih merenja.

Tokom prve serije vršenja vertikalnog sondiranja (pre merenja sumarnih gubitaka), u pijezometru PP-3 registrovan je visok nivo podzemnih voda (nalazi se na 14 m). Vrednosti temperature podzemnih voda blago su opadale sa dubinom (11.6 – 9.9 °C). Pojava nižih vrednosti temperatura u donjem delu pijezometra je najverovatnije posledica uticaja utiskivanja hladnijih voda koje se transportuju tunelom pod pritiskom. Tokom druge serije vršenja vertikalnog sondiranja, takođe je uočeno blago sniženje temperature.

Pre početka merenja sumarnih gubitaka, kada je pijezometar PP-3 pod uticajem radnog režima tunela, a samim tim i voda koje se utiskuju u hidrogeološku sredinu, vrednosti EC imaju blaži pad (slika

IV.71). Mineralizovane podzemne vode koje su registrovane tokom istraživanja sprovednih u tunelu, na stacionaži 4+230 m se podižu pod pritiskom tunelskih voda što ima za posledicu povišene EC vrednosti u intervalu od 40-og do 55-og metra dubine (I) u odnosu na period nakon merenja sumarnih gubitaka (II). U uslovima rasterećenog pritiska, kada nivo vode u piježometru PP-3 opada, podzemne vode koje se odlikuju povišenim mineralizacijama (a samim tim i većim gustinama) gravitaciono se spuštaju naniže što se uočava naglim rastom EC vrednosti od 50-og metra (I).

U uslovima rasterećenog pritiska, uočava se jasnija razlika u dubinama između malomineralizovanih i mineralizovanih podzemnih voda. Do 50-og metra dubine vrednosti EC imaju blage promene (672 – 787 $\mu\text{S}/\text{cm}$), dok se nakon 50-og metra značajno povećava EC vrednost (1077 – 1585 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Ovakav oblik EC krive (II) ukazuje da su se podzemne vode povišene mineralizacije spustile u niže delove piježometra PP-3 i odražavaju uslove hidrogeološke sredine bez uticaja tunela.



Slika IV.71. Promena vrednosti EC podzemnih voda po dubini u piježometaru PP-3 (I - pre merenja sumarnih gubitaka, II - nakon merenja sumarnih gubitaka)

2.2.2.5. Analiza rezultata merenja fizičko-hemijskih parametara podzemnih voda u kanalu izlazne građevine

Na osnovu merenja temperaturnog režima podzemnih voda (kontinualna merenja dajverima sa intervalom na 2 minuta) koje su u procesu pražnjenja hidrogeološke sredine osmatrane na kanalu izlazne građevine primetan je blagi porast temperatura podzemnih voda. Ovakav porast temperature predstavlja posledicu postepenog preovlađujućeg uticaja podzemnih voda u odnosu na utisnute transportovene tunelske/akumulacione vode koje su okarakterisane kao vode niže temperature. Značajne oscilacije temperature voda koje dotiču u kanal su jednim delom prouzrokovane promenom temperature vazduha, ali su svakako najvećim delom nastale kao posledica različite dinamike pražnjenja voda iz stenskih masa, različitih sekcija u tunelu. Konstantan porast temperature u poslednjoj fazi pražnjenja najverovatnije predstavlja posledicu preovlađujućeg uticaja podzemnih voda koje dotiču u tunel iz dubljih hidrogeoloških struktura (intermedijarnih i/ili regionalnih hidrogeoloških sistema) [40].

Na osnovu dnevnih vrednosti osmatranja fizičko-hemijskih karakteristika podzemnih voda na kanalu izlazne građevine (i pored značajanog prekida u toku osmatranja) može se uvideti stepen dominacije akumulacionih/utisnutih voda u odnosu na prisutnost podzemnih voda, u početnom periodu osmatranja, odnosno periodu od prva 2. Temperatura ovih voda je bila uglavnom konstantna (11 – 11.5 °C) sa malom ali vidljivom tendencijom porasta, što je mnogo jasnije uočeno na osnovu detaljnijih temperaturnih promena izmerenih dajverima. pH i EC vrednosti konstantno opadaju, dok vrednosti ORP parametra konstantno rastu. Opadanje pH vrednosti u toku perioda pražnjena hidrogeološke sredine (koja prethodno bila pod uticajem utisnute transportovane tunelske/akumulacione vode) ukazuje jasno isticanje prvo akumulacionih voda koje postepeno na kraju faze B gube dominaciju u odnosu na prirodne podzemne vode. Pad elektroprovodljivosti uzorkovanih voda jasno ukazuje da u prvom trenutku dolazi do isticanja visokomineralizovanih voda koje su detektovane u zoni piježometra PP-3 i koje su u više slojeve sredine izdignute pod uticajem utisnute tunelske vode. Nakon ocedivanja navedene zone u kojoj su utvrđene visokomineralizovane vode dolazi do isticanja/oceđivanja voda iz hidrogeološke sredine male mineralizacije formirane u okviru krečnjačkih stena. ORP parametar konstantno raste što je posledica oslobađanja pritiska akumulacione vode i doticanja voda iz oslobođenih zona sredine, u kojoj preovlađuju oksidacioni uslovi.

2.2.2.6. Analiza rezultata kvalitativnih karakteristika voda uzorkovanih u tunelu

2.2.6.1. Analiza fizičko-hemijskih karakteristika podzemnih voda u hidrotehničkom tunelu

Rezultati merenja pH vrednosti analiziranih voda u tunelu iznosile su od 7.07 (0+263 m) do 9.16 (1+815 m). Upravo na navedenim stacionažama su uočene najveće promene pH vrednosti. Na deonici 0+263 m je tokom vremena došlo do povećanja pH vrednosti, sa vrednosti 7.07 na 7.55, dok je na stacionaži 1+815 m došlo do smanjenja pH vrednosti sa 9.16 na 8.7. Prirodne vode obično sadrže rastvoreni CO₂ i HCO₃ jon, koji održavaju pH vrednost u ravnoteži. Međutim, kako dolazi do utiskivanja voda koje se transportuju tunelom pod pritiskom (iz akumulacionog jezera) u prirodnu sredinu, nastupaju promene hemijskog sastava voda što se odražava na promenu pH vrednosti [40].

Temperatura podzemnih voda je merena *in-situ* i u tunelu su vrednosti ovog parametra bile u intervalu od 8.35 do 17.09 °C, što ukazuje na različite uslove formiranja voda. Na svim stacionažama je uočen porast temperatura nakon perioda merenja od mesec dana, što ukazuje na to da se vode koje se nalaze prirodno u izdani, odlikuju višim temperaturama od voda koje se utiskuju kroz tunel. Najveća promena je uočena na deonici 6+715 m, gde je temperatura porasla za 3.91 °C (sa 11.81 na 15.72 °C) [40].

Elektroprovodljivost voda u tunelu iznosila je od 443 do 7700 µS/cm. Razlike u parametru EC ukazuju na različite veličine mineralizacija podzemnih voda, gde se vode sa stacionaža 1+815 m, 1+970 m i 4+230 m odlikuju najvećim vrednostima EC, a samim tim i ukupnim sadržajem rastvorenih mineralnih materija. Najveće promene provodljivosti, nakon perioda od mesec dana, su uočene na lokacijama sa najvećim mineralizacijama, gde je provodljivost podzemnih voda sa 4494 µS/cm dostigla vrednost od 10200 µS/cm (stacionaža 4+230 m). Međutim, momenat merenja vrednosti EC na ovoj stacionaži tokom 3. serije uzorkovanja pokazale su mineralizaciju od 7700 µS/cm [40].

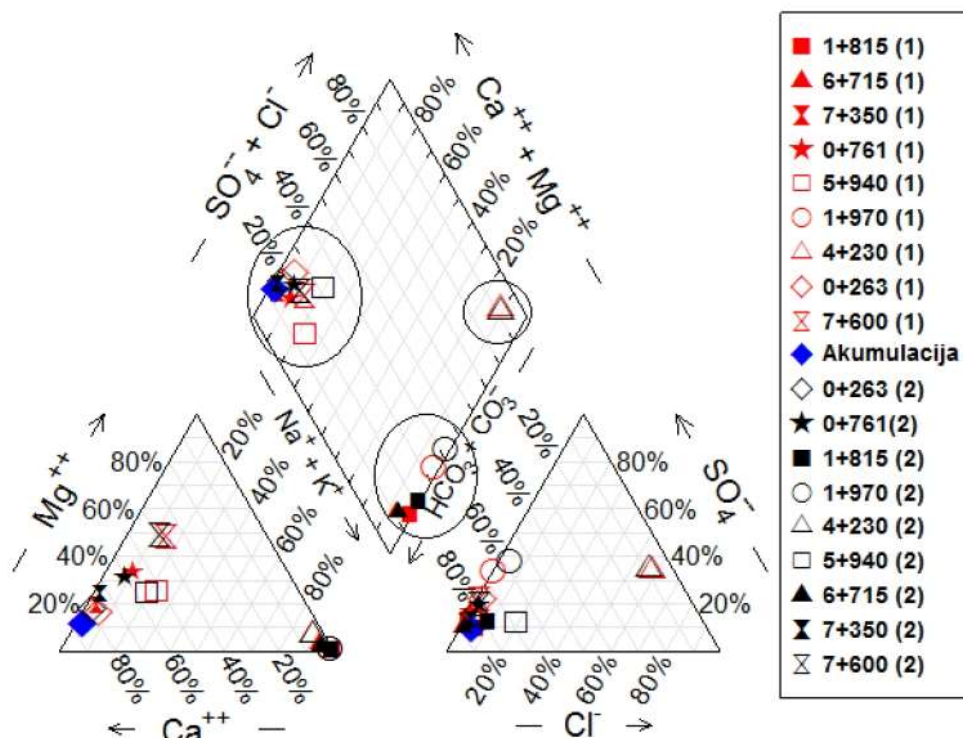
Oksido-reducionog potencijala pokazuje značajne oscilacije tokom perioda od mesec dana, kada su vršena merenja. ORP analiziranih pojava je u intervalu od -277 do +428 mV. Ovakve vrednosti ukazuju na to da se jedan deo analiziranih podzemnih voda nalazi u izdanima u kojima vladaju redukcionni uslovi, ili prelazni oksido-redukcionni uslovi (negativne ORP vrednosti), dok se

oksidacioni uslovi ostvaruju u izdanima koje su u kontaktu sa atmosferom (pozitivne ORP vrednosti). Generalno, površinske vode se odlikuju višim redoks potencijalima od podzemnih voda, pa se pod uticajem utiskivanja vode iz jezera ovaj parametar značajno menja. Takođe, do promene redoks-potencijala dolazi i usled promena režima rada samog hidrotehničkog tunela. U tom smislu, najočiglednije promene se dešavaju na stacionažama 1+970, 4+230 i 7+600 m, kada se tokom perioda isključenog tunela/tunel van funkcije, vrednost ORP vraća na prirodno stanje (teži redukcionim uslovima u izdani) [40].

Promena hemijskog sastava podzemnih voda uzorkovanih na 10 odabranih lokacija/stacionaža tunela ukazali su na dosta dinamičan proces izmene određenih anjona i katjona u toku procesa vaćanja hidrogeološke sredine u svoje prirodno stanje, odnosno smanjenja/isticanja voda utisnute akumulacione vode.

Ukupna mineralizacija voda, izražena kao parametar TDS (računski na osnovu sadržaja anjona i katjona) je bio u opsegu od 419 mg/L (stacionaža 7+600 m) do 5947 mg/L (stacionaža 4+230 m), što odgovara promenama parametra EC merenom *in-situ*. Pri takvom dijapazonu mineralizacija, očekivana su variranja koncentracija pojedinačnih elemenata u podzemnim vodama, što uslovljava i pojavu različitih tipova podzemnih voda [40].

Na pojedinim stacionažama gde su vršene tri serije uzorkovanja (sa uključenjem 2. serije, na polovini osmatračkog perioda) 2 serija uzorkovanja pokazala se kao izuzetno važna jer je u tom trenutku došlo do prelomnog momenta koji je pokazao drugačije promene, nego kada bi se posmatrao samo period od 1. do 3. serije. Obzirom da su na svim razmatranim stacionažama uzorkovane vode tokom 1. i 3. serije, osnovni hemijski sastav voda iz tunela je prikazan na zajedničkom Pajperovom dijagramu tokom uzorkovanja samo ove dve serije (stacionaže sa oznakom (1) su uzorkovane pri prvom ulasku u tunel – serija 1, dok su vode sa oznakom (2) uzorkovane mesec dana kasnije – serija 3) (slika IV.72) [40].



Slika IV.72. Pajperov dijagram hemijskog sastava voda iz tunela i akumulacionog jezera. Legenda: Datum uzorkovanja (1) – 21/09/2016, (2) – 21/10/2016 [40].

Na trilinearnom dijagramu se uočavaju tri grupe voda koje se razlikuju prema hemijskom tipu vode (zaokružena područja): Ca/Mg-HCO₃, Na-HCO₃ i Na-Cl. Dve veće grupe se odlikuju dominantnom zastupljenošću hidrokarbonatnog jona kao osnovnog anjona, dok se u pogledu katjanskog sastava izdvaja jedna grupa u kojoj preovlađuju Ca+Mg joni (0+263, 0+761, 5+940, 7+350 m) i druga grupa u kojima preovlađuju Na joni (1+815, 1+970, 6+715 m) (slika IV.110). Treći tip vode predstavlja uzorak sa stacionaže 4+230 m, gde Cl joni imaju dominantnu zastupljenost u osnovnom sastavu, dok u katjanskom sastavu preovlađuju Na joni. Kako su na dijagramu prisutna preklapanja pojava i mogu se uočiti blage promene hemijskog sastava tokom vremena, prikazana je detaljna analiza promena po uzorkovanim stacionažama tunela u Poglavlju 3.2.6.1 [40].

2.2.6.2. Promene anjanskog i katjanskog sastava voda po stacionažama tunela

0+263 m. Uzorkovanje voda je izvršeno u levom boku hidrotehničkog tunela. Ove vode su malomineralizovane, hidrokarbonatno-kalcijumske i potiču iz krečnjaka srednjetrijske starosti. Pri prvom uzorkovanju, SO₄ joni su u osnovnom sastavu imali značajan udeo (Ca-HCO₃-SO₄ tip vode), dok je mesec dana kasnije (3. serija) došlo do smanjenja koncentracije SO₄ i ukupne TDS vrednosti. Pored smanjenja koncentracije SO₄, uočava se i smanjenje u koncentraciji Na jona. Posledica ovakve promene hemijskog sastava podzemnih voda uzorkovanih na ovoj stacionaži izazvana je blizinom akumulacionog jezera koji usled oslobađanja pritiska transportovane tunelske vode na geološku/hidrogeološku sredinu direktno utiče na njene kvalitativne karakteristike. To potvrđuje i hemijski tip voda uzorkovanih iz akumulacionog jezera (Ca-HCO₃ tip) koji je dominantan i na stacionaži 0+236 tokom 3. serije uzorkovanja. Veliki uticaj voda akumulacionog jezera na kvalitativne karakteristike voda stacionaže 0+263 vidljiv je i na Pajperovom dijagramu (slika IV.110). Povišen sadržaj SO₄ jona u toku 1. serije uzorkovanja posledica je visokog stanja podzemnih voda u ovoj zoni tunela, koje je detektovano na piježometru PP-1 (odgovara stacionaži tunela 1+400 m) a kasnije i na vodama sa stacionaža koje odgovaraju zoni piježometra PP-1. Visok sadržaj mikroelementa stroncijuma i opadanje njegove koncentracije sa 5.8 mg/L (1. serija) na 3.9 mg/L (3. serija) ukazuje na potencijalno slično poreklo sa vodama stacionaže 4+230 m (objašnjenje dato u nastavku, kroz analizu voda uzorkovanih na stacionaži 4+230) [40].

0+761 m. Vode uzorkovane iz desnog boka tunela bile su malomineralizovane i pri uzorkovanju u dva navrata nije dolazilo do značajnijih promena mineralizacije (592.5 mg/L – 602.7 mg/L). Stabilnost u osnovnom sastavu se ogleda u nepromenjenom tipu vode: Ca-Mg-HCO₃, i odgovara kvalitetu voda iz krečnjačkih stena.

Promene koje su nastupile tokom perioda od mesec dana ogledaju se u povećanju koncentracije Cl jona i smanjenju koncentracije jona NO₃, što je verovatno rezultat povratka prirodnog kvaliteta izdanskih voda [40].

1+815 m. Vode su uzorkovane iz desnog boka hidrotehničkog tunela i hidrokarbonatno – natrijumskog su tipa (Na-HCO₃) a tokom vremena nisu pokazale promene u tipu vode (tabela IV.40). Što se tiče mineralizacije, voda je visoko mineralizovana, i vodi poreklo iz konglomerata i peščara donjojurske starosti. Od navedene stacionaže, uočen je miris gasa H₂S, što je laboratorijskim analizama uzorkovanih voda na ovoj stacionaži tunela i dokazano. Količina izdvojenog H₂S gasa iznosio je 33.2 mg/L tokom 3. serije uzorkovanja (u 1. seriji uzorkovanja nije vršeno izdvajanje ovog gasa) što ukazuje na priliv sulfatnih podzemnih voda u ovoj zoni.

Promene u hemijskom sastavu se odražavaju najviše kroz promenu koncentracije hlorida i sulfata, gde dolazi do povećanja koncentracije ovih jona na vodama uzorkovanim u 3. seriji. Merjenja

multiparametarskom sondom su na ovoj lokaciji pokazale promene pH i ORP vrednosti, koje su najverovatnije posledica oksidacije sulfida, odnosno redukcije sulfata koji dolaze u podzemne vode usled rastvaranja evaporita, gipasa i/ili anhidrita. S obzirom na već pomenuto poreklo Cl jona na ovoj stacionaži tunela, njegove koncentracije u podzemnoj vodi u ovom delu tunela ne mogu se vezivati za direktno rastvaranje halita. U prilog tome idu i dosta niske koncentracije Sr od 0.2 mg/L. Međutim sadržaj litijuma je značajan (0.24-0.22 mg/L) i izmerene veće koncentracije tokom 3. serije uzorkovanja u odnosu na 1. seriju ukazuju da na kvalitet voda ove stacionaže najverovatnije utiče radni režim tunela, tako što izdiže vode sa stacionaže 4+230 m povišene mineralizacije i sadržaja Cl i SO₄ jona i jona Li čija koncentracija u morskim vodama iznosi oko 0.1 mg/L (najveće koncentracije detektovane na st. 4+230 m od 1.12 mg/L) u više slojeve hidrogeološke sredine [40].

1+970 m. Vode uzorkovane iz levog boka hidrotehničkog tunela su bile visoko mineralizovane (2183 – 1978 mg/L), i vode poreklo iz konglomerata i peščara donjojurske starosti. Voda je Na-HCO₃-SO₄ tipa, i u njoj je utvrđen visok sadržaj gasa H₂S izdvojen tokom 2. i 3. serije uzorkovanja. U toku 2. serije izdvojeno je 40 mg/L ovog gasa dok je u toku 3. serije izdvojeno 25 mg/L H₂S-a. Ovakve promene H₂S gasa pratile su i promene SO₄ jona čija koncentracija je porasla tokom 2. i 3. serije uzorkovanja [40].

4+230 m. Vode su uzorkovane iz levog boka hidrotehničkog tunela. Vode sa ove stacionaže imale su najvišu mineralizaciju registrovanu u tunelu (TDS: 5815 – 6721 mg/L), jedinstvene po tome što u njihovom osnovnom sastavu značajan udeo imaju hloridni joni. Prema hemijskom tipu, voda je Na-Cl-SO₄.

Dominantno prisustvo Na, Cl i SO₄ jona u visokim koncentracijama tokom celog perioda pražnjenja hidrogeološke sredine ukazuje da je poreklo podzemnih voda uzorkovanih na ovoj stacionaži najverovatnije vezano za razlaganje sedimenata morskog porekla formiranih u toku gornje jure i donje krede.

Hemijski sastav podzemnih voda sa ove stacionaže je pokazao male oscilacije tokom perioda od mesec dana, ali posebno značajne tokom 2. serije uzorkovanja. Najveće koncentracije Na, Cl i SO₄ jona zabeležene su tokom ove serije uzorkovanja i ovaj trenutak oslikava prirodne karakteristike podzemnih voda, na čiji kvalitet više ne utiče prethodno intrudovana transportovana tunelska/akumulaciona voda. Međutim, smanjenje ovih jona u toku 3. serije uzorkovanja najverovatnije je posledica kišne epizode koja se javila u ovom periodu i izazvala izdizanje nivoa podzemnih voda (detektovano na piježometru PP-3) odnosno razblažila prirodnu visokomineralizovanu vodu (i smanjenje NO₃ jona).

