Umjetno napajanje krškog vodonosnika na primjeru izvora Gradole

Kožul, Sandra

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:840354

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij geološkog inženjerstva

UMJETNO NAPAJANJE KRŠKOG VODONOSNIKA NA PRIMJERU IZVORA GRADOLE

Diplomski rad

Sandra Kožul
GI296

Zagreb, 2018.

Sveučilište u Zagrebu Diplomski rad

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

UMJETNO NAPAJANJE KRŠKOG VODONOSNIKA NA PRIMJERU IZVORA GRADOLE

Sandra Kožul

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo

Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Sažetak

Umjetno napajanje vodonosnika postaje sve interesantnija i češća metoda. Primjenu nalazi u sprječavanju prodora slane vode, obnovi onečišćenih vodonosnika, osiguravanja izdašnosti na izvoru. Za uspješno izvođenje umjetnog napajanja vodonosnika potrebno je imati ispunjene i određene hidrološke i hidrogeološke uvjete, te tu do izražaja dolazi heterogenost i osjetljivost krškog vodonosnika koja stvara probleme prilikom karakterizacije vodonosnika, odabira metode i lokacije za izvršenje napajanja. Na krškom vodonosniku sliva izvora Gradole koji se nalazi u središnjoj Istri, 1988. godine izvedeno je umjetno napajanje ulijevanjem vode iz akumulacije Butoniga izravno u ponor Čiže. Brzom reakcijom vodonosnika, unutar par dana, došlo je do povećanja izdašnosti na izvoru i osiguravanja dovoljne količine vode za vodoopskrbu.

Ključne riječi: krš, krški vodonosnik, umjetno napajanje, izvor Gradole

Diplomski rad sadrži: 52 stranice, 21 sliku, 9 tablica, 18 referenci, 2 priloga

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Jelena Parlov, izv. prof. RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Jelena Parlov, izv. prof. RGNF

Dr. sc. Kristijan Posavec, red. prof. RGNF

Dr. sc. Zoran Nakić, red. prof. RGNF

Datum obrane: 19.10.2018.

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Master's Thesis

ARTIFICIAL RECHARGE OF KARST AQUIFER ON THE EXAMPLE OF GRADOLE SPRING

Sandra Kožul

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Geology and Geological Engineering
Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Abstract

Artificial recharge of karst aquifer is becoming more and more interesting and common. The method is used to prevent seawater intrusions, in recovery of polluted aquifers, to ensure the neccessary spring discharge and much more. To be able to use this method successfully, certain hydrological and hydrogeological conditions must be met. This is when, due to heterogeneity and sensitivity of the karst aquifers, it becomes difficult to characterize them, select a method and choose the location for the recharge. The karst aquifer of Gradole spring basin, located in central Istria, was artificially recharged in 1988. The recharge was done by the inflow of water from the Butoniga reservoir directly into the Čiže swallow hole. By rapid reaction of the aquifer, within a couple of days, the discharge of the Gradole spring was increased, which provided a sufficient amount of water for the water supply.

Keywords: karst, aquifer karst, artificial recharge, Gradole spring

Thesis contains: 52 pages, 21 figures, 9 tables, 18 references, 2 appendices

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associate Professor Jelena Parlov, PhD

Reviewers: Associate Professor Jelena Parlov, PhD
Full Professor Kristijan Posavec, PhD
Full Professor Zoran Nakić, PhD

Date of defense: October 19, 2018.

Sadržaj

1. Uvod 1
2. Krški vodonosnici 2
2.1. Prirodno napajanje krških vodonosnika 3
2.2. Umjetno napajanje: uvjeti, mogućnosti i poteškoće 5
2.3. Karakterizacija krškog vodonosnika obzirom na upojnost 7
3. Sliv izvora Gradole 11
3.1. Geološke značajke 12
3.2. Hidrogeološke značajke 16
3.2.1. Izdašnost izvora Gradole 17
3.2.2. Podzemne veze između ponora Čiže i izvora Gradole 19
3.2.3. Utvrđivanje podzemne veze između ponora Čiže i izvora Gradole 1987. godine 21
4. Umjetno napajanje vodonosnika izvora Gradole 28
4.1. Količine ulijevane vode 29
4.2. Praćenje procesa ulijevanja 32
4.3. Praćenje promjene kakvoće vode 38
4.3.1. Temperatura vode 39
4.3.2. Koncentracija nitrata 40
4.3.3. Kalij permanganat 41
4.3.4. Koncentracija kisika 42
5. Analiza rezultata ulijevanja vode u ponor Čiže 43
5.1. Rezultati trasiranja 43
5.2. Utjecaj ulijevanja na izdašnost izvora Gradole 45
5.3. Analiza oscilacija izdašnosti izvora Gradole 46
6. Zaključak 50
7. Literatura 51

Popis slika

Slika 2.1. Prikaz epikrša, zadržavanja vode u saturiranoj zoni i podjele tokova na spori i brzi ulaskom u vadoznu zonu (prema Bakalowicz, 2005). 4

Slika 3.1. Položaj sliva izvora Gradole. 11

Slika 3.2. Izvor Gradole 12

Slika 3.3. Geološka karta sliva izvora Gradole (OGK 1: 100 000, listovi Rovinj (Polšak i Šikić, 1969) i Trst (Anonimno, 1951-1964)). Kartirane jedince: donja kreda (Barem - Apt K_1^{3+4}, Alb $_1K_1^5$), gornja kreda (Cenoman K_2^1), paleogen (Miliolidni vapnenac Pc,E_1, Alveolinski i numulitni vapnenac $E_{1,2}$, Flišne naslage $E_{2,3}$), kvartar q (terra rossa ts, aluvijani nanos al). 13

Slika 3.4. Ponor Čiže 17

Slika 3.5. Dnevni protoci izvora Gradole u razdoblju od 1.1.1994. do 31.12.2007. 18

Slika 3.6. Glavna recesijska krivulja za izvor Gradole 19

Slika 3.7. Promjena vodostaja u vremenu na izvoru Gradole 23

Slika 3.8.Prikaz količine vode na preljevu izvora, crpljene količine te kao zbroj, ukupne izdašnosti izvora 24

Slika 3.9. Mjerena aktivnost tricija u odnosu na vrijeme proteklo od trasiranja 25

Slika 4.1. Prikaz količine vode na preljevu, crpne količine, te ukupne izdašnosti za izvor Gradole od 1.9. do 31.12.1988. godine 35

Slika 4.2. Dnevne oborine u razdoblju od 1.9. do 31.12.1988 godine 37

Slika 4.3. Temperatura vode mjerena na izvoru Gradole, ponoru Čiže i akumulaciji Butoniga. 39

Slika 4.4. Koncentracija nitrata na izvoru Gradole (mjerena svakodnevno i tjedno), vodi ulijevanoj u ponor te u akumulaciji Butoniga (svakodnevno i tjedno). 40

Slika 4.5. Utrošak kalij permanganata na izvoru Gradole(prije i nakon kloriranja), vodi ulijevanoj u ponor, vodi iz akumulacije Butoniga. 41

Slika 4.6. Koncentracija kisika mjerena na izvoru Gradole, vodi ulijevanoj na ponor Čiže, te na akumulaciji Butoniga. 42

Slika 5.1.Prikaz koncentracije tricija u uzorcima vode o vremenu proteklom od trasiranja i količine ulijevane vode u ponor Čiže 43

Slika 5.2. Prikaz promjene izdašnosti izvora Gradole u vremenu te aproksimirane glavne recesijske krivulje za promatrano razdoblje. 45

Slika 5.3. Prikaz izdašnosti izvora, ulijevane vode i kišnih epizoda od 1.9. do 4.10. 47

Slika 5.4. Prikaz izdašnosti izvora, ulijevane vode i kišnih epizoda od 5.10. do 7.11. 48

Slika 5.5. Prikaz izdašnosti izvora, ulijevane vode i kišnih epizoda od 1.11. do 31.12. 49

Popis tablica

Tablica 2.1. Razmatrani kriteriji i definicija njihovih ocjena u ARAK metodi. 9

Tablica 3.1. Prikaz količine vode na preljevu izvora Gradole 1987. godine..... 22