Na ovoj stacionaži tunela (4+230 m) uzorkovana voda je jedina koja je sadržala značajnu koncentraciju Li jona od 1.12 mg/L, dok je sadržaj Sr jona iznosio 7.1 mg/L čije koncentracije su praćene povišenim koncentracijama Ca jona od 71 mg/L. Povišen sadržaj jona dva mikroelementa može biti važan indikator porekla podzemnih voda, odnosno povišene koncentracije jona litijuma i stroncijuma često ukazuju na prisustvo slanih voda [40].

5+940 m. Vode uzorkovane iz levog boka hidrotehničkog tunela su bile malomineralizovane (614.1 – 673.5 mg/L), specifičnog hemijskog sastava, što odgovara litološkim formacijama, jer se u ovom delu tunela smenjuju krečnjaci i peščari. Prilikom prvog uzorkovanja, voda je bila Ca-Mg-Na-HCO₃ tipa, dok je nakon mesec dana došlo do smanjenja koncentracije Na jona i povećanja Cl jona, pri čemu je voda prešla u Ca-Mg-HCO₃-Cl tip.

Povećanje hloridnog jona može biti rezultat mešanja voda sa visokomineralizovanim vodama sa stacionaže 4+230 m, odnosno rezultat povratka prirodnog režima podzemnih voda. Podzemna voda koja ističe na ovoj stacionaži je specifična po povišenoj temperaturi od 17.09 °C, što ujedno predstavlja i najvišu izmerenu temperaturu vode u tunelu [40].

6+715 m. Voda je uzorkovana iz desnog boka hidrotehničkog tunela. Po hemijskom tipu u pitanju je hidrokarbonatno–natrijumska voda (Na-HCO_3) i vodi poreklo iz silifikovanih krečnjaka i pešćara gornjokredne starosti. Voda je malomineralizovana (697 – 702 mg/L) i odražava postojan karakter hemijskog sastava. Tokom osmatračkog perioda od mesec dana, može se uočiti povećanje Cl jona i smanjenje NO_3 jona. Kako se radi o malomineralizovanoj vodi, pretpostavlja se da povećanje koncentracije Cl nastaje kao posledica uticaja veštački utisnutih mineralizovanih podzemnih voda sa stacionaže 4+230 m i njihovog postepenog ocedivanja i povratka prirodnog kvaliteta podzemnih voda.

Na veštački uticaj promene kvalitativnih karakteristika podzemnih voda na ovoj stacionaži ukazuje i promena temperature vode u toku 3 serije uzorkovanja. Tokom 1. serije uzorkovanja temperatura vode je iznosila 11 °C dok je već na 2. seriji a kasnije i 3. seriji uzorkovanja temperatura porasla na 15.7 °C što je najverovatnije pokazatelj prirodnog temperaturnog režima podzemnih voda. Takođe, ova voda pokazuje najbliži temperaturni karakter sa vodom sa stacionaže 5+940 m, što je verovatno posledica formiranja toka isticanja voda iz regionalnih/dubokih hidrogeoloških sistema duž zone Vidličke navlake [40].

7+060 m. Vode uzorkovane iz levog boka tunela su bile malomineralizovane (475 – 481 mg/L) i vode poreklo iz krečnjaka i dolomita srednjetrijaske starosti. Voda je Ca-Mg-HCO_3 tipa i povišene temperature od 14°C koja ukazuje na prisustvo prelaznog/intermedijarnog hidrogeološkog sistema. Na ovoj stacionaži vrešeno je uzorkovanje voda samo tokom 2. i 3. serije i hemijske karakteristike ovih voda su bile dosta stabilne, bez značajnijih promena jonskog sastava. Jedino je konstatovan blagi porast SO_4 jona tokom poslednjeg uzorkovanja koje je pratilo i pojavu H_2S gasa u ovoj zoni tunela (32 mg/L). Pojava gasa vodonik-sulfida ukazuje na prisustvo redukcionih uslova sredine (odsustva kiseonika) i nastaje u procesu redukcije SO_4 jona koji je u hidrohemijskom ciklusu veoma nestabilan jon.

7+350 m. Voda uzorkovana iz podine tunela gde se nalazi Čombetov izvor, iz koga preko 3 ugrađene cevi konstantno ističe podzemna voda u ispražnjen tunel. Na navedenoj lokaciji postoji veliki priliv voda u tunel male mineralizacije (483 - 497.7 mg/L) i povišene temperature od 14°C. Tokom prvog merenja, voda je bila hidrokarbonatno-kalcijumska, dok je pri 2. i 3. seriji merenja značajan udeo u sastavu imao Mg jon, što je uslovalo promenu tipa vode na Ca-Mg-HCO_3 . Hemijski sastav ovih voda litološki odgovara krečnjačim stenama sa dolomitičnom komponentom. U jonskom sastavu, pored povećanja koncentracije Mg, tokom vremena, uočljivo je povećanje koncentracije Cl jona i smanjenje Na jona [40].

7+600 m. Voda je uzorkovana iz levog boka hidrotehničkog tunela. Voda sa ove stacionaže se odlikuje najnižom mineralizacijom (419 – 430 mg/L), ali sadrži visoku koncentraciju SO_4 jona. Hemijski sastav vode najverovatnije potiče od krečnjaka sa dolomitima i laporcima srednjeg trijasa. Prilikom prvog merenja koncentracija sulfata je iznosila 57.5 mg/L i voda je tada bila $\text{Mg-Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ tipa. Prilikom drugog i trećeg merenja, koncentracija SO_4 je neznatno smanjena i iznosila je 55/54 mg/L, što je uslovalo promenu tipa vode (Mg-Ca-HCO_3). Na odvijanje procesa redukcije sulfata ukazuje i promena ORP vrednosti, gde su od oksidacionih nastupili prelazni oksido-redukcionni uslovi (ORP: 74.5 do -5 mV) [40]. Zbog visokih sadržaja sulfatnih jona i promene oksido-redukcionnog potencijala, došlo je do izdvajanja H_2S gasa u ovoj zoni tunela, ali u dosta manjim koncentracijama

nego u ostalim zonama tunela (0.15 mg/L). Posebno je važan sadržaj mikroelementa stroncijuma u vodama uzorkovanim sa ove stacionaže tunela. Na stacionaži 7+600 m detektovane su najveće koncentracije Sr jona u vrednosti od 9.6 mg/L tokom druge serije uzorkovanja, veće nego i na stacionaži 4+230 m. U ovim vodama ne postoje značajno velike koncentracije Ca jona, kao ni jona litijuma, pa se poreklo stroncijuma u ovom delu tunela može vezati za glinovito-karbonatne stene čijim rastvaranjem može doći do stvaranja Sr jona u podzemnim vodama [13].

2.2.2.7. Komparativna analiza uzorakovanih voda u tunelu i pijezometrima u periodu remonta tunela

Duž same trase tunela pojavljuju se podzemne vode različitih fizičko-hemijskih karakteristika, što je detaljno prikazano u Poglavlju 2.2.2.6. Međutim u okviru ovog poglavlja izvršeno je poređenje hemijskog sastava podzemnih voda u tunelu sa:

- Vodama koje se pojavljuju na okolnim stacionažama, kako bi se definisale vode iz istih sistema;
- Hemijskim sastavom voda koje se utiskuju u geološku/hidrogeološku sredinu (analiza akumulacione vode iz jezera Zavoj, uzorkovana u šahti zatvaračnice), kako bi se odredilo u kojoj meri akumulaciona voda utiče na sastav podzemnih voda;
- Pijezometrima (PP-1, PP-3, PP-4) kako bi se odredili pravci cirkulacije podzemnih voda [40].

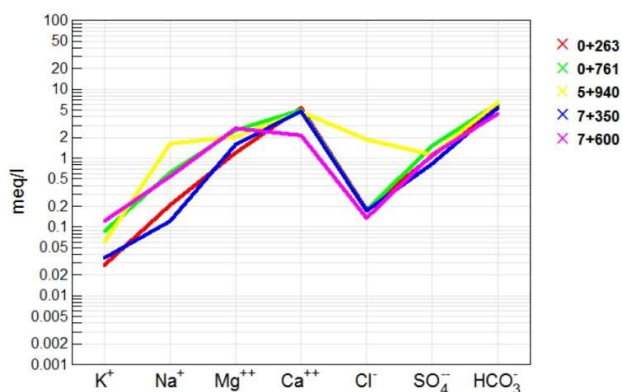
Tabela IV.41. Uprošćen prikaz rasporeda hemijskih tipova vode prema stacionažama tunela (m) [40]

Objekat	Akum	PP-1				PP-3				PP-4		
Hem. tip voda	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃				Na-HCO ₃				Ca-CO ₃		
Stac. (m)		0+ 236	0+ 761	1+ 815	1+ 970	4+ 230	5+ 940	6+ 715	7+ 060	7+ 350	7+ 600	
Hem. tip voda		Ca-HCO ₃		Na-HCO ₃		Na-Cl	Ca-HCO ₃	Na-HCO ₃	Mg-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Mg-HCO ₃	
Litol ogija		krečnjaci i dolomitični krečnjaci		tankoslojeviti bituminozni krečnjaci		laporoviti krečnjaci	peskoviti krečnjaci i peščari		krečnjaci, silifikovani i tektonizirani krečnjaci			

Na osnovu jednog (dominantnog) anjona i katjona, razlikuju se četiri grupe voda: Ca-HCO₃ vode obuhvataju pojave sa stacionaža 0+263, 0+761, 5+940 i 7+350 m; Na-HCO₃ vode se nalaze na stacionažama 1+815, 1+970 i 6+715 m; Mg-HCO₃ vode su locirane na stacionažama 7+060 i 7+600 m; Na-Cl voda se pojavljuje na stacionaži 4+230 m koja za sada predstavljaju jedinstven tip voda u tunelu [40].

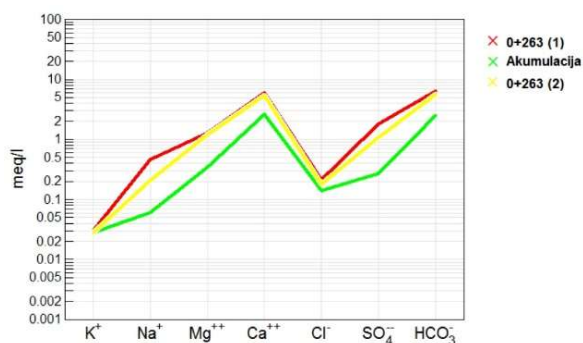
Na Schoeller-ovim dijagrama je dat uporedni prikaz osnovnog hemijskog sastava voda, grupisanih u iste generalne tipove. U grupi Ca-HCO₃ voda najveću sličnost u hemizmu pokazuju vode sa stacionaža 0+263 m i 7+350 m (slika IV.100). Dok se vode koje se pojavljuju na stacionažama 0+761 m i 7+600 m od ove grupe razlikuju po katjonskom sastavu (pre svega Mg jon učestvuje kao važan katjon). Sličnost u hemizmu ovih voda se ogleda u geološkoj građi: od 0 do 0+810 m preovlađuju krečnjaci i dolomitični krečnjaci, i u zoni tunela 7+015 m do 7+780 m se nalaze srednjetrijaski krečnjaci i silifikovani i tektonizirani jurski krečnjaci. U zoni tunela od 5+665 do 6+100 m su kartirani

peskoviti krečnjaci i peščari, što je uslovalo da se podzemne vode koje se pojavljuju na lokaciji 5+940 razlikuju od ove grupe vode (slika IV.73). Pojava sa ove stacionaže je specifičnog, složenog sastava (Ca-Mg-HCO₃-Cl tipa prilikom poslednje serije uzorkovanja) [40].

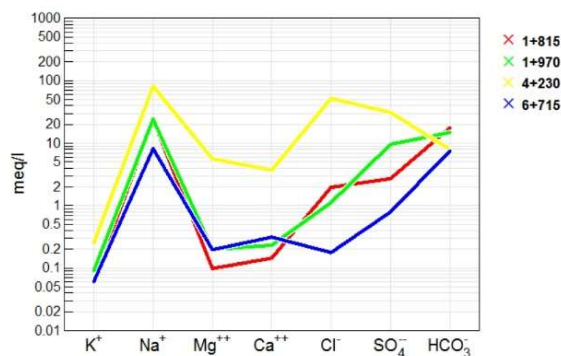


Slika IV.73. Schoeller-ov dijagram voda koje čine grupu Ca-HCO₃ voda (na osnovu osnovnog anjona i katjona) [40]

Međutim, na osnovu slike IV.74 se može pretpostaviti postojanje uticaja voda iz akumulacionog jezera na kvalitet voda sa stacionaže 0+263 m. Vode se stacionaže 0+263 m se odlikuju višim koncentracijama razmatranih elemenata, što ukazuje na duži boravak voda u geološkoj sredini, odnosno da postoji priliv podzemnih voda u ovoj deonici tunela [40].



Slika IV.74. Schoeller-ov dijagram voda iz akumulacionog jezera is a stacionaže 0+263 m. Legenda: 1 - 18/09/2016. ustaljen režim rada tunela; 2 – 22/10/2016. tunel nije u funkciji mesec dana [40]

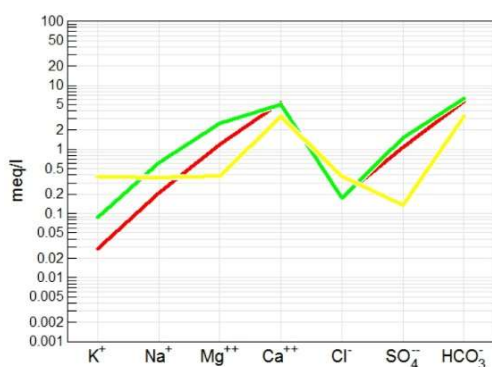


Slika IV.75. Schoeller-ov dijagram voda koje čine grupu Na-HCO₃ voda (na osnovu osnovnog anjona i katjona) i voda sa stacionaže 4+230 m [40]

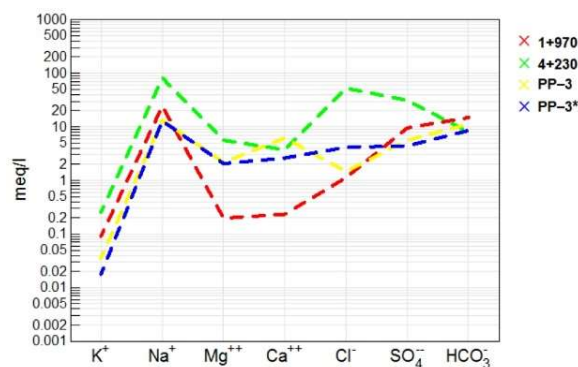
Drugu grupu voda čine vode natrijumske grupe (slika IV.75). Pojave sa stacionaža 1+815 i 1+970 m se geološki pojavljuju u ispucalim peščarima, laporcima i laporovitim peščarima i može se pretpostaviti da ove pojave pripadaju istoj strukturnoj zoni. Deonica tunela 4+100 do 4+340 m je izvedena kroz krečnjake i laporovite krečnjake, a na stacionaži 4+230 m je registrovan priliv podzemnih voda sa vrlo visokim koncentracijama koje čine Na-Cl-SO₄ tip voda [40]. Neminovno je da povišen sadržaj Na, Cl i SO₄ jona ne može nastati u kontaktu samo krečnjačkih stena već najverovatnije u neposrednoj blizini ove stacionaže tunela postoji pojava evaporitskih stena (halita, gipsa, anhidrita)–Na deonici tunela 6+715 m se ponovo pojavljuje voda Na-HCO₃ tipa sa znatno nižom mineralizacijom, čija je izdan formirana u peskovitim krečnjacima i peščarima koji se nalaze na deonici 6+665 do 6+745 m. Ova voda se od pojava podzemnih voda na deonicama 1+815 – 1+970 m razlikuje po znatno nižim koncentracijama SO₄ i Cl (slika IV.75) [40].

Osmatrački objekat, pijezometar PP-1 se nalazi na delu tunela koji odgovara stacionaži 1+400 m, i pošto je generalnog Ca-HCO₃ tipa upoređen je sa vodama koje se pojavljuju u prvom kilometru tunela, istog hemijskog tipa voda (slika IV.76). Analizirani su hemijski sastavi za isti vremenski period, odnosno hemijski sastav voda u PP-1 koji odražava karakter voda kada tunel nije u funkciji. Na osnovu grafika se uočava da vode iz pijezometra samo delimično odražavaju karakter voda sa stacionaža 0+263 i 0+761 m [40].

Pijezometar PP-3 se nalazi na delu tunela koji odgovara stacionaži 4+200 m i ima veoma dobru komunikaciju sa vodama iz tunela (slika IV.77), kada u trenutku punjenja tunela hemijski sastav vode iz PP-3 prati oblik dijagrama sa stacionaže 4+230 m. Na istom dijagramu je dat prikaz hemijskog sastava za stacionažu 1+970 m, koja ima sličan oblik dijagrama, ali se odlikuje znatno manjom mineralizacijom [40].

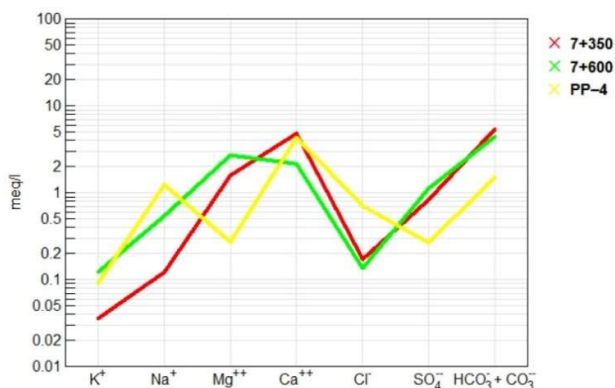


Slika IV.76. Schoeller-ov dijagram hemijskog sastava voda sa pijezometra PP-1 i stacionaža 0+236 i 0+761 m [40]



Slika IV.77. Schoeller-ov dijagram hemijskog sastava voda sa pijezometra PP-3 i stacionaža 1+970 i 4+230 m u trenutku kada tunel nije u funkciji (PP-3* u trenutku punjenja tunela) [40]

Ovakav uporedni dijagram stacionaža 1+970 (odgovara PP-1) i 4+230 (odgovara PP-3) indicira postojanje visokog stepena zavisnosti cele zone. Pijezometar PP-4 se nalazi na delu tunela koji odgovara stacionaži 7+380 m, na kojoj se pojavljuje snažan priliv podzemnih voda i to iz podine tunela (Čombeov izvor). Međutim, vode koje se pojavljuju na stacionažama 7+600 m i 7+350 m se prvenstveno odlikuju značajno višim koncentracijama Mg u odnosu na vode iz pijezometra PP-4 (slika IV.78), što može da ukaže na dublje uslove cirkulacija voda koje imaju priliv u tunel [40].



Slika IV.78. Schoeller-ov dijagram hemijskog sastava voda sa pijezometra PP-4 i stacionaža 7+350 i 7+600 m u trenutku kada tunel nije u funkciji [40]

Međutim, jasna slika odsustva direktne povezanosti voda uzorkovanih u PP-4 i voda sa odgovarajućih stacionaža tunela ukazuje da ovaj pijezometar nema dobru komunikaciju sa hidrotehničkim tunelom, i ne može poslužiti kao pouzdan za analizu prirodnog stanja izdani.

2.2.8. Komparativna analiza uzorakovanih voda zahvaćenih u tunelu, pijezometrima i izvorima

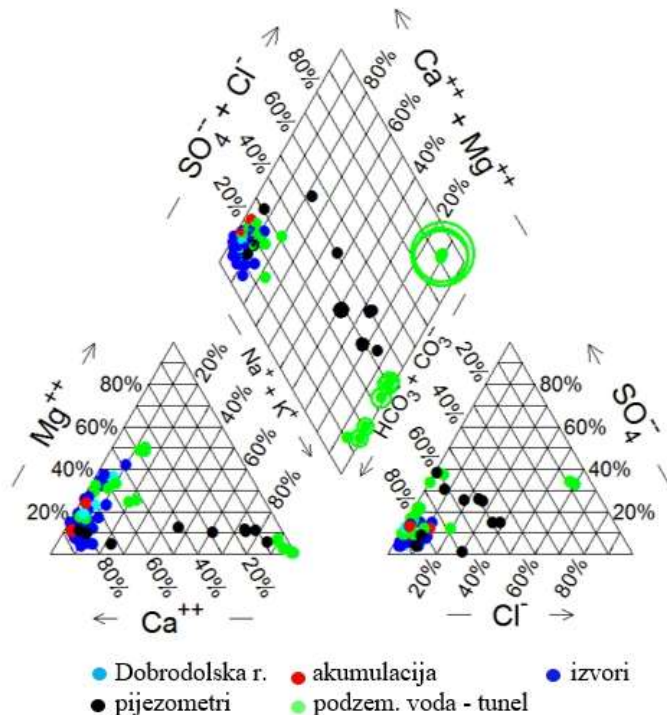
Analiza rezultata uzorkovanih voda zahvaćenih u tunelu i pijezometrima na trasi tunela ukazale su na velike varijacije hemijskih/kvalitativnih karakteristika podzemnih voda izazvanih radom hidrotehničkog tunela. Međutim, iako analiza rezultata uzorkovanih voda na izvorima u potencijalnoj zoni uticaja tunela pod pritiskom nije ukazala na njihovu direktnu zavisnost, njihova uporedna analiza sa vodama uzorkovanim u tunelu i pijezometrima je od posebnog značaja za definisanje prirodnih hidrohemijskih karakteristika podzemnih voda. Definisanje prirodnih uslova hidrogeološke sredine urađeno je na osnovu analize njihovih kvalitativnih karakteristika u periodu kada je tunel bio van funkcije (tabela IV.42).