Tablica 3.2. Odnos količine vode na preljevu(m^3/s) i vodostaja (cm) 22

Tablica 3.3. Količina crpljene količin na izvoru Gradole..... 23

Tablica 4.1.Prikaz crpljene količine, vremena crpljenja i agregata koji su bili u funkciji (ujedno i količina ulijevane vode i vrijeme ulijevanja) 30

Tablica 4.2. Prikaz količine vode na preljevu za 1988. godinu (m^3/s)..... 33

Tablica 4.3. Prikaz crpne količine na izvoru Gradole (m^3/s)..... 34

Tablica 4.4. Prikaz vodostaja i količine vode potoka Čiže..... 36

Tablica 4.5. Podaci o oborinama s kišomjerne stanice Botonega 37

Popis priloga

Prilog 1. Prikaz izdašnosti izvora (m^3/dan), uz količinu ulijevane vode u ponor (m^3/dan) te kiše u promatranom razdoblju (mm/dan)

Prilog 2a. Prikaz rezultata analize vode iz akumulacije Butoniga (na dubini od 4m)

Prilog 2b. Prikaz rezultata analize vode ulijevane u ponor Čiže

Prilog 2c. Prikaz rezultata analize vode sa izvora Gradole.

1. Uvod

S obzirom na sve češća onečišćenja i sve veću potrebu za pitkom vodom u pojedinim područjima, već desetljećima se pokušavaju pronaći najučinkovitiji načini iskorištavanja vodonosnika i eksploatacijskih količina te pročišćavanja i zaštite dostupnih količina vode.

Metoda umjetnog napajanja vodonosnika primjenjuje se, već dugi niz godina u mnogim državama i s različitim ciljevima. Od zaštite pitke vode od prodora slane vode, preko održavanja potrebne količine vode na izvorima i pročišćenja djelomično obrađenih otpadnih voda, umjetno napajanje vodonosnika našlo je mnogo primjena. U ovom radu prikazat će se najčešće svrhe i ciljevi reguliranog napajanja, kao i mogućnosti njegove primjene u krškim vodonosnicima.

Prikazat će se i metoda analize vodonosnika i njegovog napajanja koja se koristi za odabir povoljne lokacije na kojoj se, ukoliko to ekonomski, socijalni i ostali faktori dopuštaju, može izvršiti umjetno napajanje analiziranog vodonosnika.

Iako Hrvatska za sada uglavnom nema problema s količinama pitke vode, postoje situacije u kojima i mala promjena u izdašnosti izvora može stvoriti poteškoće u vodoopskrbi, što je dovoljan razlog da se iskuša metoda umjetnog napajanja vodonosnika.

U svrhu povećanja izdašnosti, a zbog nedostatka vode u vodoopskrbnom sustavu tijekom ljetnih mjeseci, 1988. godine izvršeno je probno umjetno napajanje vodonosnika izvora Gradole. U radu će se detaljno prikazati svi provedeni koraci umjetnog napajanja, geološke i hidrogeološke značajke sliva izvora Gradole te će se detaljno analizirati stanje ponora Čiže u koji je ulijevana voda, kao i reakcija izvora Gradole za vrijeme i nakon završetka umjetnog napajanja.

2. Krški vodonosnici

Zbog sve većih potreba za pitkom vodom te sve češćih zagađenja i onečišćenja podzemne vode i vodenih površina umjetno napajanje, tj. regulirano napajanje vodonosnika postaje sve interesantnija tehnika. Na svjetskoj razini ima mnogo uspješnih primjena umjetnog napajanja, bilo s ekonomskog, socijalnog ili političkog aspekta te je svakako za očekivati da će i u budućnosti riješiti mnogo vodoopskrbnih problema, pogotovo u suhoj, aridnoj i umjerenoj klimi. Upravo zbog toga umjetno napajanje vodonosnika uzima se kao vodeća strategija za integrirano upravljanje vodnim resursima (Daher et al., 2011).

Podzemna voda, kao i voda dobivena umjetnim napajanjem vodonosnika ima značajnije prednosti pri korištenju od površinske vode. Bitne značajke podzemnih voda svakako su konstantna temperatura, konstantni kemijski sastav bez patogenih organizama, većinom je bez boje i nije mutna, također zalihe su mnogo veće od zaliha površinske vode te ih je otežano kontaminirati (Pollak, 1997).

Metode reguliranog napajanja vodonosnika od posebnog su značaja za krške vodonosnike, pogotovo za mediteransko obalno područje gdje krški vodonosnici i prevladavaju. Krški vodonosnici najiskoristiviji su podzemni resursi, no veliki problem stvara njihova osjetljivost (Fleury et al., 2007).

Krški vodonsnici visoko su heterogeni sa složenim pukotinskim sustavom te različitim koeficijentima propusnosti i brzinama toka koji mogu varirati od nekoliko centimetara na dan do nekoliko stotina metara na sat. Unatoč velikoj nepredvidljivosti i promjenjivosti, krški vodonosnici se većinom mogu eksploatirati tijekom cijele godine i upravo se zato aktivno upravljanje napajanjem vodonosnika smatra najpovoljnijim pristupom. Može se reći kako je metoda i dalje marginalna te njeno izvođenje može biti uvelike ugroženo ukoliko se ne odrede i istraže sve značajke i potrebni parametri za potpunu karakterizaciju vodonosnika. Metodi treba pristupiti veoma pažljivo i na primjeren i racionalan način kako bi se osigurala njena uspješna provedba (Daher et al., 2011).

Od svih postojećih, krški vodonosnici su doista jedinstveni. Oblikovani su otapanjem i protokom vode unutar karbonatnih stijena. Prisutni su u više od 10 posto kontinentalnih područja bez leda i temelj su svih sedimentnih bazena. Računa se da osiguravaju vodu za oko 25 posto svjetske populacije (Ford and Williams, 2007), a u mediteranskom području za gotovo 50 posto stanovništva (Daher et al., 2011).

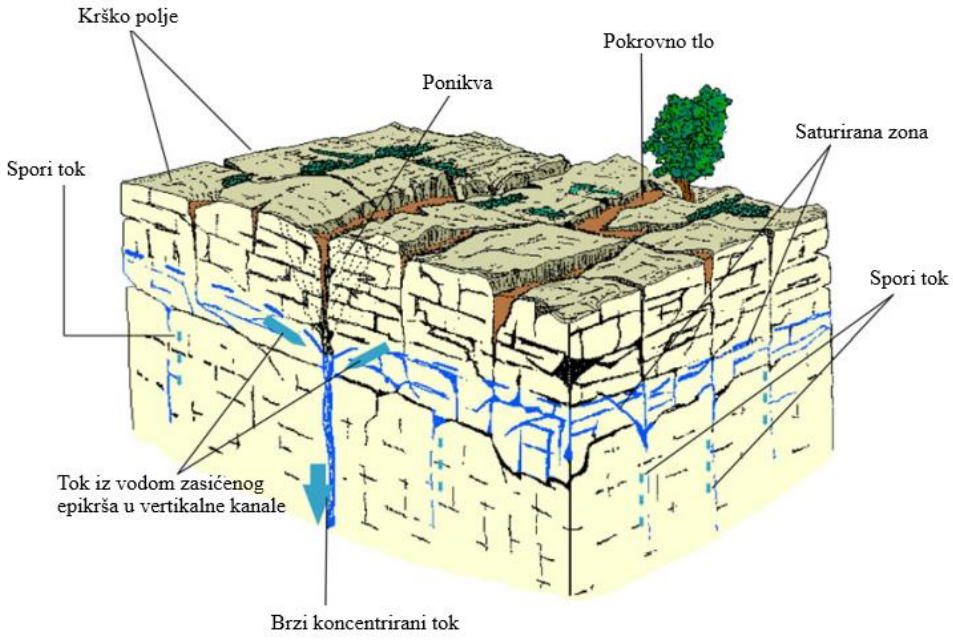
Krški sustavi smatraju se teško iskoristivim u vodoopskrbnom smislu i teško ih je zaštititi zbog već spomenute specifične heterogenosti. Također bilo kakva promjena u uvjetima koji kontroliraju ulaz ili izlaz podzemne vode (klimatske promjene, promjene razine baze, tektonsko podizanje ili klizanje) ujedno modificira i sam krški sustav. Stoga se pri promatranju i određivanju značajki ovih nepredvidljivih vodonosnika nailazi se na mnoge probleme i poteškoće. Prilično je otežano korištenje konvencionalnih hidrogeoloških 'alata' kao što su terenska opažanja, testovi crpljenja, geofizika površine i bušotine, te karata kako bi se pružile pouzdane informacije o cjelini vodonosnika. Također, nemogućnost određivanja reprezentativnog elementarnog volumena načinima koji su upotrebljivi za ostale vodonosnike dodatno otežava točnu karakterizaciju vodonosnika. Sve informacije koje se prikupe na navedene načine većinom su točne samo na lokalnoj razini (Ford and Williams, 2007).