Tabela IV.42. Uprošćen prikaz rasporeda hemijskih tipova vode prema stacionažama tunela, u tunelu, pijezometrima i izvorima

Izvor						Do bri Do	Niš or 1/2	Gla me	Dag Banji ca						Izvor/ Berilo vac
Hemij ski tip voda						Ca- HC O ₃	Ca- HC O ₃	Ca- HC O ₃	Mg- HCO ₃						Ca- HCO ₃
Litolo gija						krečnjaci, laporci i peščari			krečn jaci i dolo miti						krečnj aci, laporc i i peščar i
Obje kat	Ak um	PP-1			PP- 3					PP -4					
Hemij ski tip voda	Ca- HC O ₃	Ca- HCO ₃			Na- HC O ₃					Ca- CO 3					
Stac. (m)	0+236		0+7 61	1+8 15	1+9 70	4+2 30	5+940		6+7 15	7+0 60	7+3 50	7+6 00			
Hemij ski tip voda	Ca-HCO ₃			Na-HCO ₃		Na-Cl	Ca-HCO ₃		Na-HCO ₃	Mg-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Mg-HCO ₃			
Litolo gija	krečnja ci i dolomit ični krečnja ci		tankoslojeviti bituminozni krečnjaci			laporoviti krečnjaci	peskoviti krečnjaci i peščari			krečnjaci, silifikovani i tektonizirani krečnjaci					

Podzemne vode uzorkovane na izvorima karakterišu se najmanjim prosečnim vrednostima EC od 452 $\mu\text{S}/\text{cm}$, odnosno mineralizacijom koja upravo definiše proces kontakta vode i određene stene. Sve analizirane vode su hidrokarbonatno-kalcijumskog (magnezijskog) tipa, što ukazuje da su zone formiranja, cirkulacije i isticanja ovih voda vezane za pojavu krečnjačkih i dolomitičnih stena.

Vode uzorkovane u piježometrima na trasi tunela karakterišu se prosečnom vrednošću elektroprovodljivosti od 740 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Međutim, ovakva srednja vrednost EC parametra je isključivo posledica visoke mineralizacije podzemnih voda uzorkovanih u piježometru PP-3 (1472 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Na piježometru PP-1, EC vrednost je iznosila 237 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a na piježometru PP-4 samo 130 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Različita elektroprovodljivost u uzorkovanim vodama očigledno je prouzrokovana različitim formacijama u okviru kojih dolazi do formiranja podzemnih voda, što je i uslovalo pojavu raličitih tipova voda u sva tri razmatrana piježometra. U piježometru PP-1 podzemne vode su bile Ca-HCO_3 tipa, u PP-3 Na-HCO_3 tipa a u PP-4 Ca-CO_3 tipa. Vode uzorkovane u tunelu imaju naviše vrednosti EC, prosečno 1651 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sa najvećim vrednostima EC na stacionaži 4+230 (10200 $\mu\text{S}/\text{cm}$) odnosno najmanjim vrednostima na stacionaži 7+600 (445 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Upravo ovako visoka mineralizacija voda uzorkovanih na st. 4+230 m posledica je rastvaranja evaporitskih sedimenata, dok su vode sa st. 7+600 m formirane u karbonatnim sedimentima (slika IV.79).



Slika IV.79. Pajperov dijagram hemijskog sastava voda svih uzorkovanih voda (izvori, piježometri, tunel)

Prisustvo različitih tipova podzemnih voda ukazalo je na nastojanje kompleksnog hidrogeološkog sistema u kojima pod različitim uslovima dolazi i do formiranja podzemnih voda različitih kvalitativnih karakteristika.

2.3. Analiza rezultata stepena agresivnosti podzemnih voda na stanje betonske obloge tunela

Agresivnost vode najčešće je uslovljena prisustvom jona vodonika (kisele vode), slobodnog ugljendioksida, sadržaja/koncentracije jona sulfata, hlorida, magnezijuma. Agresivno dejstvo podzemnih voda na beton, pre svega se posmatra kroz sposobnost vode da ruši/razlaže različit građevinski materijal (u prvom redu beton), a i da agresivno deluje na metalne konstrukcije. Detaljna analiza kvalitativnih karakteristika podzemnih voda uzorkovanih u tunelu sa 10 stacionaža ukazale su na potencijalno ugrožene zone sa aspekta agresivnosti podzemnih voda na betonsku oblogu.

Na osnovu razmatranih standarda uočeno je da su najagresivnije vode na betonsku konstrukciju uzorkovane na stacionaži 4+230 m u hidrotehničkom tunelu posmatrano kroz prisutnost povišene koncentracije hloridnih i sulfatnih jona. Takođe vode sa stacionaža 1+970 m pokazuju sulfatnu agresivnost na oblogu tunela. Stoga se ove dve stacionaže tunela smatraju trenutno najranjivijim sa aspekta stabilnosti hidrotehničkog tunela. S obzirom da je na ovoj stacionaži iz uzorkovanih voda izdvojena i najveća koncentracija H_2S gasa (40 mg/L), prisustvo ovog gasa i na stacionažama 1+815 m i 7+060 u vrednostima od 33 i 32 mg/L ukazuju na potencijalno sulfatno-agresivno dejstvo uzorkovanih voda na betonsku oblogu tunela i u ovim sekcijama razmatranog objekta [17].

V DISKUSIJA

1. Definisanje konceptualnog modela sa pretpostavljenim granicama uticaja tunela pod pritiskom na geološku/hidrogeološku sredinu

Na osnovu detaljno sprovedene analize rezultata kvantitativnih karakteristika podzemnih voda osmotrenih na svim hidrogeološkim pojavama i objektima uspostavljen je konceptualni model interakcije transportovanih tunelskih voda pod pritiskom i hidrogeološke sredine. Osnovni cilj ovog modela jeste određivanje radijusa dejstva transportovane tunelske vode na okolnu geološku/hidrogeološku sredinu, u odnosu na osu tunela.

Kao prvi korak rešavanja zadatog problema, tj. definisanja veličine radijusa dejstva tunela, izračunata je zapremina vode koja ispunjava samo zapreminu tunela, koji po dimenzijama predstavlja valjak, konveksno geometrijsko telo. Pored zapremine valjka, u proračun je uzeta i zapremina vode koja se nalazi u delu šahte zatvaračnice i vodostana kada je tunel pod pritiskom, koji su po geometriji isto valjkastog oblika.

- Zapremina vode u tunelu:

$$V = r^2 \cdot \pi \cdot H = 2,25^2 \cdot 3,14 \cdot 9093 = \mathbf{144.545 \text{ m}^3}$$

- Zapremina vode u šahti zatvaračnice:

$$V = r^2 \cdot \pi \cdot H = 4^2 \cdot 3,14 \cdot 43,37 = \mathbf{2.179 \text{ m}^3}$$

- Zapremina vode u vodostanu:

$$V = r^2 \cdot \pi \cdot H = 7,5^2 \cdot 3,14 \cdot 61,77 = \mathbf{10.910 \text{ m}^3}$$

Ukupna zapremina voda koja se nalazi u punom tunelu, posmatrano kao potpuno izolovan objekat u odnosu na hidrogeološku sredinu iznosi:

$$V = \mathbf{157.634 \text{ m}^3}$$

Određivanje vremena koje je potrebno da bi se ova zapremina iz tunela ispraznila (bez pražnjenja hidrogeološke sredine) izvršeno je proračunom preko jednačine određivanja proticaja (zapreminska metoda):

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

U jednačini (1), Q predstavlja ukupni instalisani protok hidroelektrane, odnosno maksimalni proticaj kojim se prazni tunel i koji iznosi 45 m³/s. Preračunavanjem zadate zapremine i proticaja, primenom navedene jednačine, dobijeno vreme koje je potrebno da bi se tunel ispraznio iznosi 3503 sekunde, odnosno 58.38 minuta (0.97 h).

U praksi, za vreme merenja sumarnih gubitaka, ako se razmatraju samo 4 ispuštanja u trajanju od 30 minuta koja se vrše tokom ovog testa, potrebno je 2 h da se tunel isprazni. Međutim, u toku merenja sumarnih gubitaka, postoji konstantan dotok vode u tunel iz hidrogeološke sredine što svakako utiče na vreme pražnjenja.

Kako bi se definisala zapremina vode koja je utisnuta u hidrogeološku sredinu tokom radnog režima tunela (pod pritiskom) korišćeni su podaci o izmerenim kvantitativnim karakteristikama podzemnih voda u periodu kada je tunel bio van funkcije i hidrogeološka sredina oslobođena od pritiska transportovane tunnelske vode. Kao reprezentativni podaci za oslikavanje dinamike pražnjenja hidrogeološke sredine uzeti su izmereni proticaji na 4. vodomernom profilu u tunelu na stacionaži 8+530 m, kanalu izlazne građevine i sniženja nivoa na piježometrima PP-1 i PP-3.

Pražnjenje/isticanje hidrogeološke sredine izmereno na kanalu izlazne građevine ukupno je trajalo 31 dana, sa prosečnim isticanjem od 35 l/s. Međutim, hidrometrijska merenja koja su vršena u samom tunelu, ukazuju da je prosečno isticanje podzemnih voda u tunel, na poslednjem hidrometrijskom profilu (stacionaži 8+530 m) iznosilo 47 l/s. Veći proticaj na st.8+530 m u odnosu na proticaj na kanalu izlazne građevine je najverovatnije posledica zadržavanja vode u vidu jezera u ovom delu tunela, kao i oticanja jednog dela tih voda u pravcu cevovoda. Iz navedenih razloga, kao reprezentativnija merenja za realno pražnjenje hidrogeološke sredine u tunel, uzeta su ona izmerena na st. 8+530 m ($Q=47$ l/s). Na osnovu rezultata merenja dotoka u tunel, utvrđeno je da postoji konstantno procurivanje vode u tunel iz akumulacije (izazvano lošim spuštanjem zatvarača na ulaznoj građevini) od 5 l/s. Iz tog razloga konstantovano je da u proseku dotiče u tunel ne 47 l/s, već 42 l/s.

Primenom jednačine (1), sada sa poznatim vremenom i količinom proticaja, izračunata je zapremina vode koja je utisnuta u hidrogeološku sredinu (31 dan):

$$V_{vode,31\ dan} = 112.493\ m^3$$

Kako bi se odredila površina terena u koju je utisnuta ova dobijena zapremina vode, korišćena je osnovna jednačina u geometriji tela za preračunavanja površine preko poznate zapremine i visine geometrijskog tela (2):

$$P = \frac{V}{\Delta h} \quad (2)$$

Za definisanje nepoznate veličine Δh u jednačini (2) korišćeni su podaci o sniženjima nivoa podzemnih voda u piježometrima PP-1 i PP-3, koji ukazuju na visinu do koje je utisnuta tunnelska voda u hidrogeološku sredinu, odnosno promenu njene visine u periodu pražnjenja. Srednje sniženje nivoa u oba piježometra za period osmatranja od 31. dana, koliko su trajala merenja u hidrotehničkom tunelu iznosilo je $\Delta h = 10.20\ m$. Uvođenjem poznatih vrednosti V i Δh u jednačinu (2) dobijena površina iznosi:

$$P = 11.028\ m^2$$

Međutim, ova površina oslikava stanje pražnjenja hidrogeološke sredine u periodu trajanja od 31 dana, dok je celokupan period pražnjenja hidrogeološke sredine trajao ukupno 35 dana. Posebno je važno bilo uključiti u proračun preostala 4 dana, s obzirom na poznatu činjenicu da je tokom prva dva dana nakon zatvaranja tunela došlo do najznačajnijih sniženja podzemnih voda u piježometru PP-3. Kako bi se proračunala ukupna površina terena koja je ispunjena određenom zapreminom vode tokom svih 35 dana pražnjenja hidrogeološke sredine, poznato srednje sniženje nivoa u piježometrima PP-1 i PP-3 ($\Delta h = 13.80\ m$) proporcijom poznate površine i sniženja koje odgovara datoj površini, izračunata je nedostajući deo površine koja je pod uticajem hidrotehničkog tunela:

$$P = 14.920\ m^2$$

Ukupna površina, u koju je utisnuta dobijena zapremina vode predstavlja površinu geometrijskog tela koje je 100 % porozno, i sabiranjem ove dve dobijene površine ona sada iznosi:

$$P = 25.948 \text{ m}^2$$

Dopuna površine podrazumeva i dopunu zapremine u odnosu na prvobitno dobijenu za period osmatranja od 31. dana. Na osnovu proporcije poznatih površina i poznate zapremine, izračunata je zapremina koja se ispraznila za preostala 4 dana:

$$V_{vode,4 \text{ dana}} = 152.198 \text{ m}^3$$

Shodno navedenim proračunima, ukupna zapremina vode koja je utisnuta u hidrogeološku sredinu iznosi :

$$V_{vode,35 \text{ dana}} = 264.687 \text{ m}^3$$

Mađutim, ovako izračunata površina predstavlja matematički dobijenu površinu koja je poslužila isključivo kao osnova za proračun ukupne zapremine vode utisnute u hidrogeološku sredinu, i predstavlja površinu jednog basena, tj. sredine u kojoj poroznost stenske mase iznosi 100%, što je u realnih uslovima potpuno nemoguće. S obzirom da je razmatrani teren vrlo kompleksan u pogledu geološke građe i hidrogeoloških uslova, važno je konstatovati da na istražnom području postoji dominantno razviće karstnog procesa, sa značajnim prisutvom krečnjaka i dolomita čija srednja poroznost iznosi 0-20 % [38].

Iz razloga ovako značajno velikog dijapazona veličine poroznosti koja može biti zastupljena u karbonatnim sedimentima, za proračun realne površine terena u koju je utisnuta proračunata zapremina vode pod pritiskom transportovane tunelske/akumulacione vode morala se pretpostaviti veličina poroznosti. Veličina poroznosti se određuje na osnovu jednačine (3), odnosno iz odnosa zapremine pora i zapremine uzorka koji predstavlja zbir zapremine pora i zapremine stene:

$$n = \frac{V_{pora}}{V} = \frac{V_{pora}}{V_{pora} + V_{stene}} \cdot 100\% \quad (3)$$

U konkretnom slučaju veličina V predstavlja nepoznatu zapreminu uzorka sredine pretpostavljene poroznosti, dok V_{pora} predstavlja $V_{vode,35 \text{ dana}}$, odnosno zapreminu uzorka u kome postoje samo pore (potpuno porozna stena, 100% poroznost).

$$n = \frac{V_{pora}}{V_{stene}} = \frac{V_{vode,35 \text{ dana}}}{V_{stene,35 \text{ dana}}}$$

Pretpostavljene su četiri moguće varijante/varijantna rešenja: za pretpostavljene veličine poroznosti od 4%, 6%, 8% i 10 %, na osnovu čega je izračunata zapremina stene/terena u koju je utisnuta transportovana/akumulaciona tunelska voda po pritiskom a na osnovu poznate zapremine i srednje visine geometrijskog tela (jednačina (2)) izračunata je površina terena koja se nalazi pod uticajem veštačkog objekta. U jednačini (2) Δh veličina predstavlja srednje sumarno sniženja nivoa podzemnih voda u piježometrima PP-1 i PP-3 u toku osmatranih 35 dana ($\Delta h = 20.4 \text{ m}$).

Varijanta I – poroznost 4%:

$$4\% = \frac{264.687 \text{ m}^3}{V_{stene,35 \text{ dana}}}$$

$$V_{stene,35 \text{ dana},4\%} = 6.617.175 \text{ m}^3$$

$$P_{n=4\%} = 275.716 \text{ m}^2$$

Varijanta II – poroznost 6%:

$$6\% = \frac{264.687 \text{ m}^3}{V_{stene,35 \text{ dana}}}$$

$$V_{stene,35 \text{ dana},6\%} = 4.411.450 \text{ m}^3$$

$$P_{n=6\%} = 183.810 \text{ m}^2$$

Varijanta III – poroznost 8%:

$$8\% = \frac{264.687 \text{ m}^3}{V_{stene,35 \text{ dana}}}$$

$$V_{stene,35 \text{ dana},8\%} = 3.308.588 \text{ m}^3$$

$$P_{n=8\%} = 137.858 \text{ m}^2$$

Varijanta IV – poroznost 10%:

$$10\% = \frac{264.687 \text{ m}^3}{V_{stene,35 \text{ dana}}}$$

$$V_{stene,35 \text{ dana},10\%} = 2.646.870 \text{ m}^3$$

$$P_{n=10\%} = 110.286 \text{ m}^2$$

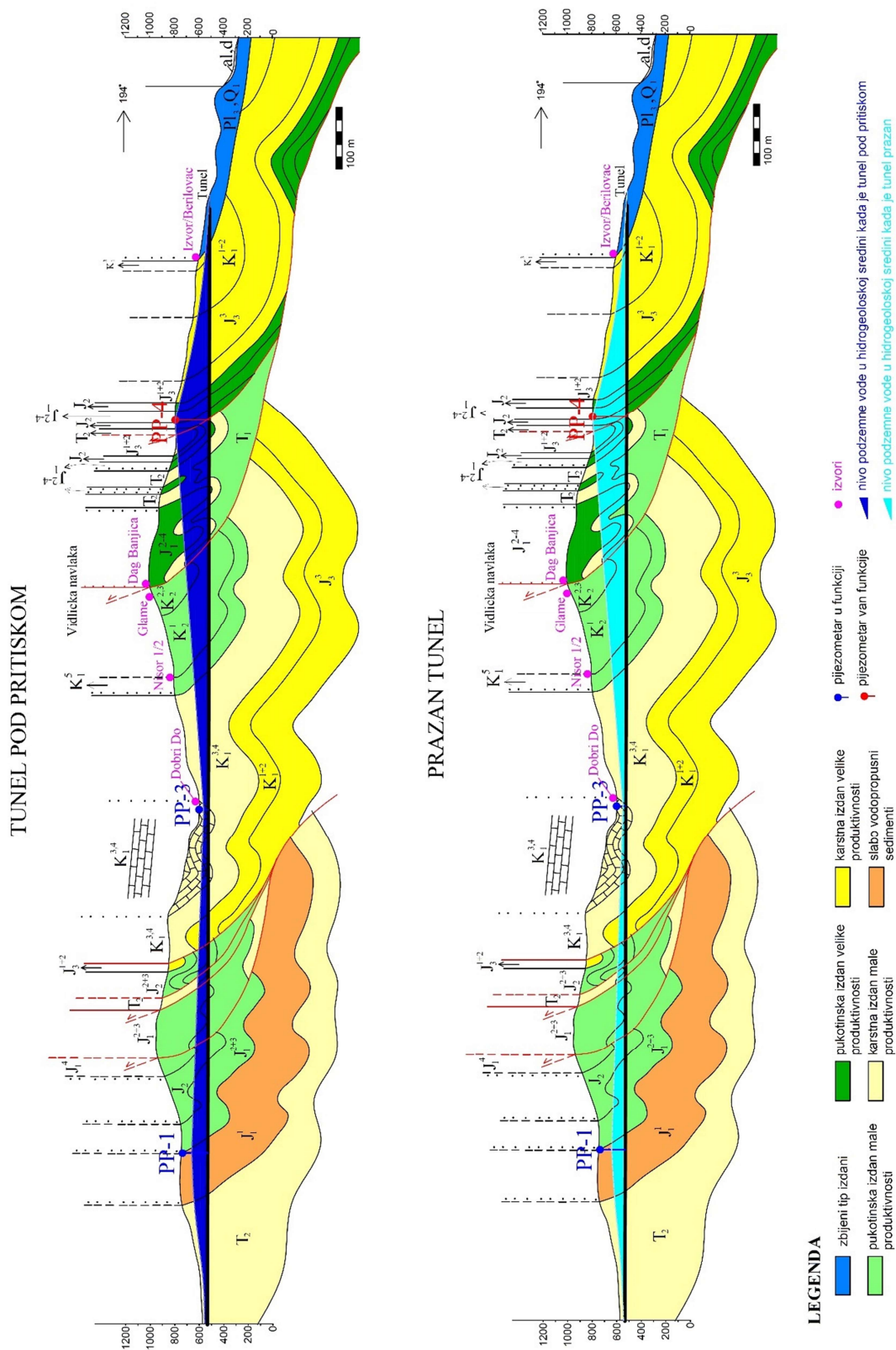
Na osnovu 4 ponuđene varijante pretpostavljene površine geološke/hidrogeološke sredine koja je izložena uticaju tunela, posmatrano kroz prizmu homogene stenske mase duž tunela (što u razmatranom području nije slučaj, na šta su ukazala osmatranja na pijezometrima PP-1 i PP-3), dobijeni radijus uticaja transportovane tunelske vode (u odnosu na osu tunela u dužini od 9093 m) koja je utisnuta pod pritiskom iznosi:

Tabela V.1: Radijus dejstva transportovane tunelske vode pod pritiskom na hidrogeološku sredinu

	Radijus dejstva tunela na hidrogeološku sredinu - R		
	R_{ukupno} [m]	$R_{zapadno}$ od ose tunela [m]	$R_{istočno}$ od ose tunela [m]
<i>Varijanta I</i>	30.3	15.2	15.2
<i>Varijanta II</i>	20.2	10.1	10.1
<i>Varijanta III</i>	15.1	7.6	7.6
<i>Varijanta IV</i>	12.0	6.0	6.0

*Radijus dejstva u odnosu na osu tunela /zapadno i istočno/

S obzirom na poznatu činjenicu da su svi pijezometri projektovani i izgrađeni na udaljenosti 10-12 m u odnosu na osu tunela i da je analiza kvantitativnih karakteristika svih razmatranih hidrogeoloških pojava i objekata ukazala da je jedino došlo do promena u pijezometrima PP-1 i PP-3 na trasi tunela, može se konstatovati da su *Varijanta I i II* (tabela V.1) najrealnije koje oslikavaju pretpostavljenu površinu izloženu uticaju različitog režima rada hidrotehničkog tunela. Izračunata površina ukazuje da je prosečna poroznost svih stenskih masa u razmatranom području ispod 6%, odnosno najverovatnije 4% ili još i manja. Međutim, nikako se ne sme zanemariti činjenica da je ova površina pravolinijski raspoređena, sa istim radijusom dejstva duž celog tunela, što nije realna slika stanja sredine koje je ustanovljeno tokom istraživanja. Zona pijezometra PP-1 i PP-3 su potpuno različite, u geološkom i hidrogeološkom pogledu i nikako se ne smeju poistovećivati.



Slika V.1. Konceptualni model sa pretpostavljenim granicama uticaja tunela pod pritiskom na hidrogeološku sredinu u uslovima kada se tunel nalazi u radnom režimu/ pod pritiskom i kada je tunel prazan

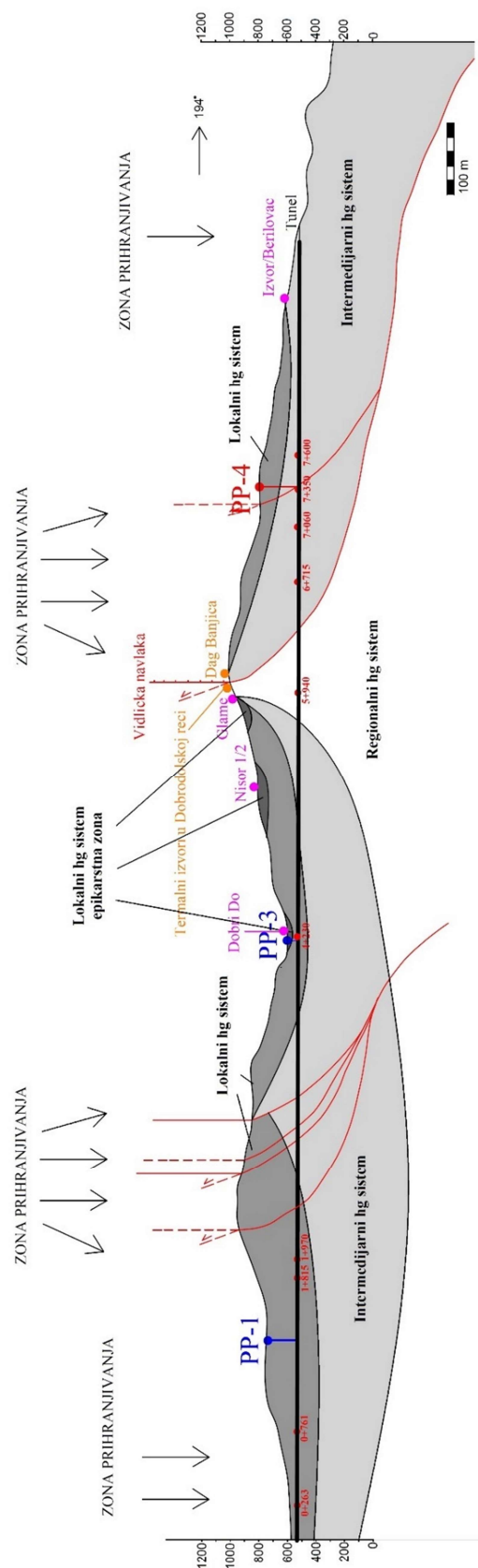
2. Definisanje konceptualnog modela hidrogeoloških sistema na istražnom području

Na osnovu detaljne analize kvalitativnih karakteristika podzemnih voda na hidrogeološkim pojavama (izvorima), objektima (pijezometrima) i hidrotehničkom tunelu, u fazi istraživanja kada je tunel bio van radnog režima (faza B) definisani su prirodni hidrogeološki sistemi na celom istražnom području. Definisanje pretpostavljenih granica hidrogeoloških sistema izvršeno je na osnovu analize kvalitativnih karakteristika svih uzorkovanih podzemnih voda. Međutim, kao osnovni kriterijum izdvajanja hidrogeoloških sistema zone Vidličke navlake korišćene su vrednosti osnovnih fizičko-hemijskih parametara podzemnih voda, u prvom redu elektroprovodljivost (EC) i temperatura (T) posmatrano u profilu hidrotehničkog tunela (slika V.2). Uzorkovanje voda sa 10 odabranih stacionaža u hidrotehničkom tunelu omogućilo je detektovanje intermedijalnog/prelaznog hidrogeološkog sistema [15].

Vrednosti EC i T podzemnih voda mogu biti indikator njihovog porekla i vremena boravka u hidrogeološkoj sredini [62]. Na istražnom području uzorkovane su vode različite mineralizacije i temperature sa dosta velikim dijapazonom vrednosti (tabela V.2), na osnovu kojih su na istražnom području izdvojena sva tri tipa hidrogeoloških sistema – lokalni (plitki), intermedijarni (prelazni) i regionalni (duboki) sistem (slika V.2). Iako su osmatrane vrednosti navedena dva fizičko-hemijska parametra dosta oscilirala posebno u pogledu temperaturnog režima, pre svega na izvorima, njihove vrednosti se ne mogu vrednosno upoređivati sa temperaturama voda uzorkovanim u hidrotehničkom tunelu, na dosta većim dubinama. Detaljna kvalitativna i kvantitativna analiza svih uzorkovanih voda omogućila je formiranje konceptualnog modela hidrogeoloških sistema. Podzemne vode koje se pojavljuju na karstnim izvorima Izvor i Berilovac imale su dosta stabilan temperaturni režim koji nije oscilirao u odnosu na promenu atmosferske temperature, već je samo došlo do promena kvantitativnih karakteristika (povećanja izdašnosti) usled uticaja padavina. To je svrstalo ove izvore u lokalne hidrogeološke sisteme, formirane u okviru karstne izdani, kod kojih su zone prihranjivanja i isticanja međusobno usko povezane, ali se njihova cirkulacija odvija nešto „dublje” nego kod izvora Nišor 1 i 2, Dobri Do i Glame. Kod izvora Nišor 1 i 2, Dobri Do i Glame dolazilo je do značajnih promena temperaturnog režima uzorkovanih voda izazvanih spoljnom/atmosferskom temperaturom što je grupisalo ove izvore u lokalne hidrogeološke sisteme, formirane u okviru karstne izdani sa dosta plitkom zonom prihranjivanja, cirkulacije i dreniranja (epikarstnom delu). Ustaljen temperaturni režim isticanja voda izvora Dag Banjica sa konstantnom temperaturom od 29.7 °C ukazuje na isticanje termalnog toka podzemnih voda, što je omogućeno regionalnom tektonikom u zoni Vidličke navlake [15]. Ove vode se pored povišene temperature odlikuju i stabilnim kvantitativnim i kvalitativnim režimom, što je karakteristika dubokih/regionalnih hidrogeoloških sistema. Intermedijalni sistem utvrđen je merenjima u hidrotehničkom tunelu gde su na određenim mernim tačkama (stacionažama) u uzorkovanim vodama detektovane povišene temperature, u proseku od 15 °C što je ukazalo na mogućnost cirkulacije podzemnih voda u prelaznom hidrogeološkom sistemu. Na stacionaži 4+230 i 7+600 m uzorkovane vode imale su temperaturu od 10 °C, ali su povišene vrednosti elektroprovodljivosti, posebno u zoni 4+230 m (10200 $\mu\text{S}/\text{cm}$) ukazale na potencijalnu zonu u kojoj dolazi do mešanja podzemnih voda različitih mineralizacija, što ih svrstava u grupu intermedijarnih sistema [15].

Tabela V.2: Prikaz vrednosti EC i T na svim analiziranim podzemnim vodama u periodu kada je tunel bio van funkcije (faza B)

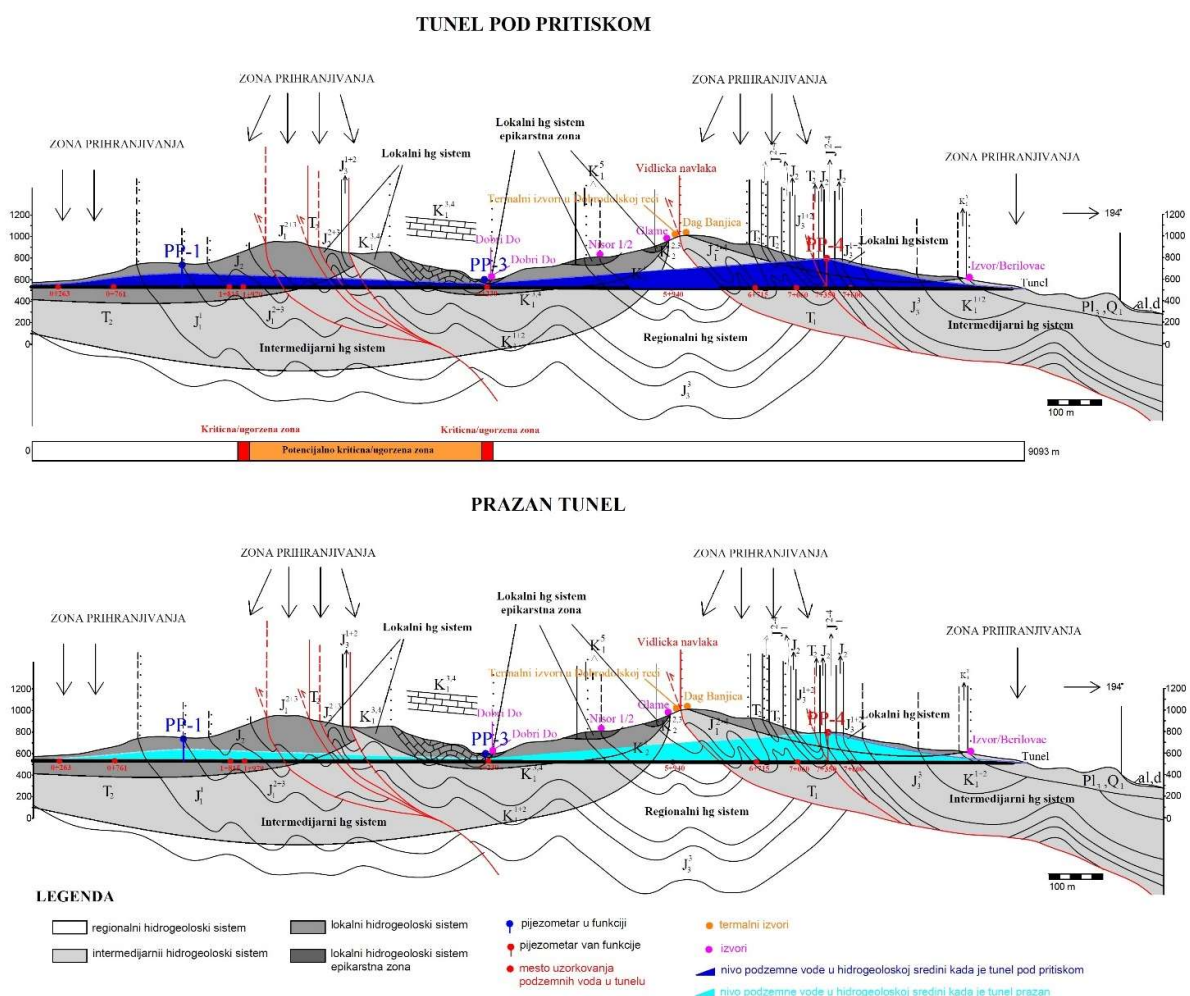
RB	Naziv izvora/pijezometra/ stacionaže u tunelu	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)
1	Izvor	494	11.5
2	Berilovac	421	12.4
3	Nišor 1	509	16.4
4	Nišor 2	358	12.5
5	Glame	688	13.6
6	Dobri Do	373	14.3
7	Dag Banjica	414	29.7
8	PP-1	237	11.2
9	PP-3	1472	10.7
10	PP-4	130	10.5
11	0+263	536	10.0
12	0+761	594	9.9
13	1+815	1886	8.8
14	1+970	2181	9.1
15	4+230	10200	9.3
16	5+940	555	17.1
17	6+715	679	15.7
18	7+060	525	14.4
19	7+350	488	14.5
20	7+600	445	10.5



Slika V.2. Konceptualni model hidrogeoloških sistema zone Vidličke navlake [15]

3. Definisanje konceptualnog modela uticaja tunela pod pritiskom na kompleksni hidrogeološki sistem

Na osnovu sveobuhvatne analize svih prikupljenih podataka tokom celokupnog istraživačkog procesa definisan je konceptualni model uticaja tunela pod pritiskom na kompleksni hidrogeološki sistem, odnosno uticaj veštačkog objekta na hidrogeološke segmente životne sredine. Model šematski prikazuje stepen interakcije podzemnih voda i akumulacionih voda koje se transportuju tunelom duž profila formiranog na trasi tunela kao i najkritičnije zone hidrogeološke sredine i zone tunela koje zahtevaju sanaciju i monitoring sa ciljem ublažavanje negativnih posledica kako bi hidrogeološka sredina i sam veštački objekat bili održivi.



Slika V.3. Konceptualni model uticaja tunela pod pritiskom na kompleksni hidrogeološki sistem

4. Diskusija

Veliki broj prikupljenih i analiziranih podataka u toku celog istraživačkog procesa omogućio je sagledavanje prirodnih uslova životne sredine, odnosno geološke/hidrogeološke sredine ali i uslova koji nastaju kao posledica antropogenog uticaja-veštačkog objekta, odnosno uticaja rada tunela pod pritiskom.

Kao najvažniji produkt analize kvantitativnih i kvalitativnih karakteristika podzemnih voda i voda transportovanih tunelom pod pritiskom nastao je konceptualni model koji prikazuje stepen njihove interakcije, u različitim uslovima rada tunela. Svakako uspostavljanje ovakvog konceptualnog modela, i pored detaljne kvantitativno-kvalitativne analize ne bi bilo moguće bez prethodno sprovedene analize strukturno-geoloških i hidrogeoloških karakteristika terena. Upravo analiza strukturno-geoloških i hidrogeoloških karakteristika razmatranog eksperimentalnog područja bila je ključna za sagledavanje privilegovanih pravaca kretanja podzemnih voda u okviru formiranih različitih tipova izdani.

Analiza rezultata klimatskih karakteristika istražnog područja, temperature vazduha i padavina bila je značajna za sagledavanje opštih uslova koji su vladali u toku 2016. godine kada su vršena istraživanja ali i eventualnih odstupanja u odnosu na višegodišnji razmatrani period od 1990-2016. Temperaturni režim je ukazao da je za 1 °C temperatura bila veća 2016. u odnosu na višegodišnji period, dok su padavine zabeležene u novembru mesecu 2016. godine bile duplo veće nego u odnosu na višegodišnje. Detaljna tromesečna analiza dnevnih vrednosti temperature vazduha i padavina pokazala su posebnu važnost pri analizi uslova cirkulacije podzemnih voda, posebno pri definisanju lokalnih hidrogeoloških sistema. Međutim, i potpuno odsustvo direktne povezanosti oscilatornih promena meteoroloških parametara sa režimom isticanja podzemnih voda jasno je ukazivalo na prisustvo dubokih regionalnih sistema cirkulacije na istražnom području. Generalno, analiza meteoroloških uslova koji su zabeleženi u toku osmatračkog perioda bila je izuzetno važna pri analizi svih prikupljenih hidroloških i hidrogeoloških podataka, pre svega kako bi se definisao njihov direktni uticaj na prirodno stanje hidrogeološke sredine, odnosno otklonio potencijalni uticaj rada tunela pod pritiskom na prirodni režim podzemnih voda.

Iako je u toku sprovedenih hidroloških istraživanja na Dobrodolskoj reci konstatovano da je broj prikupljenih i analiziranih podataka o vodostajima i proticajima nedovoljan za definisanje njenog prirodnog režima, izmereni proticaji su se pokazali kao izuzetno važni u rešavanju postavljene problematike, odnosno utvrđivanja potencijalnog uticaja rada tunela na režim analiziranog vodotoka, iako su istraživanja sprovedena u hidrološki dosta nepovoljnom momentu, odnosno kišnom periodu godine. Na osnovu zavisnosti proticaja i vodostaja na dve postavljene vodomerne letve, jedino se može konstatovati da na uzvodnoj letvi (letvi 1) nije bilo promene u režimu kvantitativnih karakteristika voda Dobrodolske reke (pre zone isticanja termalnih voda) prouzrokovanih različitim režimom rada tunela, već su te promene bile direktna posledica pluviografskog režima. Ujednačeniji režim vodotoka koji je detektovan na letvi 2, odnosno nizvodnijem profilu, posle zone isticanja termalnih voda Dag Banjice ukazuje da ovaj merni profil oslikava režim isticanja cele termalne zone koja je i detektovana termovizijskim snimanjima.

Svakako, sukcesivna hidrološka osmatranja na Dobrodolskoj reci nisu ukazala da se detektovane promene mogu dovesti u vezu sa različitim režimom rada tunela pod pritiskom. Potencijalno, i sam prostorni i pre svega visinski položaj mernih profila i osmatrane zone na Dobrodolskoj reci koja se nalazi na kotama od 471 do 432 m.n.v. ukazuje da se tunel koji je u radnom pritisku od oko 4 bara, na koti akumulacije od 606 m i srednje kote tunela na 552 m.n.v nalazi iznad razmatrane zone. Međutim, pritisak koji nastaje usled transporta akumulacione tunelske vode i njegov uticaj na

podzemne vode svakako ne sme biti razmatran samo sa aspekta vertikalnog smera, već se on mora analizirati u svim smerovima podjednako.

Analiza rezultata hidrogeoloških istraživanja predstavlja ključni momenat razumevanja i definisanja stepena interakcije podzemnih voda i voda transportovanih tunelom pod pritiskom. Rezultati dobijeni u toku ovih istraživanja kao i njihova analiza bili su ključni za uspostavljanje dva konceptualna modela – modela sa pretpostavljenim granicama uticaja tunela pod pritiskom na geološku/hidrogeološku sredinu i modela hidrogeoloških sistema na istražnom području. Analiza kvantitativnih karakteristika podzemnih voda bili su osnova za definisanje konceptualnog modela sa pretpostavljenim granicama uticaja tunela pod pritiskom na geološku/hidrogeološku sredinu dok je analiza kvalitativnih karakteristika podzemnih voda bila najvažnija za definisanje konceptualnog modela hidrogeoloških sistema na istražnom području u okviru kog su izdvojeni različiti hidrogeološki sistemi, odnosno definisan kompleksni hidrogeološki sistem.