Složene strukture unutar krša, te složenost krša kao sustava opravdavaju zašto su krški vodonosnici zanemarivani kao potencijalni okoliši za umjetno napajanje. Međutim, uz smanjenje zaliha pitke vode, povećanja potrebe za vodom i sve izraženijih klimatskih promjena umjetno napajanje vodonosnika dolazi do izražaja čak i u krškim područjima (Daher et al., 2011).

2.1. Prirodno napajanje krških vodonosnika

Prirodno napajanje krških vodonosnika vrši se pretežito putem oborina. Odvija se infiltracijom kroz nekonsolidirani materijal koji pokriva okršene stijene, difuznim napajanjem koje predstavlja ulaz vode u raspucanu i okršenu stijensku masu cijelom površinom ili koncentriranim napajanjem pri kojem dolazi do koncentriranog poniranja površinskih tokova u dublje slojeve. Zbog veličine površina koju difuzno napajanje zahvaća područje prvog kontakta stijenske mase i oborine od velikog je značaja i potrebno mu je pridodati posebnu pažnju.

Pripovršinski dio krške formacije najčešće prekriven tlom ili sedimentom, naziva se epikrš. Zona epikrša okarakterizirana je visokom sekundarnom poroznošću i visokim kapacitetom uskladištenja. Varijabilnost u raspodjeli pukotina i prirodi toka unutar epikrša, uvelike ga razlikuju od ostatka nezasićene zone koja za razliku od epikrša ima većinom prijenosnu ulogu s minimalnim uskladištenjem (Bakalowicz, 2005). Epikrš, kao veza između atmosfere i krškog vodonosnika ima značajnu ulogu u razvoju krških struktura. Glavna značajka epikrša je uskladištenje vode, dok smanjenje propusnosti sa dubinom pogoduje pojavi horizontalnog toka vode u epikršu. Voda na putu do vadozne zone prolazi kroz heterogenu sredinu sporim tokom, stvarajući gotovo kontinuirani tok koji se u većini slučajeva razdvaja na spori i brzi (*Slika 2.1.*).



Slika 2.1. Prikaz epikrša, zadržavanja vode u saturiranoj zoni i podjele tokova na spori i brzi ulaskom u vadoznu zonu (prema Bakalowicz, 2005).

Pri velikim kišama, ukoliko je brzina infiltracije veća od maksimalne brzine vertikalne propusnosti dolazi do skladištenja vode u šupljine epikrša stvarajući neku vrstu epikrškog vodonosnika unutar kojeg infiltracija zadržane vode može kasniti od nekoliko dana do nekoliko mjeseci (Perrin et al., 2003).

Epikrš naposljetku svu zadržanu vodu distribuira infiltracijskim procesima, brzom infiltracijom u uvjetima slobodnog površinskog toka koji cirkulira u velike, otvorene pukotine i diskontinuitete te sporom distribucijom vode koja prolazi kroz tanke pukotine i međuzrnsku poroznost.

Također u prirodnim procesima napajanja voda može zaobići epikrš ukoliko postoje površinske krške strukture poput vrtača i ponora koje omogućuju izravan tok vode prema vadoznoj zoni (Bakalowicz, 2004). Za proces umjetnog napajanja vodonosnika trebalo bi spriječiti i onemogućiti da voda brzo infiltrira u podzemlje zbog mogućih zagađenja i njegovog brzog proširenja na izvore. Izravno ulijevanje vode u freatsku zonu trebalo bi izbjegavati zbog nepoznavanja podzemlja i teškog određivanja najadekvatnije lokacije. Na primjer, ukoliko se pumpnim zdencem dostignu velike pukotine voda se može brzo isprazniti prema izvoru, no ukoliko se zdenac pozicionira na područje gdje u podzemlju nema glavnih velikih pukotina za prijenos vode, niske vrijednosti propusnosti neće dopustiti ulijevanje značajnog volumena vode. Prema tome umjetno napajanje bi svakako trebalo iskoristiti epikrš i njegovo sporo pražnjenje. U idealnom slučaju ulijevana voda ostaje u epikršu sve dok se prirodno ne infiltrira različitim putevima prema freatskoj zoni. Epikrška zona trebala bi se iskoristiti kao regulator napajanja kao što je i u prirodnim uvjetima, također trebala bi se iskoristiti maksimalno i zbog svoje dvojake uloge prenošenja i pročišćavanja vode, što uvelike smanjuje troškove (Daher et al., 2011).

U ovom radu prikazat će se primjer umjetnog napajanja iz 1988. godine pri kojem nisu iskorištene mogućosti epikrša, već se ulijevanjem vode izravno u ponor Čiže, tj. koncentriranim napajanjem izravno utjecalo na izdašnost izvora Velike Gradole.

2.2. Umjetno napajanje: uvjeti, mogućnosti i poteškoće

Dosta zemalja već sad koristi neku vrstu poboljšanog ili reguliranog sustava napajanja vodonosnika, no većinom za aluvijalne vodonosnike (Gale and Dillon, 2005). Regulirano napajanje uvelike se koristi za osiguravanje velikih kapaciteta uskladištenja kako bi se kaptirale povremene, sezonske velike vode. Uvelike se koristi i za ublažavanje utjecaja oluja i poplava skladištenjem voda koje su se javile za vrhunca poplave ili oluje. Dok u obalnim područjima metoda glavnu svrhu pronalazi u sprječavanju prodora slane vode.

S obzirom da je prirodno napajanje vodonosnika često ugroženo urbanizacijom, umjetno napajanje se sve više smatra neophodnim procesom za balansiranje i održavanje vodnih resursa. Ulijevanjem vode u podzemlje i njenom cirkulacijom podzemljem dolazi do pročišćenja i poboljšanja njene kvalitete. Također, ulijevanjem vode u podzemlje može se obnoviti djelomično osiromašeni kao i sanirati onečišćeni vodonosnik (Daher et al., 2011).

U mnogim slučajevima umjetno napajanje vodonosnika moglo bi biti isplativ alat za upravljanje vodnim resursima, pogotovo u područjima gdje potreba za vodom premašuje resurse. No svakako u obzir treba uzeti nekoliko faktora kao što su, postojanje društveno ekonomske potrebe, postojanje odgovarajućeg potencijalnog vodonosnika za primjenu metode, postojanje dovoljne i adekvatne vode koja se može koristiti za umjetno napajanje, te naravno tehnička i financijska izvedivost kao i politička podrška u odabranoj regiji (Detay, 1997).

Za uspješno izvođenje umjetnog napajanja vodonosnika potrebno je imati ispunjene i određene hidrološke i hidrogeološke uvjete. S hidrološkog stajališta potreban je, kao što je već navedeno, dovoljan i pristupačan resurs vode koja se može koristiti za umjetno napajanje. Također potrebno je i dobro poznavanje klime na određenom području, kao i poznavanje raspodjele oborina i temperature vode i njihovog utjecaja na vodu u podzemlju.

Treba detaljno istražiti i kakvoću vode koja se koristi za napajanje, te vodu unutar vodonosnika. Interakcije između tekućine i tekućine, te tekućine i stijene mogu imati negativan utjecaj na cjelokupan sustav, iako su prirodni procesi unutar vodonosnika i prirodno pročišćavanje kojim se uklanjanju mnogi mikroorganizmi većinom od velike koristi.