Kvantitativna analiza izvora Izvor i Berilovac ukazala je da su izmerene promene bile uzrokovane promenom hidrometeoroloških uslova, odnosno pluviografskog režima. Iako su podaci osmotreni na izvoru Izvor daleko pouzdaniji od onih izmerenih na izvoru Berilovac, osmatranja kvantitativnih karakteristika ovih vrela nisu ukazali da je došlo do nekih značajnijih promena uzrokovanih različitim režimom rada tunela, posmatrano kroz period kada je tunel u funkciji i van funkcije, već da je režim isticanja vrela direktno u zavisnosti od količine padavina. Ovako brza propagacija padavina u izdan karateristična je za karstne izdani, formirane u okviru lokalnih hidrogeoloških sistema čija područja prihranjivanja i isticanja su međusobno zavisna i kvantitativne oscilacije su pod direktnim uticajem trenutnih atmosferskih uslova kao i veličine njihovog slivnog područja. Sam položaj ovih vrela (kontakt karstne i zbijene izdani) ukazuje da se pražnjenje karstne izdani putem ovih izvora najverovatnije vrši samo jednim delom, dok se deo voda infiltrira u dublje slojeve, i prolazeći kroz peskovito-šljunkovite pliocensko/kvartarne sedimente prihranjuje zbijeni tip izdani. Kvalitativne karakteristike uzorkovanih voda sa ova dva vrela su bile uglavnom stabilne tokom celog osmatračkog perioda. Jedine detektovane promene u hemizmu voda izvora Berilovac bile su one u fazi ponovnog punjenja tunela (faza C) kada su vode iz tipa Ca-HCO_3 prešle u Ca-Mg-HCO_3 tipa, što je najverovatnije posledica dominantnijeg rastvaranja i dolomitčnih stena a ne uticaja različitog režima rada tunela. U prilog tome govori i kišna epizoda koja je zabeležena u fazi B kada je na uzorkovanim vodama zabeležen i blagi porast SO_4 jona. Na osnovu visinskog položaja (kote terena) na kojoj su locirani ovi izvori (409 m.n.v. i 406 m.n.v.) u odnosu na srednju kotu tunela (552 m.n.v.) možemo konstatovati da se oni nalaze ispod zone potencijalnog uticaja rada tunela, ali samo ako se razmatra da uticaj tunela postoji u zonama iznad njegove srednje kote, što svakako u relnosti i nije tako.

Kvantitativne karakteristike izvora Nišor 1 i 2, posmatrano kroz različite faze režima rada hidrotehničkog tunela se nisu značajnije menjale. Konstantno isticanje iz izvora Nišor 1, a i sam podatak da se nalazi na koti terena od 776 m.n.v., dosta iznad srednje kote tunela (552 m.n.v.), odnosno iznad kote izmerenog pritiska (cc 4 bara/41 mH_2O) transportovane tunnelske vode (kota gornje vode u akumulaciji iznosila je 606 m) i vidljive oscilacije temperature vode prouzrokovane temperaturnim kolebanjima vazduha, ukazuje da ovaj izvor pripada lokalnom hidrogeološkom sistemu formiranom u dosta plitkoj zoni, sa usko zavisnim područjima prihranjivanja i isticanja koje su pod direktnim uticajem atmosferskih uslova. Izvor Nišor 2 je lociran na koti dosta višoj u odnosu na kotu radnog pritiska tunela (130 m iznad kote radnog pritiska), odnosno nalazi se daleko iznad potencijalnog uticaja različitog režima rada tunela pod pritiskom (cc 4 bara/41 mH_2O), na šta su ukazali i rezultati merenja izdašnosti. Međutim, i ovaj izvor kao i izvor Nišor 1, odlikuje se dosta malim slivnim područjem, u kom se odvija cirkulacija voda u relativno plitkoj zoni gde je isticanje/izdašnost direktno pod uticajem pluviografskog režima pa se kao takav može svrstati u izvore koji pripadaju lokalnim hidrogeološkim sistemima, na šta su ukazali i rezultati kvalitativne analize. Od kvantitativnih karakteristika na oba izvora jedino se vidljive promene Mg jona koje su

detektovane u fazi B, ali nezavisno od radnog režima tunela, već kao posledica pojave kišne epizode koja je najverovatnije porast koncentracije ovog jona prouzrokovala intenzivnijim rastvaranjem dolomitičnih stena.

Sam visinski položaj izvora Glame (kota terena 691 m.n.v. odnosno 139 metara iznad srednje kote tunela, odnosno 85 metara iznad postignutog radnog pritiska tunela na koti akumulacije od 606 m) ukazuje da transportovana tunelska voda nema uticaj na promenu njegovog režima isticanja, odnosno promenu kvantitativnih karakteristika. Maksimalni radni pritisak u tunelu postiže se pri podizanju vodenog stuba od 81 metar, odnosno oko 8 bara, što je još jedna dodatna potvrda da se ovaj izvor i u ekstremnim antropogenim uslovima ne nalazi u zoni uticaja rada tunela. Dosta ujednačen režim isticanja iz ovog izvora tokom celog osmatračkog perioda i relativno stabilne kvalitativne karakteristike uzorkovanih voda sa jednim vidljivim promenama u temperaturi voda uzrokovanih promenama temperature vazduha, uvrstilo je ovaj izvor u lokalni hidrogeološki sistem.

Rezultati kvantitativnih karakteristika voda uzorkovanih na izvoru Dobri Do i njihova analiza mora se uzeti sa velikom rezervom, jer osmatranja nisu vršena u direktnoj zoni isticanja vrela, već na česmi koja se nalazi u istoimenom selu i na koti terena 623 m.n.v, čime nije određena kota terena na kojoj se vrši direktno pražnjenje izdani. Razmatrana česma je lokacijski veoma blizu osmatračkog piježometra PP-3 na kome su registrovane najdrastičnije oscilacije nivoa podzemnih voda u toku istraživačkog perioda, ali je uporedna analiza i dovođenje direktne zavisnosti ove dve osmatračke tačke potpuno neosnovana s obzirom da je glavna zona isticanja vrela Dobri Do udaljena od analizirane česme. Međutim, činjenica da su istraživanja u piježometru PP-3 ukazala na velike promene vodenog stuba u hidrogeološkoj sredini (od 43 metara) tokom trajanja različitih faza režima rada tunela pod pritiskom, određene promene izdašnosti na ovom vrelu mogu biti indikator da se navedeni piježometar i izvor Dobri Do nalaze u okviru iste karstne izdani, koja je pod direktnim uticajem rada tunela. Pored promene kvantitativnih karakteristika, detektovane su i promene u samom kvalitetu ovih voda. Tokom faze B, kada je tunel bio van funkcije registrovani pad temperature vode za 3°C može biti posledica plitke zone cirkulacije podzemnih voda kao u slučaju izvora Nišor i Glame, ali detektovane promene vrednosti ORP koja je sa 314 mV opala na 191 mV, odnosno 80 mV nakon pražnjenja tunela i hidrogeološke sredine može biti posledica opadanja stanja podzemnih voda usled oslobađanja pritiska koji tunelska voda vrši na hidrogeološku sredinu. Na ovom izvoru pored vidljivih promena Mg i SO₄ jona u toku faze B kada je tunel bio van funkcije prouzrokovane kišom, registrovane su i značajnije promene Na+K jona najverovatnije nastale kao posledica povišenog sadržaja Na jona koji u podzemne vode može dospeti kao produkt antropogenog dejstva [72]. Povišen sadržaj Na jona je detektovan i u vodama piježometra PP-3, što još jednom ukazuje na potencijalno istu karstnu izdan koja se drenira preko ovog piježometra i izvora Dobri Do. Prva pretpostavka je da hidrotehnički tunel potencijalno ima uticaj na režim podzemnih voda ovog izvora, i da se stanje podzemnih voda promenilo/poraslo usled pojave kiše (slučaj piježometra PP-3). Druga pretpostavka, da hidrotehnički tunel nije uticao na stanje podzemnih voda već je isticanje iz ovog izvora prevashodno posledica lokalnog sistema kod koga je dinamika isticanja isključivo zavisna od uslova prihranjivanja koji vladaju u određenom trenutku. Međutim, donošenje konkretnih zaključaka vezano za promene kvantiteta i kvaliteta izvora Dobri Do izazvane različitim režimom rada tunela, bi bilo potpuno neosnovano s obzirom na navedene činjenice, pa su osmatranja na ovom izvoru ukazala da je na ovoj osmatračkoj tački potrebno izvršiti daleko detaljnija istraživanja od onih koji su obavljena u toku ovog istraživačkog procesa.

Ujednačen režim isticanja termalnog izvora Dag Banjica na koti terena 469 m.n.v., odnosno 137 metara ispod radnog pritiska tunela (kota akumulacije 606 m), ukazuje da se i sam tunel sa maksimalnim radnim pritiskom od 81 metar vodenog stuba ne nalazi u zoni potencijalnog uticaja na prirodni režim ovog vrela. Međutim, prethodno definisane regionalne strukturno-geološke

karakteristike terena i formirana Vidlička navlaka u ovoj zoni koji su omogućili isticanje voda iz dubokih/regionalnih hidrogeoloških sistema gde je zona prihranjivanja dosta udaljena u odnosu na zonu isticanja, dodatno ukazuju da različit režim rada tunela i pritisak transportovanih akumulacionih voda nemaju uticaj na režim ovih voda. Na to su ukazali i prikupljeni podaci o kvalitetu voda uzorkovanih sa ovog termalnog izvora, sa konstantnom temperaturom isticanja od 29.6 °C što ukazuje da ova voda dotiče iz značajnih dubina. Stabilnost svih fizičko-hemijskih parametara je omogućena dubokom cirkulacijom podzemnih voda formiranih u regionalnim/dubokim hidrogeološkim sistemima, koje u zoni isticanja imaju dosta ujednačen kvalitativni režim. Cirkulacija voda se najverovatnije odvija u dubljim slojevima/sistemima formiranim u okviru krečnjačkih i dolomitičnih stena, na šta ukazuju značajne koncentracije Ca i Mg jona. Po pitanju kvaliteta analizirane i uzorkovane vode Dobrodolske reke svakako oslikavaju karakter voda uzorkovanih na izvoru Dag Banjica jer u samom koritu reke dolazi do izlivanja voda koje pripadaju celoj termalnoj zoni kao i voda koje ističu iz trijaskih krečnjaka u okviru kojih je formiran lokalni hidrogeološki sistem, koje ih rashlađuju i menjaju njihov hemijski sastav (posledica porasta izdašnosti lokalnih izvora usled pojave kišne epizode). Stoga je i sasvim očekivana promena tipa voda iz Ca-Mg-HCO_3 u Ca-HCO_3 tip.

Kada su u pitanju kvantitativni podaci prikupljeni i analizirani sa piježometara duž trase tunela (PP-1, PP-3 i PP-4) možemo reći da su ovi podaci i pre svega njihova detaljnost bili osnova za definisanje stepena interakcije podzemnih voda i voda transportovanih tunelom pod pritiskom. Podaci o nivoima podzemnih voda u navedenim piježometrima su već u toku prve faze istraživanja ukazali da se hidrogeološka sredina potpuno drugačije ponaša u zonama izvedenih piježometara u toku trajanja različitih režima rada tunela. Iz tog razloga, već u samom startu prikaza a kasnije i analize ovih rezultata, faze radnog režima rada tunela (faza A, B i C) nisu mogle biti formirane kao i u slučaju analize izvora i vodotoka. Konkretno, sama detaljnost podataka ukazala je da se faza C (faza ponovnog punjenja tunela) mora potpuno drugačije posmatrati jer usled punjenja tunela hidrogeološka sredina se puni potpuno drugačijom dinamikom u delovima terena gde su izvedeni piježometri. Posledica različitog trajanja faze C (punjenje tunela i hidrogeološke sredine) u PP-1 i PP-3 jeste činjenica da su piježometri potpuno drugačije tehnički izvedeni, sa različitim dubinama i u okviru različitih litoloških jedinica terena. Različiti geološki i hidrogeološki uslovi koji dominiraju u sredinama zona ovih piježometara su potpuno drugačiji i pre svega su ukazali na prisutnost različitog stepena interakcije sa vodama koje se transportuju tunelom pod pritiskom.

Podaci o promenama nivoa podzemnih voda u piježometru PP-1 ukazali su na visoko stanje podzemnih voda koje su pri radnom pritisku tunela od oko 4 bara bile 64 metra iznad kote gornje vode akumulacionog jezera. Iako su tokom celog perioda izmerene male oscilatorne promene u ovom piježometru one su bile izuzetno važne za analizu uticaja transportovanih tunnelskih voda na prirodni režim podzemnih voda. Upravo ovaj piježometar je ukazao da se hidrogeološka sredina puni drugačijom dinamikom u odnosu na sredinu koju oslikava piježometar PP-3 pod pritiskom akumulacione vode. Stoga je analiza rezultata ovog piježometra morala biti rađena u odnosu i na analizu rezultata dobijenih u piježometru PP-3 koji je označen kao najreaktivniji merni objekat u kome je detektovan najveći stepen interakcije podzemnih voda i voda transportovanih tunelom pod pritiskom. Izmerene promene nivoa podzemnih voda u piježometru PP-3 su iznosile ± 43 m, gde je promena visine vodenog stuba u ovom piježometru bila direktno prouzrokovana radnim pritiskom tunela koji je u istražnom periodu iznosio cc 4 bara odnosno oko 41 m. Razlika od 2 metra koja je izmerena na piježometru je posledica porasta nivoa podzemnih voda u fazi kada je tunel bio van funkcije što je bila posledica kišne epizode koja je zabeležena u datom periodu ili eventualno dotoka voda iz drugih delova terena usled rasterećenja pritiska. Upravo ovaj porast od 2 metra u piježometru koji je ispražnjen od transportovane tunnelske vode i u stanje potpunog rasterećenja antropogenog pritiska ukazao je najverovatnije na postojanje dosta plitke zone prihranjivanja izdani. Na to ukazuje i sam visinski položaj ovog piježometra na koti terena od 630 m.n.v. sa svojom ukupnom dubinom

od 78 metara, odnosno nadslojem stenskih masa iznad tunela nešto malo više od 70 m. Ovako drastična promena vodenog stuba u ovoj zoni terena izazvana različitim pritiscima transportovane tunelske vode bila je najvažniji indikator postojanja jedne izuzetno karstifikovane zone koja je u stalnoj interakciji sa tunelom. Iz navedenih razloga monitoring kvantitativnih karakteristika podzemnih voda na piježometru PP-3 je pokazao izuzetno važne rezultate, može se reći i najvažnije, za potrebe celokupne analize hidrauličke aktivnosti tunela i hidrogeološke sredine.

Uporedna analiza ova dva piježometra je ukazala da se oni moraju posmatrati i analizirati kao jedna zajednička zona, međusobno zavisna. Usled prestanka rada tunela i oslobađanja sredine pritiska tunelske vode, nivo podzemnih voda opada postepeno u PP-1 ali samo do trenutka ponovnog punjenja tunela. Najverovatnije bi usled dužeg perioda osmatranja kada je tunel van funkcije prirodna hidrogeološka sredina koju oslikava ovaj piježometar nastavila da se prazni do trenutka postizanja potpuno prirodnog stanja i stanja u kome više ne postoji antropogeni pritisak i uticaj. Međutim, dosta kratak vremenski period u kome je tunel bio van funkcije (ukupno 35 dana) nije omogućio „vraćanje” sredine u prirodno stanje, što nije bio slučaj sa sredinom koju oslikava piježometar PP-3. Pražnjenje hidrogeološke sredine u zoni piježometra PP-3 postignuto je nakon 21 dan nakon prestanka rada tunela, nakon čega bi nivo podzemnih voda najverovatnije stagnirao da nije bilo kišne epizode. Međutim sama konstatacija da se hidrogeološka sredina u zoni PP-1 i dalje prazni i oslobađa pritiska može biti i indikator da taj porast nivoa nije izazvan samo brзом propagacijom padavine u izuzetno karstifikovan teren već da je on izazvan i dotokom voda iz sredine koj gravitira od PP-1. Faza ponovnog punjenja tunela pokazala je da je potrebno 18 dana da se sistem vrati na početak, odnosno postigne ponovni radni pritisak od oko 4 bara na šta su ukazali podaci o nivoima na piježometru PP-3, odnosno postignut porast od 42 metra vodenog stuba. Tek nakon postizanja radnog pritiska u zoni piježometra PP-3 i potpunog zasićenja/punjenja hidrogeološke sredine detektovan je porast nivoa u piježometru PP-1 i to 16 dana nakon postizanja tačke stabilizacije u PP-3. Svaka dalja promena registrovana na piježometru PP-1 oslikavala je promenu zabaleženu na PP-3 ali sa vremenskim zakašnjenjem od 16 dana. Ovo je bio glavni indikator postojanja zajedničke zone, odnosno zavisne hidrogeološke sredine od piježometra PP-1 do PP-3, gde je piježometar PP-3 u direktnoj vezi tunelskom vodom a piježometar PP-1 u indirektnoj vezi, preko piježometra PP-3. Kvantitativna naliza razmatrana oba piježometra upotpunjena je detaljnom analizom kvalitativnih parametara voda uzorkovanih u oba objekta. Najznačajnija promena u hemizmu podzemnih voda na piježometru PP-1 bila je ona detektovana u fazi C odnosno nakon ponovnog punjenja tunela i postizanja radnog pritiska u piježometru PP-3, kada je došlo do izmene tipa voda u ovom piježometru sa Ca-HCO_3 u $\text{Ca-HCO}_3\text{-Cl}$ tip, odnosno detektovan je značajan porast Cl jona. Hloridi detektovani u PP-3 25/10/2016 (faza C) najverovatnije su dospeli u piježometar PP-1 sa vremenskim zakašnjenjem od 17 dana, što je uočeno i detaljnom kvantitativnom analizom ova dva piježometra (kašnjenje 16 dana). Pojava hlorida 17 dana zakašnjenja u PP-1 u odnosu na PP-3 je isključivo posledica trenutka kada je uzet uzorak za hemijsku analizu i najverovatnije bi povišena koncentracija ovog jona bila detektovana i dan ranije. Svakako, najdrastičnije promene hemizma detektovane su na piježometru PP-3. Trend porasta ORP vrednosti koji je zabeležen na ovom piježometru, u periodu kada je tunel bio u funkciji a nivo podzemnih voda na najmanjoj dubini od površine (11 m od površine) je bio potpuno suprotan od očekivanog, jer su redukcioni uslovi karakteristika dubljih slojeva hidrogeološke sredine. Jedino objašnjenje ovakvih vrednosti jeste činjenica da u ovoj zoni postoji izuzetno karstifikovana sredina, sa velikim kavernama/pećinama (hipogeni karst) u koje, u fazi njihove ispražnjenosti postoji dotok kiseonika iz površinskih delova terena. Merenje vrednosti EC pod dubini vodenog stuba na svakih 5 metara dubine u ovom piježometru ukazali su na stepen mešanja podzemnih voda i voda transportovanih tunelom. Duž vodenog stuba u ovom piježometru jasno detektovane različite vrednosti EC parametra ukazivale su da transportovane akumulacione vode razblažuju visokomineralizovane podzemne vode koje su svakako sa vrednostima od preko 2000 $\mu\text{S/cm}$ u periodu ispražnjenog tunela ukazivale na prisustvo potencijalno agresivnih voda sa visokim

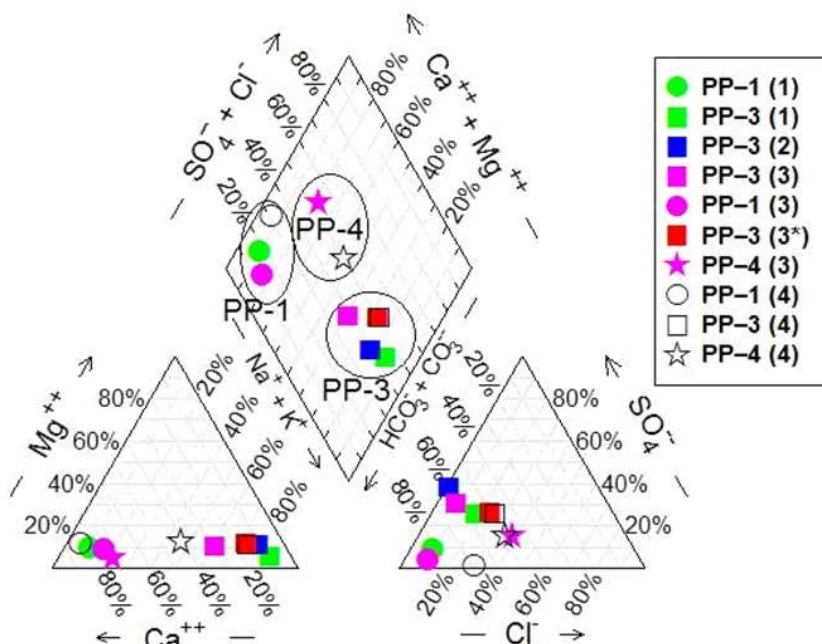
sadržajem Cl i SO₄ jona. Svakako prisustvo voda uzorkovanih na stacionaži tunela 4+230 m koja odgovara stacionaži ovog pijeziometra, u kojima su detektovane vrednosti EC parametra dostizale vrednost i preko 10.000 µS/cm dodatno su označili ove vode kao najagresivnije sa aspekta njihovog delovanja na betonsku oblogu tunela ali i na samu geološku/hidrogeološku sredinu, što objašnjava intenzivnu i direktnu vezu/komunikaciju tunela i pijeziometra u ovoj zoni. Posebno važno merenje vrednosti EC po dubini vodenog stuba u ovom pijeziometru se pokazalo sa aspekta njegove prohodnosti, što je ukazivalo na činjenicu da se u zoni ovog pijeziometra na dubini od 65. do 78. metra i zoni koja se nalazi iza betonske obloge u tunelu na stacionaži 4+230 m postoji izuzetno visokomineralizovana voda, sa specifičnim hemijskim komponentama, potencijalno agresivnim po stanje ne samo armirano-betonske obloge tunela već i filterske konstrukcije pijeziometra. Već na osnovu podataka o koncentraciji SO₄ jona u vodama uzorkovanih iz ovog pijeziometra, čije vrednosti su dosta veće nego u slučaju voda uzorkovanih na izvorima, moglo se konstatovati da se u konkretnom slučaju poreklo ovog jona ne može vezivati za atmosferske padavine (posebno jer ne prate uobičajno povećanje u fazi B, drugo uzorkovanje) nego najverovatnije za proces rastvaranja sedimentnih stena koje u sebi sadrže SO₄ jon (gips ili anhidrit). U periodu kada je tunel bio van funkcije uočen je porast gotovo svih komponenti osnovnog hemijskog sastava, a posebno značajno Ca, Mg, HCO₃, SO₄ jona. Posledica ovakvog povećanja koncentracije određenih jona jeste uspostavljanje prirodnog stanja podzemnih voda na čiji kvalitet i njegovu promenu više ne utiče transportovana akumulaciona voda.

Količine pojedinih anjona i katjona mogu ukazivati na antropogeno poreklo, kao što su sadržaj Na, K, NO₃ i Cl jona [72], ali porast koncentracija ovih jona usled punjenja tunela (faza C) neminovno ukazuje da vode uzorkovane u ovom pijeziometru odgovaraju vodama uzorkovanim na stacionaži tunela 4+230 m (imaju značajno veće količine navedenih anjona i katjona) koje se izdižu pod pritiskom transportovanih tunelskih voda a kasnije i „razblažuju”. Hemijski sastav voda sa stacionaže 4+230 m, a samim tim i voda u pijeziometru PP-3, ukazuje da njihovo formiranje nastaje najverovatnije usled razlaganja sedimentnih stena, evaporita: gipsa, anhidrita i halita iako ti sedimenti nisu detektovani na površini terena. Međutim, na istražnom terenu u uslovima plitkovodne morske sedimentacije koja je formirana krajem srednjeg i početkom gornjeg trijasa najverovatnije je došlo do taloženja/formiranja evaporita: halita, anhidrita i, krečnjaka po šemi prikazanoj na slici III.10, čije prisustvo je utvrđeno na osnovu hemijskog sastava podzemnih voda u zoni Dobrodolske antiklinale, odnosno vodama uzorkovanih u pijeziometru PP-3 i u tunelu na stacionaži 4+230 m. Međutim, značajno povećanje sadržaja NO₃ jona tokom faze B (sa 3.6 na 47.5 mg/l) najverovatnije je rezultat opadanja nivoa podzemnih voda i uticaja antropogenog faktora, u prvom redu stajnjaka životinjskog porekla, na kvalitet voda u pijeziometru. Odmah nakon puštanja tunela u rad, na uzorkovanoj vodi iz pijeziometra PP-3 je uočeno smanjenje koncentracija svih komponenti, izuzev hlorida koji su prisutni kao rezultat podizanja Na-Cl voda, koje su locirane na stacionaži 4+230 m. Ovako brzo reagovanje i izrazite promene uočene na vodama iz pijeziometra PP-3, dodatno potvrđuju dobru hidrauličku povezanost voda iz tunela sa vodama u pijeziometru, odnosno direktan uticaj veštačkog objekta na prirodnu sredinu.

Iako su ova dva pijeziometra, PP-1 i PP-3 bili od najvećeg značaja za razmatranje interakcije podzemnih voda i voda transportovanih tunelom pod pritiskom, pijeziometar PP-4 i podaci koji su prikupljeni i analizirani sa ovog osmatračkog objekta su pre svega bili oskudni a i vrlo neopuzdani i kao takvi se nikako nisu mogli koristiti kao osnova za donošenje nekih važnijih zaključaka. Međutim, sam položaj ovog pijeziometra na trasi tunela, na 7+380 m u blizini izuzetno značajne stacionaže u tunelu gde postoji direktno isticanje vode u prazan tunel na stacionaži 7+350 m (Čombetov izvor) sa količinama od oko 30 l/s bi bio od izuzetne važnosti pri celokupnoj analizi. Visoko stanje podzemnih voda u ovom pijeziometru, i gotovo samostalno pored pretpostavke da je isti objekat nefunkcionalan, u kom podzemna voda odražava karakter kišnice po kvalitativnim karakteristikama, potencijalno može ukazivati na potpuno odsustvo veze tunela i hidrogeološke sredine usled dobre izolovanosti objekta i

postojanja hidrogeološke sredine koja je zasićena i nije u direktnoj vezi sa sredinom koja je vezana za pijezometre PP-3 i PP-1. U prilog ovoj pretpostavci mogu ići i same geološke i strukturno-geološke karakterike terena jer se u ovom delu terena duž trase tunela, na potezu od PP-4 do PP-3 formirala Vidlička navlaka, odnosno došlo je do kontakta dve velike tektonske jedinice regionalnog značaja Gerikuma i Danubikuma.

Osnovni hemijski sastav voda iz pijezometara prikazan na Pajperovom dijagramu ukazuje na očigledne razlike u sastavu podzemnih voda iz pijezometara u zavisnosti od režima rada tunela (slika V.3). U sastavu podzemnih voda iz pijezometra PP-1 dominantnu zastupljenost ima hidrokarbonatni jon kao osnovni anjon, dok u katjonskom sastavu preovlađuju Ca joni. U podzemnim vodama iz pijezometra PP-3, pored HCO_3 anjona su u značajnoj meri zastupljeni i Cl i SO_4 joni, a u katjonskom pogledu preovlađuju Na joni. Složen sastav imaju vode uzorkovane iz pijezometra PP-4: u katjonskom sastavu joni Na i Ca imaju značajnu zastupljenost, a u pogledu anjonskog sastava CO_3+HCO_3 joni određuju anjonski tip, sa značajnom zastupljenošću Cl jona [40].



Slika V.3. Pajperov dijagram hemijskog sastava podzemnih voda iz pijezometara PP-1, PP-3 i PP-4. Legenda: uzorkovanja izvršena (1) – A; (2) – B; (3/3*) – C; (4) – A [40]

Sa početkom pražnjenja tunela, kada su vršena merenja sumarnih gubitaka u tunelu, sinhrona osmatranja na pijezometrima PP-1 i PP-3 i šahti tunelske zatvaračnice su se pokazala kao jako važna, pre svega jer su već u ovoj fazi ukazala na veoma izraženu hidrauličku zavisnost nivoa vode u tunelskoj zatvaračnici i nivoa podzemnih voda u pijezometru PP-3. Sam proces merenja sumarnih gubitaka i analiza dobijenih rezultata sa sinhronim merenjima u pijezometrima na trasi tunela su bila od posebnog značaja, jer je pored registrovanih gubitaka, na različitim stepenicama držanja nivoa u šahti tunelske zatvaračnice registrovan dotok koji je bio veći od gubitaka što je bio indikator potencijalnog dotoka voda iz zone pijezometra PP-3, odnosno intenzivnog pražnjenja tog dela hidrogeološke sredine. Na to je ukazao i porast elektroprovodljivosti voda koje su detektovane na trećoj stepenici držanja nivoa sa vidljivim promenama EC parametra u samom pijezometru PP-3 po dubini na svakih 5 metara, na kraju merenja sumarnih gubitaka u odnosu na početak merenja. Međutim, izvedena merenja sa velikim stepenom detaljnosti, odnosno merenja na 10 sekundi omogućila su detektovanje i najmanje promene u temperaturi voda koje su bile važne za analizu voda

koje dotiču u tunel, jer su ukazale na dotok voda različitih temperatura, posebno priliv voda povišene temperature tokom četvrte stepenice držanja nivoa. Ovaj značajan porast temperature vode u zatvaračnici tokom držanja četvrte stepenice najverovatnije ukazuje na dotok podzemnih voda sa stacionaža tunela 5+940, 6+715, 7+060 i 7+350 m na kojima su detektovane vode povišene temperature od 14-17 °C. Komparativna analiza pijezometra PP-1 i PP-3 u toku merenja sumarnih gubitaka ukazala je na potpuno odsustvo njihove međusobne zavisnosti što je svakako i očekivano jer sam proces merenja je vršen u dosta kratkom vremenskom periodu od 7 časova što je svakako nedovoljno da bi se detektovale neke međuzavisne promene na ovim objektima s obzirom na već poznate činjenice utvrđene njihovom detaljnom analizom tokom celog osmatračkog perioda.

Iako su prikupljeni podaci na kanalu izlazne građevine u prvom trenutku ukazali da je došlo do velikog prekida u osmatranju usled skretanja toka vode koji ističe iz praznog tunela u drugom pravcu, ova merenja su kao takva iskorišćena i dopunjena na osnovu dobro definisane korelacione veze sa nivoima u pijezometru PP-3. Na osnovu simulacije isticanja, odnosno pražnjenja hidrogeološke sredine usled rasterećenja unutrašnjeg pritiska bilo je moguće potvrditi već poznatu činjenicu da se najveća količina voda u tunelu pojavljuje iz hidrogeološke sredine koju reprezentuje pijezometar PP-3. Na to su ukazali i podaci kvalitativnih karakteristika uzorkovanih voda gde su fizičko-hemijski parametri ukazali sličnost sa vodama koje su uzorkovane u pijezometru PP-3 ali posebno sa vodama koje su uzorkovane na stacionaži tunela 4+230 m koja odgovara stacionaži navedenog pijezometra koji je pozicioniran na 4+200 m tunela. Detaljni temperaturni režim voda koje ističu iz tunela, odnosno voda koje dotiču iz hidrogeološke sredine na kanalu izlazne građevine ukazao je na dinamiku pražnjenja prirodne sredine. Detektovani porast temperature vode, posebno u poslednjem periodu osmatranja, odnosno periodu kada je hidrogeološka sredina „oslobođena” od akumulacionih voda najverovatnije je izazvan prilikom prilivom voda iz dubljih hidrogeoloških struktura, koje su postale dominantnije u tom trenutku. Konstantno opadanje EC parametra u toku ovih osmatranja, takođe ukazuje na već poznatu činjenicu da se u prvom trenutku „prazni” zona pijezometra PP-3 iz koje dotiču vode najveće mineralizacije gde nakon isticanja ovih voda dominaciju imaju vode manje elektroprovodljivosti. Međutim, vidljiviji pad elektroprovodljivosti koji je detektovan 14/10/2016 u vodama u kanalu izlazne građevine ukazuje na dodatno „razblaživanje” voda usled infiltracije atmosferskih voda u hidrogeološku sredinu (detektovan porast nivoa za oko 1.5 m u pijezometru PP-3). Rezultati dobijeni merenjima na kanalu izlazne građevine, pored definisanja dinamike pražnjenja hidrogeološke sredine (u periodu kada je tunel van funkcije, a hidrogeološka sredina bila oslobođena antropogenog pritiska) pokazali su se kao izuzetno značajni, pre svega kao kontrolni proticaji sukcesivnih hidrometrijskih merenja izvršenih u samom tunelu (postupak merenja dotoka).

Sukcesivna hidrometrijska merenja u tunelu, koja su za cilj imala definisanje veličine dotoka u ispražnjen tunel, pod određenim segmentima/sekcijama tunela imala su posebnu značajnost pri analizi procesa pražnjenja hidrogeološke sredine usled rasterećenja pritiska tunnelske vode. Svaka sekcija tunela (3 sekcije) je praćena jednim pijezometrom kao reprezentativnim osmatračkim objektom hidrogeološke sredine koja se nalazi iza obloge tunela. Iako su merenja vršena u relativno kratkom vremenskom periodu od 31 dana, tri serije merenja bile su dovoljne za definisanje zona procurivanja u tunel i markiranje delova tunela u kojima se dešava najintenzivnija interakcija podzemnih voda i voda transportovanih tunelom pod pritiskom. Analiza dobijenih rezultata urađena na osnovu podele na dva osmatračka perioda, prvih 16 dana osmatranja (I period) i drugih 15 dana (II period) se pokazala izuzetno važna jer je nakon II serije merenja došlo do pojave kišnog perioda koji je prekinuo kontinualno pražnjenje hidrogeološke sredine usled pojave novoinfiltriranih voda. Veličine dotoka izmerenih u I periodu osmatranja potvrdile su postojanje izuzetno aktivne hidrauličke veze u delu tunela koji je označen kao Sekcija II, koju reprezentuje pijezometar PP-3, gde je bilo jasno vidljivo pražnjenje hidrogeološke sredine, direktno u tunel kroz betonsku oblogu.

U Sekciji I, u ovom periodu ne dolazi do pražnjenja hidrogeološke sredine već se to vremensko zakašnjenje dešava tek u drugom periodu osmatranja, odnosno 16 dana posle, što je potvrda konstatacija donešenih u toku uporedne analize pijezometara PP-1 i PP-3. Dotoci u prvoj sekciji tunela koji reprezentuje pijezometar PP-1 ukazuju na pražnjenje hidrogeološke sredine direktno u tunel što je pokazatelj potencijalne direktne veze tunela i hidrogeološke sredine ali tek u periodu kada dođe do potpunog rasterećenja pritiska u sredini koju oslikava pijezometar PP-3. Ovaj dotok u sekciji I je direktna posledica procurivanja voda u tunel kroz betonsku oblogu tunela, što je detektovano i samim vizuelnim pregledom objekta ali i količinama uzorkovanih voda koje procuruju kroz betonsku oblogu tunela. Na osnovu uzorkovanih voda koje procuruju kroz betonsku oblogu tunela i njihovih fizičko-hemijskih karakteristika može se konstatovati da vode uzorkovane na 4 lokacije u tunelu koje pripadaju I Sekciji (0+236 m, 0+761 m, 1+815 m i 1+970 m) tokom tri serije merenja „trpe” značajne promene. Najznačajnije promene zabeležene su u vrednostima pH i EC, gde je posebno za definisanja dinamike pražnjenja ove zone/sekcije tunela (reprezentativni pijezometar PP-1, na stacionaži 1+400 m) bio važan parametar EC jer je njegova vrednost konstantno rasla. To je bio pokazatelj da je akumulaciona voda pod pritiskom izdigla visokomineralizovane vode u više delove terena. Na to je ukazao i hemijski sastav uzorkovanih voda na ovim stacionažama gde je značajno rastao i Cl i SO₄ jon tokom procesa pražnjenja hidrogeološke sredine. Dominantan i konstantan porast Cl jona sa 4 mg/L na 40 mg/L na ovoj stacionaži upravo ukazuje da se voda utisnuta u više slojeve terena u zoni pijezometra PP-1 iz zone pijezometra PP-3 i stacionaže 4+230 m pod pritiskom transportovane tunelske vode prazni dosta sporije nego što se to dešava na stacionaži 4+230 m kojoj odgovara i pijezometar PP-3. Tek nakon pražnjenja izuzetno hidraulički aktivne zone/sekcije sredine na stacionaži 4+230 m, odnosno pijezometra PP-3 dolazi do isticanja podzemnih voda zone/sekcije na stacionažama 0+761, 1+815 i 1+970 m, odnosno pijezometra PP-1. Na to ukazuje i promena mikroelementa litijuma čija koncentracija opada tokom vremena pražnjenja sa 0.26 mg/L na 0.22 mg/L na stacionažama 1+815 i 1+970 m. Ovakve promene, samo inverznog preseca detektovane su u fazi punjenja tunela i hidrogeološke sredine kroz analizu podataka kvalitativnih karakteristika voda uzorkovanih na pijezometrima PP-1 i PP-3.

U II Sekciji tunela uzorkovane vode na stacionažama 4+230 m, 5+940 m, 6+715 m i 7+060 m ukazale su da vode sa stacionaže 4+230 m sa izuzetno visoko izmerenim vrednostima elektroprovodljivosti. Međutim, iako je vrednost EC tokom druge serije merenja zabeležena u vrednostima od 10.200 μ S/cm, tokom treće serije detektovan je smanjenje elektroprovodljivosti. Ovakav trend povećanja u toku druge serije merenja, a potom smanjenja tokom treće serije detektovan je u hemijskom sastavu uzorkovanih voda koji je pokazao indentične promene u koncentraciji jona Cl, SO₄ i Na. Ovakav trend smanjenja najverovatnije je posledica kišne epizode i infiltriranja malomineralizovanih voda u hidrogeološku sredinu, usled čega je došlo do njihovog razblaživanja što je detektovano porastom nivoa podzemnih voda na pijezometru PP-3 koji odgovara ovoj sekciji tunela. Vode uzorkovane na ovoj stacionaži tunela su jedinstvene na celom istražnom području i po hemijskom sastavu su Na-Cl-SO₄ tipa što ukazuje na njihovo specifično poreklo koje se vezuje za razlaganje sedimenata morskog porekla, koji su najverovatnije formirani tokom gornje jure i donje krede na istražnom području. Na to ukazuju i koncentracije mikroelemenata Li i Sr jona koji su izmereni u vodama uzorkovanim na ovoj stacionaži tunela i čije povišene koncentracije u podzemnim vodama mogu biti indikatori prisustva slanih voda. Vode ovakvog hemijskog sastava (Na-Cl-SO₄ tip) spadaju u grupu izuzetno agresivnih po armirano-betonsku oblogu tunela ali potencijalno i po samu hidrogeološku sredinu, odnosno stensku masu u koju se „utiskuje” pod pritiskom. S obzirom da se u ovoj zoni tunela, gde su detektovane agresivne vode nalazi krečnjak, otkrivene slane vode mogu agresivno delovati i na krečnjačku stenu što može uzrokovati razviće hipogenog karsta, odnosno stvaranja većih kaverni i pukotina. Sam parametar ORP koji je meren u vodama koje ističu u tunel na ovoj stacionaži ukazuje na drastične oscilacije, sa trendom smanjenja sa 318 mV na 20 mV, u procesu pražnjenja hidrogeološke sredine, što je indentičan slučaj i sa vrednostima ovog parametra u pijezometru PP-3.

Upravo ovaj parametar može isto biti pokazatelj prisustva većih pećina i razvika hipogenog karsta gde je u fazi praznog tunela, i ispražnjene hidrogeološke sredine povećan dotok kiseonika sa površine terena. Vode uzorkovane na stacionaži 4+230 m imale su male koncentracije gasa H_2S (<0.1 mg/l) ali vode sa stacionaža 1+815 m, 1+970 m i 7+060 m sadržale su visok sadržaj ovog gasa, preko 30 mg/l što je svakako uslov pod kojim može doći do formiranja hipogenih pećina usled rastvaranja karbonatnih stena. Pored prirodnog porekla joni Na i Cl mogu dospeti u podzemne vode i usled antropogenog uticaja, pre svega usled ispuštanja voda iz septičkih jama. *Panno et al. 2002*, navodi da ispušteni otpad iz opštinskih i privatnih septičkih sistema u Illinoisu sadrži izuzetno visoke koncentracije Na, NO_3 i Cl jona sa maksimalnom koncentracijom od 255, 29 i 618 mg/L. S obzirom da je ovaj deo terena izgrađen u izuzetno karstifikovanim krečnjacima, u Dobrodolskoj sinklinali, na čijoj površini se nalazi i selo Dobri Do, brza propagacija zagađenih voda je i potpuno očekivana. Međutim, izuzetno visoke koncentracije Na i Cl jona u podzemnim vodama na stacionaži 4+230 m, isključuje mogućnost njihovog veštačkog porekla, iako bi separatnom analizom voda uzorkovanih iz pijezometra PP-3 (odgovara stac. 4+200 m) ovakva pretpostavka možda bila i opravdana. Koncentracija NO_3 jona nedvosmisleno ukazuje na veštačko poreklo ovog jona čije koncentracije su blago povećane u odnosu na koncentracije u vodama iz pijezometra PP-3. Vode sa stacionaže 5+940 m imale su temperaturu od 17.09 °C, najveću izmerenu u tunelu, što je najverovatnije ukazuje i na specifične uslove cirkulacije, odnosno na postojanje regionalnog i/ili intermedijalnog tipa hidrogeološkog sistema. Pojava podzemnih voda sa povišenim temperaturama na ovoj stacionaži tunela svakako je uzrokovana prisustvom složenih strukturno-tektonskih uslova, odnosno formiranja Vidličke navlake duž koje je omogućeno isticanje podzemnih voda iz dubokih/regionalnih hidrogeoloških sistema, čijoj zoni se na površini terena pojavljuju/ističu termalni izvori Dag Banjice temperatura od 18 do 31 °C.