Hidrogeološke značajke vodonosnika koje omogućuju uvođenje i zadržavanje ubačene vode u podzemlju također moraju biti odgovarajuće. U otvorenom vodonosniku, nezasićena zona mora biti dovoljno debela da dopusti značajan porast zasićene zone tijekom punjenja. Također, razine podzemne vode ne smiju biti preblizu površine kako ne bi došlo do miješanja vode s tlom. Dok u zatvorenom vodonosniku, fizički i kemijski uvjeti moraju dopuštati ubacivanje dodatnog volumena vode. Vodonosnik mora imati visoku transmisivnost, ali ujedno mora imati i sposobnost zadržavanja vode. Također, vodonosnik mora biti okarakteriziran do mjere koja omogućuje identifikaciju zona visoke i niske transmisivnosti koje utječu na disperzivnost, a time i na učinkovitost oporavka vodonosnika. Pomoću nabrojenih hidroloških i hidrogeoloških uvjeta bit će moguće procijeniti nadoknadivi volumen vode i učinkovitost brzine ponovnog punjenja i oporavka samog sustava napajanja, a time će se procijeniti i njegov uspjeh (Daher et al., 2011).

Prije bilo kakvih radnji vezanih uz umjetno napajanje vodonosnika potrebno je provesti sveobuhvatno istraživanje krškog sustava. Izrazito je bitno odabranu lokaciju promatrati kao dio cjeline krškog vodonosnika, odabrana lokacija mora poštovati strukturu pražnjenja

vodonosnika na način da se maksimalno iskoriste mogućnosti uskladištenja. Ukoliko to nije zadovoljeno vrlo teško će se pratiti i u potpunosti iskoristiti mogućnosti umjetnog napajanja na određenoj lokaciji.

Prema tome, već prilikom dizajniranja sustava i prije njegovog izvršenja, krški vodonosnik mora biti definiran u prikladnom mjerilu kako bi se prikupile točne informacije i zadovoljili zadani kriteriji vezano uz sposobnost infiltriranja vode u vodonosnik, sposobnost vodonosnika da barem djelomično zadrži dio infiltrirane vode, mogućnost da se održi ili poboljša kvaliteta vode koja će se koristiti za ulijevanje te mogućnost njenog poboljšanja tijekom cirkuliranja kroz vodonosnik. Također kriterij koji treba zadovoljiti je i potrebna infrastruktura, od transporta vode do potrebne energije, procesa pročišćavanja i ostalog.

U prethodnim istraživanja i pokusima, najviše problema javilo se vezano uz ispunjavanje tih kriterija. Za krške vodonosnike nužno je steći uvid u specifične kriterije za implementaciju umjetnog napajanja s obzirom na velike varijacije u značajkama i veliku ranjivost samog sustava. Također bitno je i točno odrediti uvjete i mogućnosti infiltracije na izabranoj lokaciji. Kao što je već spomenuto, preporuča se ulijevanje vode što dalje od površinskih krških oblika koji imaju izravnu i brzu vezu s podzemnim pukotinskim sustavom kako bi se osigurao spor i difuzan tok ulijevane vode prema freatskoj zoni. Tim sporim tokom voda je izložena i procesu pročišćavanja na putu k saturiranoj zoni (Daher et al., 2011).

2.3. Karakterizacija krškog vodonosnika obzirom na upojnost

Najčešća metoda analize napajanja krškog vodonosnika, takozvana *ARAK* (*The Analysis of rechargeability of an Aquifer in Karst*) metoda, bavi se mogućnošću primjene reguliranog umjetnog napajanja u krškim vodonosnicima i odabirom pogodne lokacije napajanja.

Mogućnosti napajanja određenog krškog vodonosnika moraju se promatrati istovremeno u lokalnom (uže područje lokacije napajanja) i regionalnom (cijeli vodonosnik) mjerilu. Bitna je mogućnost punjenja vodonosnika uz pomoć posebnog reguliranog sustava koji doprinosi njegovom prirodnom napajanju. Prirodno napajanje zahvaća cijeli vodonosnik, međutim, za umjetno se napajanje treba usredotočiti na jedan određeni lokalitet, stoga se prilikom osmišljavanja i provođenja pokusa treba u obzir uzeti oba mjerila. Ukoliko značajke vodonosnika sugeriraju da bi on bio pogodan za umjetno napajanje, onda se kreće u njihovu

detaljnu analizu i detaljnu analizu mogućnosti napajanja na lokalnoj razini kako bi se pronašao najpovoljniji lokalitet za izvođenje napajanja.

S obzirom na izrazitu heterogenost krških vodonosnika, moguće je da iako model daje zadovoljavajuće rezultate u regionalnom mjerilu, na lokalnoj razini ti rezultati nisu pogodni i ne daju realistične rezultate. Sa svim znanjem o krškim vodonosnicima zaključeno je da je najbolji pristup onaj koji maksimalno iskorištava terenska opažanja i podatke prikupljene na terenu. *ARAK* metoda pripada toj skupini te je usporediva s metodama koje se koriste za kartiranje ranjivosti krškog vodonosnika (Kavouri et al., 2011).

Predloženi pristup sastoji se od stvaranja jednostavne i lako primjenjive metode koja može odrediti izvedivost umjetnog napajanja u promatranom krškom vodonosniku. Metoda se provodi u nekoliko razina, prvo se provode analize mogućnosti napajanja krškog vodonosnika u regionalnom mjerilu, zatim se određuju i definiraju potencijalne lokacije u lokalnom mjerilu i naposljetku se ocjenjuju i rangiraju odabrane lokacije prema hidrogeološkim, tehničkim i socijalno ekonomskim faktorima.

Infiltracija kroz karbonatnu stijenu ovisi o nekoliko faktora, a *ARAK* metoda odabire četiri kriterija koji kontroliraju proces napajanja: epikrš *E*, vrsta stijenske mase vodonosnika *R*, potencijal infiltracije *I* i stupanj okršenosti cijelog sustava *K*. Navedeni kriteriji se ocjenjuju s vrijednošću od nula do četiri, od najmanje do najviše povoljno za napajanje.

Kriterij *K* određuje se na regionalnoj razini obzirom da je gotovo nemoguće odrediti pukotine u infiltracijskoj i freatskoj zoni na određenoj lokaciji, a kamo li njihov način i stupanj okršenosti. Kriterij *I* ovisi samo o nagibu terena, dok kriterij *R* prikazuje značajke stijene neovisno o stupnju okršenosti. Kriterij *E*, epikrš treba jasno razlikovati od kriterija okršenosti. Za podloge se koriste topografske i geološke karte prikladnog mjerila te podaci prikupljeni terenskim mjerenjima kako bi se u obzir uzele specifične značajke promatranog vodonosnika.

Dva kriterija su vezana za razvoj krša (*E* i *K*), a druga dva (*I* i *R*) za hidrogeološke i hidrološke uvjete. Kriteriji moraju biti definirani što preciznije kako bi se izbjeglo pogrešno tumačenje, a definiraju se na način prikazan u Tablici 2.1.

Tablica 2.1. Razmatrani kriteriji i definicija njihovih ocjena u ARAK metodi.