Sekcija III tunela, koju reprezentuje prostorno pijezometar PP-4 nije imala vidljiv period pražnjenja hidrogeološke sredine već je ova sekcija kroz oba perioda osmatranja, kao i ceo osmatrački period imala konstantan dotok voda u ispražnjen tunel. To je svakako posledica konstantnog dotoka podzemnih voda u tunel kroz Čombetov izvor koji ima konstantnu izdašnost oko 30 l/s. Ovaj izvor se nalazi na stacionaži 7+350 m, dok se pijezometar PP-4 nalazi na 7+380 m pa bi pouzdani podaci sa ovog pijezometra svakako bili od posebne značajnosti pri analiziranju dinamike pražnjenja hidrogeološke sredine. Međutim, manji pad dotoka u drugom periodu u odnosu na prvi period osmatranja možda ukazuje na postojanje jedne posebne zone čija dinamika pražnjenja hidrogeološke sredine koja funkcioniše potpuno nezavisno u odnosu na zonu Sekcije I i II, koje su hidraulički povezane. Ovakva pretpostavka je isključivo objašnjiva regionalnim tektonskim karakteristikama terena – Vidličkom navlakom koja je pozicionirana na granici Sekcija II i III. Kvalitativne karakteristike voda ove sekcije tunela definisane su na osnovu voda uzorkovanih na dve stacionaže, 7+350 m i 7+600 m. Vode sa stacionaže 7+350 m, zahvaćene sa Čombetovog izvora imale su povišenu temperaturu vode od 14 °C što je prouzrokovano najverovatnije pozicijom Vidličke navlake regionalnog karaktera čime je omogućeno isticanje voda iz dubljih delova gde usled mešanja sa hladnijim vodama iz lokalnih sistema formiraju i intermedijalni/prelazni tip. Međutim, iako je temperatura ovih voda u toku tri serije merenja bila na prvi pogled dosta stabilna, vidljiv je trend porasta vrednosti usled prestanka antropogenog pritiska. Iako ove vode ističu u tunel pod pritiskom, kada se tunel nalazi u funkciji, odnosno pod pritiskom, transportovane vode najverovatnije potiskuje podzemne vode sa ove stacionaže, što se u toku perioda osmatranja od mesec dana pokazano i kroz izmenu njihovog hemijskog sastava.

Svakako jako važan aspekt pri kvantitativno-kvalitativnoj analizi svih uzorkovanih voda i definisanje hidraulički zavisnih zona tunela i hidrogeološke sredine jeste detektovanje ugroženih delova životne sredine/hidrogeološke sredine ali i nestabilnih/ugroženih zona tunela. Na osnovu primenjenih standarda za definisanje potencijalno agresivnih voda uzorkovanih, pre svega u tunelu, kao

najagresivnije označene su one vode uzorkovane na stacionaži tunela 4+230 m zbog povišenih koncentracija hloridnih i sulfatnih jona. Vode stacionaže 1+970 m ukazuju na sulfatnu agresivnost na oblogu tunela zbog visokih koncentracija H_2S gasa. Pored ove dve zone, agresivna svojstva pokazuju i vode uzorkovane sa stacionaže tunela 1+815 m i 7+060 m, isto zbog povećanih koncentracija H_2S gasa.

Rezultati izvršenih sukcesivnih hidrometrijskih merenja, odnosno veličine dotoka podzemnih voda koje ističu u ispražnjen tunel, bila su ključna za proračunavanje ukupne zapremine vode koja je tokom transporta tunelom pod pritiskom utisnuta u hidrogeološku sredinu. Na osnovu izračunate zapremine utisnute akumulacione vode, proračunata je površina terena koja je potencijalno pod uticajem navedenog hidrotehničkog objekta, odnosno definisan konceptualni model sa pretpostavljenim granicama uticaja tunela na geološku/hidrogeološku sredinu. Ovako postavljen konceptualni model imao je za cilj utvrđivanje radijusa dejstva tunela na hidrogeološku sredinu u odnosu na osu tunela. Svakako, ovaj model definisan na osnovu prikupljenih podataka predstavlja grubi proračun koji razmatra hidrogeološku sredinu kao homogenu u potpunosti što ona svakako nije. Međutim, i pored svih nedostataka, pre svega u detaljnijim podacima o hidrogeološkoj sredini i njenim parametrima pomoću kojih je moguće uraditi daleko detaljniju analizu, ovaj model govori da na osnovu pretpostavljene veličine poroznosti možemo definisati radijus dejstva tunela. U konkretnom slučaju, pretpostavljena poroznost od 4% i 6% ukazuju da je radijus dejstva tunela 15 m, odnosno 10 m u odnosu na osu tunela što je posmatrano kao najprihvatljivija varijanta s obzirom na poznatu činjenicu da su jedine promene detektovane na pijezometrima PP-1 i PP-3 koji su projektovani i izvedeni 10-12 m udaljenosti od ose tunela. Najverovatnije je poroznost daleko veća u zoni pijezometra PP-3 u odnosu na zonu pijezometra PP-1, s obzirom na sve navedene činjenice koje ukazuju na potencijalno prisustvo hipogenog karsta, dok za zonu pijezometra PP-4 veličinu poroznosti ne možemo ni pretpostaviti.

Analiza rezultata kvalitativnih karakteristika podzemnih voda na celom istražnom području, prikupljenih na svim hidrogeološkim pojavama (izvorima), objektima (pijezometrima) i hidrotehničkom tunelu bili su osnova za izdvajanje tipova hidrogeoloških sistema, odnosno definisanja konceptualnog modela hidrogeoloških sistema zone Vidličke navlake. Svakako, kao što je već navedeno u uvodnom delu, najrelevantniji trenutak za definisanje prirodnog režima podzemnih voda na istražnom terenu bio je onaj kada je tunel bio van funkcije, odnosno neposredno pre njegovog ponovnog punjenja, jer je u tom trenutku sredina bila rasterećena pritiska akumulacione vode. S obzirom na selokupno već izvršenu analizu svih prikupljenih parametara, hemijskog sastava voda, njihove zavisnosti sa atmosferskim vodama, uticaja utisnutih tunelski voda, izvršeno je izdvajanje hidrogeoloških sistema po kriterijumu dva osnovna fizičko-hemijska parametra - elektroprovodljivosti i temperature, jer oni predstavljaju osnovne indikatore porekla i vremena boravka voda u hidrogeološkoj sredini. Izdvojeni su lokalni (plitki), intermedijalni (prelazni) i regionalni (duboki) hidrogeološki sistemi, čime je definisan kompleksni hidrogeološki sistem na istražnom području.

VI ZAKLJUČAK

Na osnovu detaljne kvantitativno-kvalitativne analize podzemnih voda koje su osmatrane na više izvora, piježometara, vodotoku i u hidrotehničkom tunelu može se konstatovati da samo uspostavljanjem osnovnih principa istraživačkog procesa koji su uključili pre svega detaljno formiranje monitoring mreže i primenu više naučnih metoda istraživanja moguće je izvršiti procenu i prognozu rizika uticaja hidrotehničkog objekta na hidrogeološku sredinu i samo funkcionisanje ovih objekata.

Istraživanja koja su sprovedena za potrebe izrade doktorske disertacije i rešavanja postavljenog naučnog problema, bazirala su se na dosta oskudnom fondu podataka o prethodno sprovedenim istraživanjima na istražnom terenu. Uglavnom su svi dostupni podaci bili vezani za osnovne geološke karakteristike terena prikazane na osnovnim geološkim kartama (R 1:100.000), osnovnim geološkim karakteristikama stena koje su kartirane tokom izgradnje tunela (duž tunela HE Piroć i 3 piježometra), bez uspostavljenog monitoringa podzemnih voda. Međutim, istraživanja sprovedena tokom 2014. godine od strane prof. Jemcova i saradnika obuhvatila su detaljna istraživanja geoloških i hidrogeoloških karakteristika istražnog terena sa uspostavljenim kontinualnim monitoringom kvantitativnih karakteristika u piježometrima i tunelu, ali i razmatranje hemijskog sastava uzorkovanih voda što je svakako bila najbolja osnova za planiranje daljih istraživanja koja su izvršena tokom 2016. godine. Dodatni izazov predstavljala je poznata činjenica da je istražno područje i u geološkom i tektonskom pogledu veoma složeno, što je podrazumevalo i potencijalno prisustvo kompleksnih hidrogeoloških uslova. U ovako kompleksnim geološkim i hidrogeološkim uslovima sredine izveden je i veštački objekat, tunel kojim se vrši transport akumulacione vode pod pritiskom što je istražno područje učinilo još kompleksnijim. U ovakvim sredinama analiza kvantitativnih i kvalitativnih karakteristika podzemnih voda u značajnoj meri može da doprinese utvrđivanju procesa interakcije podzemnih i transportovanih tunelskih voda. Definisanje stepena zavisnosti ovih voda i u hidrauličkom i u hidrohemijском smislu predstavljaju značajne indikatore postojanja potencijalno ugroženih zona životne sredine/ hidrogeološke sredine i samog hidrotehničkog tunela.

U konkretnom slučaju, iako u uslovima dosta malog i nedovoljnog broja osmatračkih objekata/piježometara koji su izvedeni na trasi tunela (samo 3, od kojih su se 2 pokazala funkcionalna) sam hidrotehnički tunel predstavljao je najvažniji osmatrački objekat. Upravo na osnovu monitoringa sprovedenog u tunelu i dva funkcionalna piježometra izvršena je detaljna analiza kvantitativnih i kvalitativnih karakteristika podzemnih i akumulacionih voda sa ciljem dobijanja realnog stanja veštačkog objekta i prirodne sredine, odnosno definisanja njihove interakcije i stepena ugroženosti. Iako je čest slučaj da se monitoringom osmatraju samo kvantitativne karakteristike voda sa ciljem definisanja hidrauličke zavisnosti tunelskih i podzemnih voda, kvalitativne karakteristike ne smeju biti izostavljene jer hidrohemijske osobine podzemnih voda omogućavaju bolju i sveobuhvatnu analizu stepena zavisnosti analiziranih voda. Upravo kvalitativne karakteristike ukazuju na ugrožene zone životne sredine i objekta, koje svojim agresivnim osobinama nepovoljno deluju na stanje geološke/hidrogeološke sredine i stanje betonske obloge odnosno stabilnost tunela. Izdizanjem podzemnih voda agresivnih osobina u više slojeve sredine pod pritiskom tunelskih voda uzrokuje veštačko rastvaranje stenskih masa, posebno ako su u pitanju lako rastvorljivi sedimenti kao što su karbonatne stene. U ovakvim uslovima, tokom vremena može doći i do značajne nestabilnosti u geološkoj sredini i ugroženosti terena u delovima gde je ovakav proces izuzetno intenzivan. Na analiziranom području takva zona je detektovana na 4. kilometru tunela, tačnije na stacionaži tunela 4+230 m i piježometru PP-3 gde je na osnovu analize kvantitativnih i kvalitativnih karakteristika podzemnih voda utvrđeno prisustvo izuzetno agresivnih voda jedinstvenog hemijskog sastava, Na-Cl-SO₄ tipa. Ove vode agresivno deluju na armirano-betonsku oblogu tunela (pre svega od strane Cl i SO₄ jona koji utiču na rastvaranje Portland cementa) što je dovelo i do njene značajne oslabiljenosti,

usled čega je omogućena izuzetno dobra hidraulička veza hidrogeološke sredine i transportovanih tunelskih voda koje pod pritiskom izdižu podzemne vode 42 metra iznad svog prirodnog stanja u uslovima kada je radni pritisak tunela oko 4 bara. Imajući u vidu činjenicu da je u ovoj zoni tunela, nadsloj stenskih krečnjačkih sedimenata najmanji i iznosi oko 70 metara ovakav stepen interakcije voda ukazuje da je ovaj deo terena izuzetno nestabilan i zahteva pored saniranja stanja betonske obloge (injektiranja) i formiranje kontinualnog monitoring u cilju praćenja stanja prirodne geološke/hidrogeološke sredine. Kontinualni monitoring podzemnih voda, posebno u ovoj hidraulički najaktivnijoj zoni je posebno važan u uslovima kada se postiže i veći radni pritisak, koji pri maksimalnoj koti uspora akumulacije može biti oko 8 bara. U ovoj zoni tunela, gde se dešava najintenzivnija hidraulička veza tunela i hidrogeološke sredine najverovatnije je došlo do formiranja hipogenog karsta u višim delovima terena usled utiskivanja slanih voda, izuzetno agresivnih u karbonatne sedimente koje intenzivno razlažu prirodnu stensku masu i formiraju velike pećine i kaverne, koje dodatno mogu biti indikator ugroženosti cele sredine. Pored toga, detektovane vode u tunelu ukazuju na pojavu H_2S gasa i voda povišene temperature što je dodatna potvrda postojanja uslova koji potencijalno omogućavaju stvaranje procesa hipogene speleogeneze. Međutim, ove vode se usled pritiska akumulacione vode izdižu i kao takve posredstvom Cl jona, koji ima jaku migracionu sposobnost detektuju u piježometru PP-1 i celoj zoni tunela koja se prostire na oko 3 km, od ukupno 9 km tunela. Iako je ova zona hidraulički zavisna od PP-1 do PP-3 ta zavisnost je najverovatnije dosta dinamičnija u hidrogeološkoj sredini nego direktno sa tunelom, što je vidljivo samim procurivanjima u tunelu. Ali konstantna promena pritiska, posebno prosek pražnjenje tunela i ponovnog punjenja sa stalnim izdizanjem i spuštanjem visokomineralizovanih voda dodatno povećavaju njihovo agresivno dejstvo u celom ovom delu terena, što vremenom može značajno uticati na stepen ugroženosti tunela i njegove obloge, odnosno stabilnost objekta. Posebno je važna i pretpostavka da se u ovom delu hidrogeološke sredine dešava potencijalna izmena prirodnih tokova cirkulacije podzemnih voda, u procesu utiskivanja transportovanih tunelskih voda pod pritiskom.

Iako postojanje samo 2 osmatračka objekata na trasi tunela koji su u funkciji deluje dosta oskudno, u uslovima kada ne postoji bolja osmatračka mreža moguće je izvršiti dosta dobru i pouzdanu analizu, posebno ukoliko se izvrši njihova komparativna analiza sa podacima osmotrenim u tunelu, odnosno zonama tunela. Separatna analiza podataka može dovesti do donošenja pogrešnih zaključaka o stanju i stabilnosti/ugroženosti životne/geološke sredine i hidrotehničkog tunela. Upravo komparativnom analizom podataka piježometara PP-1 i PP-3 i zona tunela koje po stacionažama odgovaraju ovim piježometrima definisan je stepen interakcije analiziranih voda i ugroženost/nestabilnost u celoj razmatranoj zoni od gotovo 3000 metara dužine tunela. Iz navedenog razloga u ovoj zoni je izuzetno važno uspostaviti veći broj osmatračkih objekata kako bi se srećili negativni efekti.

Istraživanja koja su izvršena u delu tunela gde nije postojao funkcionalan piježometar (slučaj piježometra PP-4) nisu mogla poslužiti za donošenje nekih značajnijih i pre svaga osnovanih zaključaka o stepenu interakcije podzemnih i akumulacionih voda. Iako je najverovatnije da ovaj piježometar nije u interakciji sa tunelom zbog svoje tehničke neispravnosti, potpuno odsustvo hidrauličke i hidrohemijske povezanosti voda uzorkovanih u tunelu koje po stacionažama odgovaraju ovom piježometru može da ukaže i na potencijalno dobru izolovanost tunela i dobro stanje betonske obloge. Stoga je možda u ovom delu tunela najneophodnije izvođenje novih osmatračkih objekata kako bi se mogao definisati stepen interakcije podzemnih i akumulacionih voda.

Sama funkcionalnost tunela se često definiše samo na osnovu merenja sumarnih gubitaka u šahti tunelske zatvaračnice i vodostanu tunela. Ovakva, u većini slučajeva ustaljena procedura merenja veličine gubitaka vode iz tunela bez sinhronih merenja stanja podzemnih voda u piježometrima koji su izgrađeni na trasi tunela, pokazala se kao dosta površna i nedovoljna za sagledavanje realnog stanja objekta. Tako je u konkretnom primeru, sinhronim merenjima u postupku testa određivanja sumarnih

gubitaka voda iz tunela u šahti tunelske zatvaračnice i pijezometru PP-3 utvrđeno da su dobijeni gubici daleko veći u odnosu na izračunate jer su bili umanjeni na osnovu evidentnih dotoka iz hidrogeološke sredine. U toku ovog postupka, pokazalo se da je nivo podzemnih voda u PP-3 direktno zavisao od radnog pritiska tunela, što je bio prvi indikator postojanja izuzetno dobre hidrauličke veze podzemnih i tunelskih voda. Međutim, i pri ovim spovedenim istraživanjima nije se ispoštovala procedura merenja sumarnih gubitaka u celosti jer usled nepristupačnosti vodostanu nisu vršena merenja na ovom objektu tunela, već samo u šahti tunelske zatvaračnice. Merenjima u isto vreme u šahti tunelske zatvaračnice i vodostanu bi se moglo jasno sagledati u kom pravcu intenzivnije gravitiraju gubici, odnosno dotoci. Posebno je važno merenje temperature i elektroprovodljivosti voda na oba merna mesta kako bi se detaljnom analizom već u ovoj fazi istraživanja detektovali prilivi iz zona tunela u koji usled oslobađanja pritiska dotiče voda različite mineralizacije i/ili temperature.

Istraživanja sprovedena u tunelu, bila su od posebne značajnosti koja su ukazala da samo detaljno sprovedena kvantitativno/kvalitativna analiza voda koje procuruju u njegovu unutrašnjost kroz oblogu može jasno definisati ugrožene zone. Međutim neka pitanja i dalje ostaju otvorena, posebno kada su u pitanju vode koje slobodno ističu u ispražnjen tunel na stacionaži 7+350 m, preko Čombetovog izvora. Izvedeni sanacioni radovi obezbeđuju stabilnost tunelske konstrukcije regulacijom pritiska podzeme vode koja deluje na betonsku oblogu, što predstavlja važan i povoljno rešen problem gledano sa aspekta podzemnog objekta. Međutim, kakve su posledice izvedenih sanacionih radova na životnu sredinu, konkretno hidrogeološku sredinu često ostaju otvorena pitanja, nedovoljno analizirana. Pretežno su sva istraživanja bazirana na monitoringu hidrogeoloških pojava i objekata (izvora, bunara) i njihove izdašnosti koja je uglavnom opala u toku pojave naglog priliva podzemnih voda u tunel. Nakon potpunog injektiranja kritičnih zona u tunelu, i blokiranja dotoka vode u tunel nivo podzemne vode u izdani se stabilizuje i vrati u početno stanje. Ali u slučaju izvedenih radova koji ne uključuju potpuno zaptivanje, već samo slobodno isticanje podzemnih voda (kaptiranje) u tunel ostaje otvoreno važno pitanje kako se izvor u tunelu ponaša kada se objekat stavi u fazu eksploatacije i određeni radni pritisak. Da li u tom slučaju kaptirani izvor može predstavljati zonu kroz koju se voda gubi i utiskuje u hidrogeološku sredinu, usled čega može doći do potpune promene prirodnih pravaca cirkulacije podzemnih voda. U slučaju Čombetovog izvora, najverovatnije je došlo do potiskivanja ovih voda u uslovima pritiska tunelske vode od 4 bara što je vidljivo kroz porast temperature u periodu ispražnjenog tunela. U tom slučaju su se možda mogli promeniti i tokovi cirkulacije ovih voda koje su vezane za zonu isticanja oko Vidličke navlake, odnosno voda iz dubljih delova terena.

Posebna značajnost istraživanja sprovedenih u tunelu pokazala su se kod detektovanja prelaznog/intermedijalnog hidrogeološkog sistema koji svakako ne bi bilo moguće definisati samo na osnovu osmatranja na površini terena (slušaj lokalnog i regionalnog) već samo na osnovu ispitivanja voda koje procuruju direktno u tunel kroz betonsku oblogu. Detektovanje Na-Cl voda u tunelu ukazala su na postojanje slanih voda koje su zarobljene u hidrogeološkoj sredini i najverovatnije nastaju razlaganjem evaporita/halita, sa dodatnim koncentracijala SO_4 jona koji ukazuje na razlaganje evapotita/gipsa-anhidrita iako ovi sedimenti nisu otkriveni na površini terena. Stoga, ovakva istraživanja mogu poslužiti u procesu rekartiranja, kako bi se neotkrivene litostratigrafske jedinice naknadno ucertale.

Iako sprovedena istraživanja o kvalitativno/kvantitativnom režimu podzemnih voda na izvorima nisu pokazala direktnu zavisnost sa tunelom, ona su bila izuzetno važna za definisanje tipova hidrogeoloških sistema, posebno lokalnih koji se nalaze dosta iznad i regionalnih koje se nalaze dosta ispod potencijalnog uticaja tunela pod pritiskom. Međutim, iako sam visinski položaj svih analiziranih izvora u startu može biti pokazatelj odsustva direktne veze sa režimom rada tunela,

pritisak se svakako ne sme razmatrati samo u vertikalnom smeru, već u svim smerovima podjednako kako se i prenosi.

Ovako prikazana metodologija istraživanja treba biti primenjena kod svih veštačkih objekata, sličnih ili istih karakteristika čiji radni režim može negativno uticati na prirodnu sredinu, odnosno kada prirodna sredina tokom vremena može nepovoljno uticati na rad/funkcionalnost objekta. Posebna pažnja treba biti posvećena objektima koji su izgrađeni u veoma kompleksnim geološkim/hidrogeološkim uslovima sa oskudnim brojem osmatračkih objekata.

S obzirom na poznatu činjenicu da tunel pod pritiskom izdiže vode u više slojeve i transportuje agresivnu vodu u druge delove sredine, pri čemu se ona „razblažuje” usled procesa mešanja sa akumulacionom vodom a vremenom akumulaciona voda postaje dominantna u odnosu na podzemnu, u konkretnom slučaju potrebno je redukovati proces pražnjenja tunela kada se vrši remont objekta i svesti ga na optimalni režim. Čestim pražnjenjem tunela na svakih 2 godine, dolazi do konstantnog izdizanja visokomineralizovanih agresivnih voda u više delove sredine pri čemu se dodatno stvaraju još nepovoljniji uslovi koji dodatno narušavaju prirodno stanje geološke/hidrogeološke sredine. Pored toga neadekvatno rukovođenje veštačkih objekata može izazvati i velike probleme u samom objektu/tunelu jer visokoagresivne podzemne vode negativno utiču na stabilnost obloge tunela usled čega može doći do ozbiljnih kolapsa u objektu. Zbog toga je jako važno sprovođenje postavljenih istraživačkih principa sa primenom više metodoloških postupaka sa ciljem utvrđivanja stepena interakcije podzemnih voda i voda transportovanih tunelom pod pritiskom kako bi se rizik po hidrogeološku sredinu ali i sami tunel sveo na minimum.

Autor:

U Beogradu, 2024.godine

Marina Čokorilo Ilić, dipl. inž. geologije

LITERATURA

1. Ahmad, A. & Kuma, A. 2013: Chloride ion migration/diffusion through concrete and test methods, International Journal of Advanced Scientific and Technical Research, Issue 3 volume 6, pp. 151-180
2. Ala'a H.E., Al-Husseini., 2012: Study of potential Corrosion and Scaling for Treated Water of Two Water Treatment plants in Al-Hilla City. Journal of Babylon University/Engineering Science. 4(20), 234-241.
3. Appelo C., Postma D., 2005: Geochemistry, Groundwater and Pollution. 2nd Edition, Balkema, Rotterdam. <http://dx.doi.org/10.1201/9781439833544>
4. Appelo C.A.J., 2005: Postma, D. Geochemistry, Groundwater and Pollution, 2nd ed.; A. A. Balkema Publishers: Amsterdam, The Netherlands, pp. 1–634.
5. Appelo CAJ., Postma D., 1993: Geochemistry, Groundwater and Pollution, second ed. Brookfield, Rotterdam.
6. Barbarosa C., et al, 2018: Sodium sulfate attack on Portland cement structures: experimental and analytical approach. REM, Int. Eng. J. Vol 71, no 4.
7. Bauer G. 1994: How to control groundwater in tunnelling projects. Tunnels and Tunnelling, June issue, pp.55-57
8. Bianchetti G. et al., 1992: Deep groundwater circulation in the Alps: Relations between water infiltration, induced seismicity and thermal springs. The case of Val d'Illiez, Wallis, Switzerland, Eclogae geol. Helv. 85/2: 291 -305
9. Bicalho CC., Batiot-Guilhe C., Seidel JL., Van Exter S., Jourde H., 2012: Geochemical evidence of water source characterization and hydrodynamic responses in a karst aquifer. J. Hydrol. 450, pp. 206-218. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.04.059
10. Blake S., Henry T., Murray J., Flood R., Muller MR., Jones AR., Rath V., 2016: Compositional multivariate statistical analysis of thermal groundwater provenance: A hydrogeochemical case study from Ireland. Appl. Geochem. 75, 171–188
11. California Department of Transportation, Materials Engineering and Testing Services, Corrosion Technology Branch, 2003. Corrosion guidelines. Sacramento.
12. Cerny CA., Kaiser HF., 1977: A study of a measure of sampling adequacy for factor-analytic correlation matrices. Multivar. Behav. Res. 12(1), pp.43-47
13. Ćuk M., 2018: Hidrogeohemija prirodnih radioaktivnih elemenata u podzemnim vodama Srbije, Doktorska disertacija, Departman za hidrogeologiju, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
14. Ćuk, M., Jemcov, I., Mladenović, A., Čokorilo Ilić, M., 2020: Hydrochemical impact of the hydraulic tunnel on groundwater in the complex aquifer system in Pirot, Serbia, Carbonates and Evaporites, Springer Science and Business Media LLC, vol 35
15. Čokorilo Ilić, M., Ćuk, M., Mladenović, A., Jemcov, I., 2018: Definisane kompleksnog hidrogeološkog sistema na primeru hidrotehničkog tunela HE Pirot, 17. Kongres geologa Srbije, Zbornik apstrakata, Srpsko geološko društvo, pp.522-525
16. Čokorilo Ilić, M., Mladenović, A., Ćuk, M., Radosavljević J., Šišović, J., Jemcov, I., 2018: Analiza uticaja tunela HE „Pirot” na kvantitativne karakteristike podzemnih voda, Zbornik 8. Simpozijuma o zaštiti karsta, Pirot, pp.7-17
17. Čokorilo Ilić, M., Mladenović, A., Ćuk, M., Jemcov, I., 2019: The importance of detailed groundwater monitoring for underground structure in karst (Case study: HPP Pirot, Southeastern Serbia), *Water* 2019, Special Issue: Hydraulic Behavior of Karst Aquifers, 11(3), 603
18. Cvijić J., 1918: Podzemna hidrologija i morfološka evolucija karsta, Posebno izdanje Srpskog geografskog društva, Sveska 35, Beograd 1957 (original 1918. godine)

19. Dimitrijević N., 1988: Hidrohemija. Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, p. 313
20. Đorđević B. 1981: Korišćenje vodnih snaga. Osnove hidroenergetskog korišćenja voda, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu.
21. Đorđević B. 1989: Korišćenje vodnih snaga II, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu. p. 472
22. Dragišić V., 1997: Opšta hidrogeologija. Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, p. 434
23. Dragišić V., 2005: Hidrogeologija ležišta mineralnih sirovina, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, p. 242
24. Dragišić V., Polomčić D., 2009: Hidrogeološki rečnik. Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, p. 572
25. Dragišić V., Živanović V., 2014: Opšta hidrogeologija. Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd p. 487
26. Enrgoprojekt Beograd., 1978: Tehnički izveštaj i hidraulički proračun. HE Zavoj, Knjiga X, Sveska 2, Ulazna građevina.
27. Enrgoprojekt Beograd., 1978: Tehnički izveštaj i hidraulički proračun. HE Zavoj, Knjiga X, Sveska 3, Zatvaračnica
28. Enrgoprojekt Beograd., 1978: Tehnički izveštaj i hidraulički proračun. HE Zavoj, Knjiga X, Sveska 4, Vodostan.
29. Fetter C.W., 2001: Applied Hydrogeology 4th ed. Prentence-Hall Inc. New Jersej, ISBN 0-13-088239-9. 598
30. Filippi M., Bruthans J., Palatinus L., Zare M., Asadi N., 2011: Secondary halite deposits in the Iranian salt karst: general description and origin. International Jurnal od Speleology. 40 (2), pp.141-162
31. Fendekova et al, 2011: Groundwater aggressiveness assessment according to EN 206-1: data, methods and application on groundwater in the Horna Nitra basin, Slovakia, Environ Earth Sci. 64, pp. 461–470
32. Ghobadi et al., 2016: Relationships between geological formations and groundwater chemistry and their effects on the concrete lining of tunnels (case study: Tabriz metro line 2). Environ Earth Sci 75:987, pp.1-14
33. Grubić A., Obradović J., Vasić N., 1996: Sedimentologija. Univerzitet u Beogradu, p.436
34. Han G., Tang Y., Wu Q., Tan Q., 2010: Chemical and strontium isotope characterization of rainwater in karst virgin forest, Southwest China. Atmospheric Environment. Vol 44. Issue 2. pp.174-181
35. Hassani, A.N., Katibeh, H., Farhadian, H., 2016: Numerical analysis of steady-state groundwater inflow into Tabriz line 2 metro tunnel, northwestern Iran, with special consideration of model dimensions, Bull Eng. Geo. Environ., pp.1617–1627
36. Hiscock K., 2005: Hydrogeology, Principles and practice. Blacvell Publishing. p. 389
37. Hoek E., 2001: Big tunnels in bad rock. 2000 Terzaghi Lecture. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 127, No. 9. September 2001, pp. 726-740.
38. Jain S., 2014: Fundamentals of Physical Gelology. Springer Geology, pp.1-488
39. Jemcov I. i saradnici, 2015: Elaborat o izvedenim detaljnim istraživanjima duž trase tunela „HE Pirot”u cilju utvrđivanja stanja tunela i uticaja podzemnih voda, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
40. Jemcov I. i saradnici, 2016/2017: Studija stanja betonske obloge hidrotehničkog tunela „HE Pirot” i kvantitativno-kvalitativna analiza interakcije podzemnih voda sa vodama transportovanih hidrotehničkim tunelom, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

41. Jemcov I., 2008: Bilans karstnih izdanskih voda i optimizacija rešenja njihovog zahvata na primerima iz Srbije, Doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
42. Jemcov I., 2019: Hidrogeološko kartiranje. Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, p. 308
43. Jemcov I., Petrič M., 2009: Measured precipitation vs. effective infiltration and their influence on the assessment of karst systems based on results of the time series analysis. *Jurnal of Hydrology*, 379(3-4), pp.304-314
44. Jeftović B., 1958: Geološki sastav i tektonika terena severno od Pirota sa naročitim obzirom na mezozojske formacije, Diplomski rad, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
45. Johnoson K., 1996: Gypsom karst in the United States. *International Jurnal od Speleology* 25 (3-4), pp. 183-193
46. Khaska, M. et al, 2013: Origin of groundwater salinity (current seawater vs. saline deep water) in a coastal karst aquifer based on Sr and Cl isotopes. Case study of the La Clape massif (southern France), *Applied Geochemistry*, pp. 212-227
47. Klimchouk A., 2007: Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective, National Cave and Karst Research Institute, Carlsbad. p.106
48. Komatina M., 1984: Hidrogeološka istraživanja – metode istraživanja I, SOUR „Geozavod“, Beograd
49. Kovačević J., 2014. Savremeno građenje u podzemlju. AGM knjiga, Beograd, p.679
50. Krautner H. G., Krstić, B., 2003: Geološka karta Karpato-Balkanida između Mehadia, Oravita, Niša i Sofije. Geološki institute Srbije, Beograd
51. Krešić N., 1991: Kvantitativna hidrogeologija karsta sa elementima zaštite podzemnih voda, Naučna knjiga, Beograd p.179
52. Krnić O., 2012: Mineralne vode, Univerzitetski udžbenik, RGF, Univerzitet u Beogradu, Beograd
53. Larocque M., Mangin A., Razack M., Banton O., 1998: Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a alarge karst aquifer (Charente, France). *Jurnal of Hydrology*, Vol 205. Issues 3-4, pp.217-231
54. Leitz F., Guerra K., 2013: Water Chemistry Analysis for Water Conveyance, Storage and Desalination Projects Manuals and Standards Program, Technical Service Center, Water Treatment Group, Colorado USA.
55. Lin, W.S., Liu, C.W., Li, M.H., 2016: Influences of specific ions in groundwater on concrete degradation in subsurface engineered barrier system, *SpringerPlus*, pp.1-18
56. Ljubisavljević, D., Babić, B., Šušić, I., 2006: Proračun doza hemikalija za stabilizaciju vode, *Vodoprivreda*, 38 , 77-83
57. Majkić-Dursun B., Petković A., Boreli-Zdravković Đ., 2016: Potencijal korozivnosti aluvijalnih podzemnih voda u slivu Velike Morave. *Zaštita materijala* 57 (3), pp.404-411
58. Mandić M., 2015: Karstna vrela Pirotske kotline. *Pirotski zbornik* br.40. pp. 203-225
59. Mangin A., 1984: Pour une meilleure connaissance des sys-tèmes hydrologiques á partir des analyses corrélatoires et spectrales. – *J. Hydrology*, 67, 25–43.
60. Marinos P., 2001: Tunnelling and mining in karstic terrane, an engineering challenge. *Geotechnical & Environmental Applications of Karst Geology & Hydrogeology*, pp.1-16
61. Massart DL., Kaufman L., 1983: The interpretation of analytical chemical data by the use of Cluster analysis. Wiley, New York.
62. Massei N., Mahler B.J., Bakalowicz M., Fournier M., Dupont J.P., 2007: Quantitative interpretation of specific conductance frequency distribution in karst. *Ground Water* 45 (3), pp. 288–293
63. McLennan SM., Murray RW., 1999: Geochemistry of Sediments, in: Marshall CP, Fairbridge RW. (Eds.), *Encyclopedia of geochemistry*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, pp. 75-76.

64. Milanović P., 1979: Hidrogeologija karsta i metode istraživanja, monografija, HE Trebišnjica, Trebinje
65. Milanović P., 1999: Geološko inženjerstvo u karstu, monografija, Energoprojekt, Beograd
66. Milanović P., 2006: Karst Istočne Hercegovine i Dubrovačkog priobalja, Beograd p.362
67. Milojević N., 1969: Hidrogeologija Pirotske banjice. Zbornik radova RGF, knjiga 11-12, Beograd
68. Mir RA., Jeelani G., Dar FA., 2015: Spatio-temporal patterns and factors controlling the hydrogeochemistry of the river Jhelum basin, Kashmir Himalaya. *Environ. Monit. Assess.* 188, pp. 438-446. DOI: 10.1007/s10661-016-5429-6
69. Mossmark F., 2010: Groundwater Chemistry Affected by Underground Constructions. Publ. LicChalmers University of Technology, Gothenburg.
70. Najafi, M.R., Nabipour, M., 2012: The effect of step on the hydraulic characteristics of the subcritical free surface flow in conveyance tunnel, *Tunnelling and Underground Space Technology*, pp.212–217
71. Padilla A., Pulido-Bosch A., 1995: Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis. *J Hydrol* 168:73–89
72. Panagopoulos P.G., Lambrakis N.J., 2006: The contribution of time series analysis to the study of the hydrodynamic characteristics of the karst systems: Application on two typical karst aquifers of Greece (Trifilia, Almyros Crete). *Journal of Hydrology* 329(3). pp.368-376
73. Panno S.V., Hacklez K.C., Hwang H.H., Greenberg S., Krapac I.G., Landsberger S., O’Kelly D.J., 2002: Source identification of sodium and chloride contamination in natural waters: Preliminary results. Conference: The 12th Annual Conference of the Illinois Groundwater Consortium At: Makanda, IL, pp. 1-26
74. Prohaska S., 2006: Hidrologij II deo. Hidrološko prognoziranje, modelovanje i praktična primena. Rudarsko-geološki fakultet, Beograd; Institut za Vodoprivredu „Jaroslav Černi ” , Beograd; Republički hidrometeorološki zavod Srbije, Beograd, p.596
75. Prohaska S., 2003: Hidrologija I deo. Hidro-meteorologija, hidrometrija i vodni režim. Rudarsko-geološki fakultet, Beograd; Institut za Vodoprivredu „Jaroslav Černi ” , Beograd; Republički hidrometeorološki zavod Srbije, Beograd, p.428
76. Rajaković-Ognjanović V., 2011: Uticaj kvaliteta vode na koroziju čelika, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet
77. Republika Srbija, Projekat rehabilitacije transporta, 2012: Priručnik o projektovanju puteva u Republici Srbiji. Projektovanje tunela. Obloga tunela, portali, spoljni objekti. Javno preduzeće Putevi Srbije, Beograd
78. Republički hidrometeorološki zavod, 2017: Meteorološki godišnjak 1. Klimatološki podaci 2016. Beograd
79. Ristić V., 2007: Razvoj simulacionog modela za proračun dnevnih isticanja iz karstnih vrela, Doktorska disertacija, Departman za hidrogeologiju, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
80. Roberge P.R., 2007: Corrosion Inspection and Monitoring, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA
81. Samu A., Csepe Z., Barany-Kevei I., 2013: Influence of meteorological variables to water quality in five lakes over the Aggtelek (Hungary) and Slovak karst regions – a case study, *Acta Carstologica*, pp. 121-133
82. Schicht R.J., i Walton W.C., 1961: Hidrologic budgets for three small watersheds in Illinois State water survey, Urbana
83. Sheikhy Narany T., Ramli MF., Aris AZ., Sulaiman WNA., Juahir H., Fakharian K., 2014: Identification of the Hydrogeochemical Processes in Groundwater Using Classic Integrated Geochemical Methods
84. Shen Z., Zhu Y., Zhong, Y., 1993: Hydrogeochemistry; Geological Publishing House: Beijing, China, pp. 1–189.

85. Shuster E., White W., 1971: Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs: a possible means for characterizing carbonate aquifer, *Journal of Hydrology* 14 (1971) 93-128
86. Stevanović Z., Milanović S., 2017: Metode hidrogeoloških istraživanja. Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd. p. 551
87. Stojanović, B., Đukić, B., Stojanović, N., Smiljanić, S., 2012: Korozija i zaštita rashladnog sistema, *Zaštita materijala*, 53 (1), pp.51-56
88. Tomanović Z., 2015: Tuneli i podzemne konstrukcije, Autorizovani tekst predavanja, Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, Podgorica, p. 116
89. Tóth J. and Hayashi M., 2010: The theory of basinal gravity flow of groundwater and its impacts on hydrology in Japan. *Journal of Groundwater Hydrology*, 52: 335-354.
90. Toth J., 1963: A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *J. Geophys. Res.*, vol.68, no.16, p.4795- 4812
91. Toth J., Hazashi M., 2011: The theory of basinal flow of groundwater and its impacts on hydrology in Japan. *Jurnal of Groundwater Hydrogeology* 52, pp.335-354
92. Uzunov N. , Jancev D., 2016: Trajnost betona izloženog betona na dejstvo vode, atmosferskih uticaja i hemijsku koroziju. Društvo građevinskih konstruktera Srbije, Zbornik radova Simpozijum 2016, pp. 1013-1022
93. Vasić Lj., 2017: Geneza i uslovi cirkulacije voda kompleksnih karstnih sistema Kučajsko-Beljaničkog masiva, Doktorska disertacija, Departman za hidrogeologiju, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
94. Wan, et al. 2013: Chloride content and pH value in the pore solution of concrete under carbonation, *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, pp.71-78
95. Ward Jr., J.H., 1963: Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *Journal of the American Statistical Association*, 58, pp.236-244.
96. Yang, X.L. & Wang, J.M., 2011: Ground movement prediction for tunnels using simplified procedure, *Tunnelling and Underground Space Technology*, pp.462–471
97. Yang H., Huiyang Q., Zhi D., Zhimin F., Zhifang Z., 2019: An analytical method for estimating leakage from a hydraulic pressure tunnel, *Hydrogeology Journal*, pp. 73-86
98. Zaidi FK., Nazzal Y., Kamran Jafri M., Naeem M., Ahmed I., 2015: Reverse ion exchange as a major process controlling the groundwater chemistry in an arid environment: a case study from northwestern Saudi Arabia Faisal K. *Environ. Monit. Assess.* 187, pp. 607-613.
99. Zarei H.R., Uromeihy, A. & Sharifzadeh, M., 2011: Evaluation of high local groundwater inflow to a rock tunnel by characterization of geological features, *Tunnelling and Underground Space Technology*, pp.364–373
100. Zhang C. et al., 2016: *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 8, pp. 499-512
101. Zhang, G. et al., 2016: Experimental study on the thermal performance of tunnel lining GHE under groundwater flow, *Applied Thermal Engineering*, pp.784–795
102. Zhang, L., Franklin J. A. 1993: Prediction of Water Flow into RockTunnels: an Analytical Solution Assuming an Hydraulic Conductivity Gradient, *Int. J. Rock Mec. Min. Sci.& Geomech. Abstr.* Vol.30, No 1, pp.37-46
103. Savezni geološki zavod 1977: Osnovna geološka karta 1:100 000, Tumač za listove Pirot i Breznik, Beograd
104. Čokorilo Ilić M., Popović M., Bajić M., Matović V., Abramović F., Alimpić F., 2024: Monitoring the Impact of Artificial Structure on Hzdrokeological Environment: A Case Stydy of Hydraulic Tunnel at Pirot Hydropower Plant, *Sensors* 24(20):6578. <https://doi.org/10.3390/s24206578>