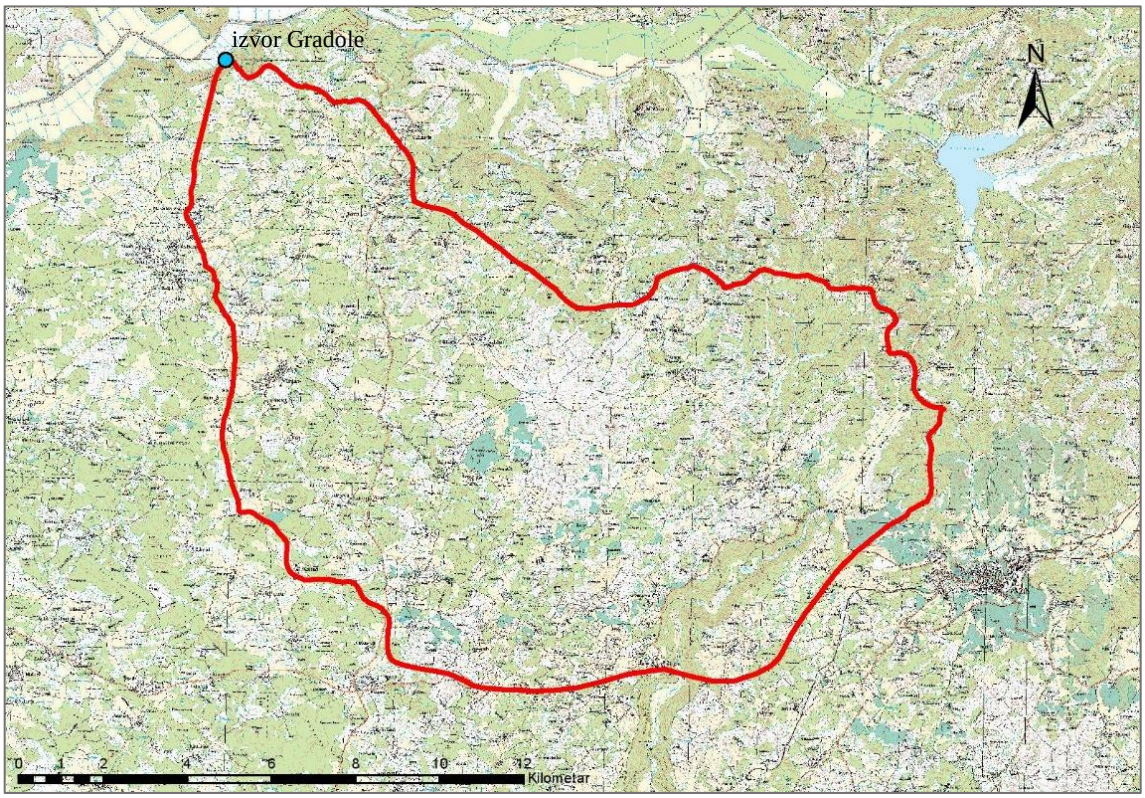
Kriterij	Razred	Opis	Ocjena
Epikrš *E*	E_0	Potpuni izostanak epikrša uz prisutnost krških depresija, otvora, vrtača i ostalog	0
	E_1	Epikrš debljine < 1 m, nepovezan i prilično razvijen, prisutnost povremenih krških izvora (izdašnost l/h), krška polja, zaravni i uvale	1
	E_2	Epikrš debljine 1 do 5 m, razvijen i bočno isprekidan, prisutnost povremenih krških izvora (izdašnost l/min), krška polja	2
	E_3	Epirš debljine > 5 m, razvijen i kontinuiran, prisutnost povremenih krških izvora (izdašnost l/s), tanki, isprekidani sloj tla kao pokrov	3
	E_4	Epirš debljine > 5 m, razvijen i kontinuiran, prisutnost povremenih krških izvora, kontinuirani pokrov (tlo ili sediment)	4
Stijenska masa *R*	R_0	Laporovite formacije (35-65 % glina)	0
	R_1	Lapor sa vapnencima (25-35 % glina)	1
	R_2	Laporoviti vapnenac (10-25 % glina)	2
	R_3	Debelo uslojeni, jako trošni vapnenci i dolomiti	3
	R_4	Tanko uslojeni, umjereno trošni vapnenci i dolomiti, s eventualnim umecima lapora	4
Infiltracija *I*	I_0	Nagib > 50 %	0
	I_1	35 % < Nagib > 50 %	1
	I_2	15 % < Nagib >35 %	2
	I_3	5 % < Nagib > 15 %	3
	I_4	0 % < Nagib > 5 %	4
Okršenost *K*	K_0	Vrlo razvijen i funkcionalan krš (koncentrirano i difuzno napajanje), prividna brzina tečenja >100 m/h	0
	K_1	Slabo funkcionalan primarni/visoko razvijeni krš (difuzno napajanje), prividne brzine tečenja 50-100 m/h	1
	K_2	Slabo funkcionalan nejednak krš, prividne brzine < 50 m/h, promjenjiv kemijski sastav i protok	2
	K_3	Veoma slabo funkcionalan krš, minimalne promjene kemijskog sastava i protoka, odsutnost brze cirkulacije vode	3
	K_4	Krški sustav oštećen i nefunkcionalan	4

Nakon što su kriteriji definirani i ocijenjeni, za svaki kriterij se pomoću GIS tehnologije izrađuje karta. Karta istraživanog vodonosnika raspodjeljuje se u rešetku, gdje se svakoj ćeliji određenih dimenzija pridodaju vrijednosti od nula do četiri za određeni kriterij. Takva podjela na ćelije omogućuje daljnji izračun indeksa mogućnosti napajanja I_{rt} koji se također određuje u rasponu od nula do četiri. Pomnom provjerom mape i svake ćelije koja je ocijenjena prema već navedenim hidrogeološkim kriterijima odabiru se moguće lokacije za izvođenje napajanja. Zatim se za svaki odabrani lokalitet uzimaju u obzir i ostali faktori kao što su tehničke, financijske, socijalne i ekonomske isplativosti projekta. Tada se uvodi još jedan faktor, F_e faktor isplativosti koji se određuje za svaki potencijalni lokalitet. Pri određivanju faktora isplativosti razmatraju se ograničenja, dostupnost i kvaliteta vode za ulijevanje, mogućnost razvijanja sustava napajanja, cijena zemlje koju je potrebno kupiti,

udaljenost područja kojem će se voda isporučivati, cijena cijelog projekta, njegovo trajanje i potencijalni problemi. Adekvatna detaljna studija dovodi do određivanja faktora isplativosti koji se određuje u rasponu od nula do jedan. Kao konačni produkt, pomoću faktora I_{rt} i F_e određuje se totalni, konačni indeks mogućnosti napajanja koji ima vrijednosti od nula do četiri, od neisplativo i ne potencijalno za umjetno napajanje do najadekvatnije za umjetno napajanje (Daher et al., 2011).

3. Sliv izvora Gradole

Porječje rijeke Mirne zauzima prostor središnjeg i zapadnog dijela Istre, a upravo tamo smješten je i sliv izvora Velike Gradole (*Slika 3.1.*). Iako je naziv izvora Velike Gradole, u raznoj literaturi i u govoru često se koristi samo naziv Gradole, stoga će se dalje u tekstu koristiti taj naziv.



Slika 3.1. Položaj sliva izvora Gradole.

Sam izvor Gradole nalazi se na lijevoj obali doline rijeke Mirne, oko 9,5 km uzvodno od njenog ušća. Izvor izbija iz krške kaverne, a u prirodnom obliku imao je oblik jezerca ovalnog oblika veličine 8x16 m (*Slika 3.2.*). Dok se danas, preljevni prag izvora nalazi na nadmorskoj visini od 8 m n.m. Prilikom izrade zaštitnih zona određena je površina sliva u iznosu od 159,5 km^2. Od čega 85 posto površine zauzimaju karbonatne naslage, a svega 15 posto flišne naslage (Parlov, 2010).

U blizini izvora Gradole, ali izvan njegova sliva, u porječju Mirne nalaze se još dva veća izvora, izvori Sv. Ivan i Bulaž. U neposrednoj blizini izvora Gradole nalazi se i nekoliko povremenih izvora, uzvodno izvor Male Gradole i nizvodno izvor Očjak, koji se vjerojatno napajaju iz zajedničkog vodonosnika. Pored njih, u bližem području, nalaze se i izvor

Simerić, izvor u Tarskoj vali, izvor sv. Martin, izvor Funtana i izvori u Limskom kanalu, za koje nije isključena povezanost sa dijelom sliva izvora Gradole.



Slika 3.2. Izvor Gradole

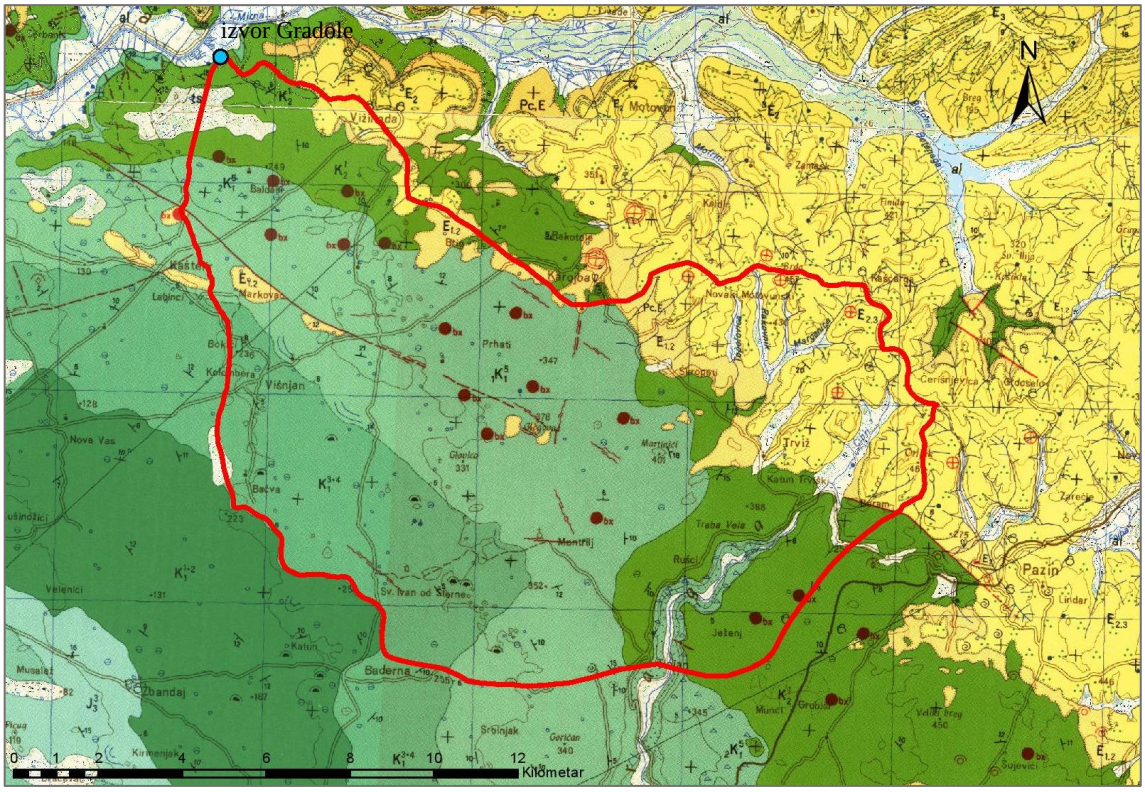
3.1. Geološke značajke

Šire područje sliva izvora Gradole izgrađeno je od krednih, paleogenskih i kvartarnih naslaga karbonatnog i klastičnog razvoja (*Slika 3.3.*). Područje se odlikuje jednostavnim strukturnim sklopom, u kojem se ističu zapadnoistarska antiklinala i eocenski fliški bazen.

Zapadnoistarska antiklinala predstavlja dio vanjskog jadranskog pojasa čija istočna polovica zauzima područje sliva izvora Gradole, odnosno samo čeoni dio strukture. Najveći dio antiklinale koji se proteže prema jugozapadu potopljen je morem. Pružanja je sjeveroistok-jugozapad, a karakterizirana je normalnim, vertikalnim i subvertikalnim rasjedima te pratećim pukotinskim sustavima, koji uvelike pridonose procesima dubokog okršavanja.

Eocenski fliški bazen prijelazno je područje od karbonatnih klastita, pješčenjaka i lapora smješteno u istočnom dijelu sliva izvora Gradole. Gotovo neporemećene naslage najčešće

se blago nagnutim ili približno vodoravnim slojevima i blago izraženim boranjima. Bazen se pruža u smjeru rasjeda duž kojih je oblikovan, sjeverozapad-jugoistok (Polšak i Šikić, 1973).



Slika 3.3. Geološka karta sliva izvora Gradole (OGK 1: 100 000, listovi Rovinj (Polšak i Šikić, 1969) i Trst (Anonimno, 1951-1964)). Kartirane jedince: donja kreda (Barem - Apt K_1^{3+4}, Alb $_1K_1^5$), gornja kreda (Cenoman K_2^1), paleogen (Miliolidni vapnenac Pc,E_1, Alveolinski i numulitni vapnenac $E_{1,2}$, Flišne naslage $E_{2,3}$), kvartar q (terra rossa ts, aluvijani nanos al).

<u>Naslage donje krede</u> zauzimaju središnji i površinski najveći dio sliva izvora Gradole.

Prema Polšak i Šikić (1973) naslage barem-apta (K_1^{3+4}) pretežno su karbonatnog sastava. U donjem dijelu sastoje se od jedrog ili brašnastog vapnenca. Slojevi su najčešće debljina od 50 do 100 cm, no ni slojevi od 2 m debljine nisu rijetkost. Unutar ovih naslaga često se pronalaze ulošci šećerastog dolomita i tanko pločastih vapnenaca. Slijed naslaga se nastavlja svjetlosivim jedrim tanko uslojenim ili pločastim vapnencem. Često su prisutni i ulošci breča, kalcirudita i kalkarenita, ponegdje i bankovitih vapnenaca. Navedeni vapnenci su autohtonog porijekla, često mikrozrnate, a ponekad i grumulozne i pseudooolitične strukture. Prema kemijskom sastavu, ove stijene pripadaju čistim vapnencima s preko 97 % $CaCO_3$. Alohtone detritične stijene, kalkareniti, kalciruditi i bioklastični vapnenci, javljaju se u manjoj mjeri. Kalkareniti se sastoje od sitnih čestica vapnenaca, fosila i oolita. Kalciruditi i bioklastični vapnenci javljaju u plitkim dijelovima sedimentacijskog bazena u

blizini trošenja matične stijene, stoga su kršje fosila i fragmenti stijena slabo zaobljeni i loše sortirani. Također, u vapnenim stijenama ovih katova rijetko se pojavljuju ulošci glina sive i zelenkastosive boje debljina 5 do 20 cm. Ukupna debljina naslaga barem apta iznosi približno 400 do 550 m. Naslage su relativno bogate mikrofosilima poput miliolida, ostrakoda, favreina. Makrofosilima su naslage znatno siromašnije. Mjestimično se javljaju sačuvane nerineje, kao i slabo očuvane ljušture školjkaša. Navedene naslage slične su naslagama alba, stoga je razgraničenje na karti provedeno samo aproksimativno, uglavnom na temelju nalaza fosila.

Litološki sastav albskih naslaga (K_1^5), prema Polšak i Šikić (1973), vrlo je sličan sastavu barem-aptskih naslaga, no albske naslage su većinom tanje uslojene. Pretežito su to tanko uslojeni vapnenci, debljina 20 – 40 cm, te u znatnoj mjeri pločasti vapnenci. Najčešće su svijetlosive do bijele boje, rijeđe tamnosive ili sivosmeđe boje. Prevladavaju autohtoni vapnenci mikrozrnate strukture koja je često prekristalizacijom prešla u grumuloznu i pseudooolitičnu strukturu. Među detritičnim stijenama prevladava kalkarenit, a u manjoj mjeri zastupljen je i kalcirudit. Kao rezultat kratkotrajnih lokalnih emerzija, javljaju se mjestimično slabo izražene erozione diskordance. Sve navedene stijene pripadaju čistim vapnencima s preko 97 % $CaCO_3$. Debljina naslaga iznosi 400 – 600 m. Od značajnih mikrofosila određeni su: *Salpingoporella dinarica, Nezzazata simplex, Nummoloculina heimi, Cuneolina pavonia parva, Orbitolina sp., Bačinella irregularis*. Makrofosili su rijeđi. Česti su gastropodi, a povremeno se javljaju i fragmenti ljuštura školjkaša.

Gornjokredne naslage zauzimaju jugoistočni i krajnji sjeverni dio sliva.

Prema Polšak i Šikić (1973) najveći dio cenomanskih naslaga (K_2^1) zauzimaju debelo uslojeni jedri rudistni vapnenci, svijetlosive do bijele boje. Debljina slojeva iznosi 1 – 2 m, a rijetko je prisutan masivni rudistni vapnenac. Manji dio naslaga zauzimaju tanko uslojeni svijetlosmeđi do bijeli brašnasti vapnenci, debljina od 20 do 50 m. Navedene naslage, u području kontakta s paleogenim naslagama često pokazuju ružičastu boju. Iako postoje razlike u pogledu uslojenosti i boje, svi vapnenci su po ostalim značajkama slični. Najčešće je prisutna mikrozrnata ili grumulozna struktura, a rijetko se javljaju i pseudooolitične strukture. Rijetko se javljaju bioklastični vapnenci, kalkareniti i kalciruiti. U kemijskom pogledu sve stijene su čisti vapnenci sa 97 % $CaCO_3$. Ukupna debljina cenomanskih naslaga iznosi 600 – 800 m.

Opisane naslage bogate su provodnim makrofosilima, dok su značajni mikrofosili rjeđi. Među mikrofosilima dominiraju miliolide koje mjestimično i ispunjavaju stijenu, a često se javljaju i orbitoline. Neke od određenih vrsta mikrofosila su: *Nezzazata simplex, Orbitolina concava* i *Cuneolina pavonia parva*. Među makrofosilima najčešći su rudisti, neki od određenih vrsta su: *Radiolites peroni, Sauvagesia charpei, Gyropleura telleri* i *Nerinea sp.*

Paleogenske naslage javljaju se uz sjevernu granicu sliva te dominiraju na sjeverozapadu.

Prema Polšak i Šikić (1973), miliolidni vapnenac (P_c,E_1) dolazi u bazi foraminiferskih vapnenaca. Zastupljeni su gustim, sivkastim ili svijetlosmeđim vapnencima. Naslage su dobro uslojene, a debljina im ne prelazi 20 cm. U ovim naslagama određeni su rodovi *Coskinolina, Lituonella, Orbitolites* i druge foraminifere.

Alveolinski vapnenci ($E_{1,2}$) su smeđi, ponekad bijeli i sivkasti. U gornjem dijelu su čvršći i tvore krševito tlo. Slojevitost je slabo izražena, ponekad su gromadasti, a debljina im ne prelazi 30 metara. Pripadaju biokalkarenitima sa oko 99,9 % $CaCO_3$. Numulitni vapnenci ($E_{1,2}$) pretežno su smeđi, ponekad žućkasti i sivi. U gornjem dijelu obično su brečasti, tada su zelenkasti i u sebi sadrže glaukonit. Stijene su većinom homogenije i kompaktnije od alveolinskih, te imaju razvijenu nejasnu slojevitost. Debljina naslaga ne prelazi 30 m. Pripadaju kalkarenitima sa 99,6 % $CaCO_3$.

Prijelaznim naslagama (E_2) pripadaju slojevi s rakovicama i lapori s globigerinama. U sastav slojeva s rakovicama ulaze laporoviti vapnenci i vapneni lapor koji postepeno prelazi u lapor. Ti slojevi ne prelaze debljinu od 5 m, ali najčešće je s njima obilježen samo prijelaz iz numulitnih vapnenaca. Naslage lapora s globigerinama sastoje se od lapora u čijem se gornjem dijelu umeću proslojci i slojevi pješčenjaka debljine od 1 – 20 cm. Boja je plavičasta i zelenkasta.

Flišne naslage ($E_{2,3}$) okarakterizirane su izmjenom slojeva karbonatnih pješčenjaka i lapora te u manjoj mjeri breča, konglomerata i laporovitih i numulitnih vapnenaca. Debljina ovih naslaga kreće se od 400 do 600 m.

Kvartarne naslage sastoje se od zemlje crvenice (terra rossa) i aluvija.

Terra rossa (*ts*), prema Polšak i Šikić (1973), uglavnom se prostire u obliku tankog pokrivača. Najčešće debljine od 0,5 do 1 m, dok se veće debljine nalaze u vrtačama i udolinama. Naslage rijetko sadrže fosile. Dok dolinu rijeke Mirne kao i doline najvećih

potoka ispunjavaju aluvijalni nanosi (*al*). Nanosi se sastoje od prašinastih glina i ilovače, ponegdje u sastavu se pronalazi pijesak i šljunak.

3.2. Hidrogeološke značajke

Navedene naslage mogu se svrstati u dvije osnovne grupe stijena različitih hidrogeoloških značajki. Vodonepropusne klastične stijene i vodopropusne karbonatne stijene.

Vodopropusne karbonatne naslage karakterizirane su sekundarnom, pukotinskom i kavernoznom poroznošću. U slivu izvora Gradole to su umjereno okršene naslage donje krede te intenzivno okršene naslage gornje krede. Također slabo okršene paleogenske naslage karbonatnog razvoja pripadaju u ovu grupu. U podzemlju se nalaze nehomogene anizotropne strukture koje prihvaćaju i provode velike količine vode uz pojavu proslojaka malih propusnosti koji imaju ulogu usporavanja podzemnih voda (Parlov, 2010).

Vodonepropusnim klastičnim naslagama pripadaju naslage eocenskog fliša kao i kvartarne naslage. To su naslage koje stvaraju barijeru toku podzemne vode.

Zajednička značajka svih okršenih karbonatnih stijena je ta da nemaju razvijenu površinsku hidrološku mrežu, te se površinski tokovi pojavljuju samo u dijelu sliva s klastičnim naslagama i poniru na kontaktu s karbonatima. Najznačajniji ponor na području sliva je ***ponor Čiže*** *(Slika 3.4)*. Ponor Čiže nalazi se sjeverozapadno od naselja Trviž, a od izvora Gradole udaljen je 14,5 km.

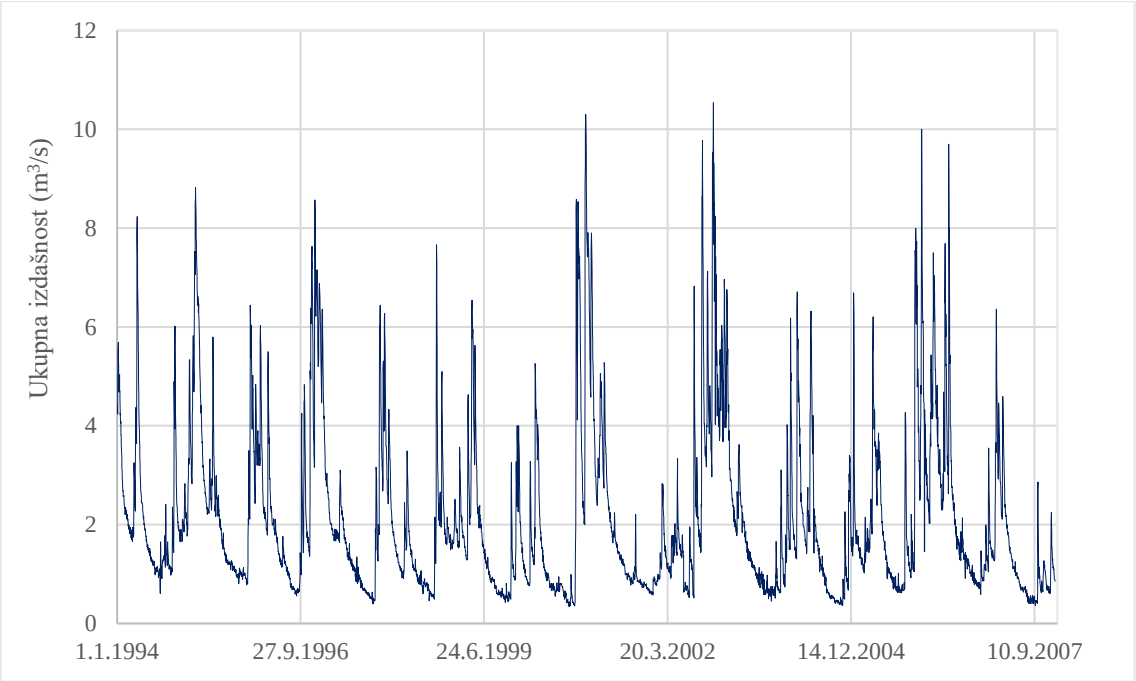


Slika 3.4. Ponor Čiže

Sastoji se od dva ponora koja se nalaze na različitim nadmorskim visinama. Nadmorska visina nižeg ponora je 320 m n.m. On se nalazi na dnu ljevkaste doline i u njega se ulijevaju male i srednje vode koje do ponora stižu potokom Čiže. U slučaju velikih voda niži ponor nije u mogućnosti prihvatiti svu vodu i tada zbog stvaranja retencije dolazi do aktivacije i višeg ponora koji zajedno sa nižim djeluje kao jedinstveni sustav. Trasiranjem je dokazana izravna veza ponora Čiže s izvorom Gradole.

3.2.1. Izdašnost izvora Gradole

Prosječna godišnja vrijednost dnevnih ukupnih protoka izvora Gradole za razdoblje od 1989. do 2007. godine iznosi 2,17 m^3/s. Na razini dnevnih podataka, vrijednosti ukupnih protoka kreću se u rasponu između 0,264 m^3/s i 18,9 m^3/s. Može se reći kako maksimalna izdašnost nastupa zimi, dok je minimalna karakteristična za jesen. Odnos maksimalnih i minimalnih izdašnosti kreće se oko 1:10 do 1:20 (Parlov, 2010). Na slici 3.5. prikazane su vrijednosti dnevnih protoka (zbroj količine crpljenja i srednjeg dnevnog protoka na preljevu) za razdoblje od 1994. do 2007. godine.



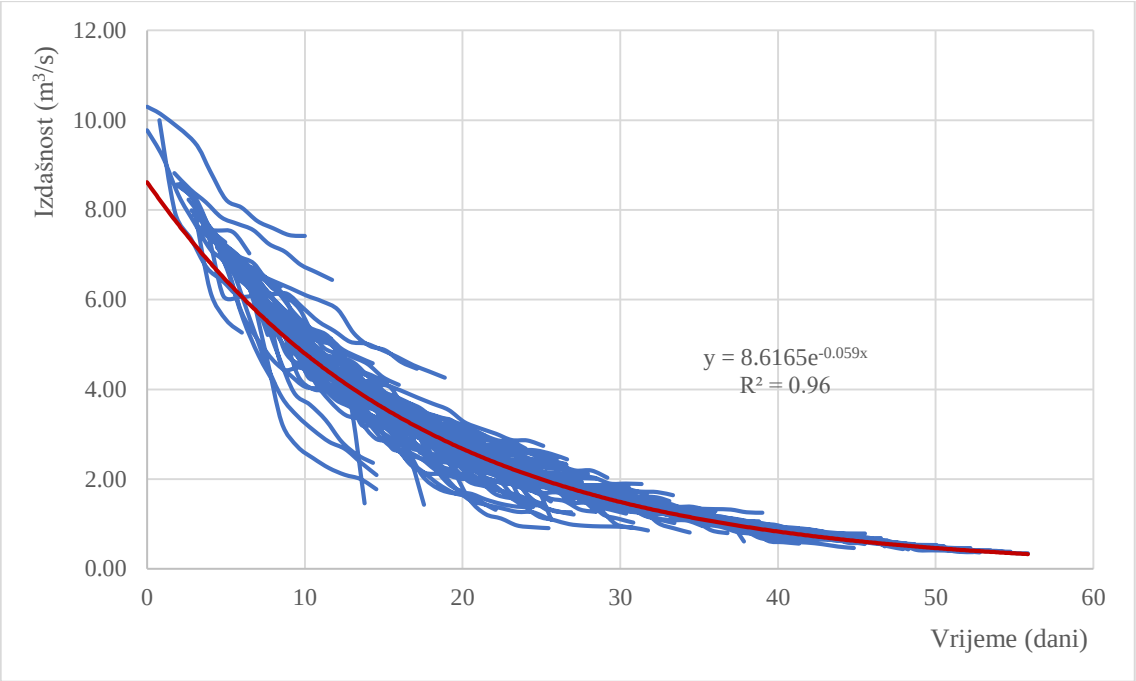
Slika 3.5. Dnevni protoci izvora Gradole u razdoblju od 1.1.1994. do 31.12.2007.

S obzirom na važnost izvora Gradole u vodoopskrbi Istarske županije, potrebno je pratiti režim izvora i predvidjeti razdoblja malih izdašnosti kako bi se voda potrebna za vodoopskrbu mogla na vrijeme osigurati iz rezervnih izvora.

Uvid u režim pražnjenja vodonosnika pruža nam recesijska analiza, proučavanjem otjecanja u funkciji vremena. Analiza se provodi na opadajućoj grani hidrograma. Obzirom da kiše izazivaju poremećaje u krivuljama recesije, idealni recesijski uvjet je višetjedno razdoblje bez oborine, no takva razdoblja u ovim klimama su rijetka pojava. Zbog toga je potrebno da se analiza hidrograma obavi na što većem broju recesijskih krivulja iz više godina jer veći uzorak omogućava dobivanje prosječne recesijske krivulje.

Obzirom na promjenjivu reakciju vodonosnika na pojedine događaje i samim time i različite koeficijente recesije za svaku promatranu recesijsku krivulju hidrograma izvora, razvijene su metode koje se temelje na stvaranju glavne recesijske krivulje za pojedini izvor. Za konstrukciju krivulje koja prikazuje najvjerojatniji razvoj smanjenja izdašnosti, tj. glavnu recesijsku krivulju koriste se dvije metode, matching strip (Snyder, 1939) i korelacijska metoda (Langbein, 1938). Koeficijent determinacije R^2 nam pomaže pri procjeni koliko dobro regresijski model opisuje promatrani model (Parlov, 2010).

Pomoću automatizirane matching strip metode (Posavec i dr., 2010) konstruirana je glavna recesijska krivulja za razdoblje od 1.1.1994. do 31.12.2007. godine (*Slika 3.6.*).



Slika 3.6. Glavna recesijska krivulja za izvor Gradole

Najbolji rezultat postignut je eksponencijalnim modelom uz koeficijent determinacije 0,96. Dobivena je eksponencijalna jednadžba ($y=8{,}6165e^{-0{,}059x}$) pomoću koje se može prognozirati smanjenje izdašnosti izvora u sušnom razdoblju.

Gledajući pojedine krivulje uočljivo je da postoje velika odstupanja od dobivene glavne recesijske krivulje pogotovo pri većim vrijednostima protoka. Prognoze i rezultati izvedeni iz dobivene eksponencijalne jednadžbe biti će manje pouzdani za veće protoke nego za manje, pri kojima pojedine krivulje ne odstupaju previše od glavne recesijske krivulje.

Dalje u radu ova glavna recesijska krivulja koristiti će se za procjenu i ocjenu povećanja izdašnosti na izvoru Gradole uzrokovanu probnim ulijevanjem.

3.2.2. Podzemne veze između ponora Čiže i izvora Gradole

Utvrđivanje povezanosti ponora Čiže i izvora Gradole provođeno je u nekoliko navrata i pri različitim vodnim stanjima u podzemlju i na površini:

1. 26.5.1968. godine bojanje je izvedeno ubacivanjem 100 kg fluoresceina u ponor. U vrijeme provođenja pokusa protok potoka Čiže iznosio je oko 12 l/s, dok je prosječni protok na izvoru Gradole iznosio oko 1,2 m^3/s. U razdoblju od ubacivanja boje do njene prve pojave na izvoru došlo je do oscilacija u protocima zbog vremenskih neprilika, no nakon prve pojave boje na izvoru pa sve kraja motrenja protoci su bili

stabilni, bez većih oscilacija. Uzorci vode su uzimani na 11 izvora na području od Limskog kanala preko Tarske vale, također uz rijeku Mirnu sve do izvora Gradole. Na svim uzorcima su se provodile analize koncentracije fluorescina i fizikalno-kemijskih svojstava vode. Boja se pojavila samo na izvoru Gradole, te je za vrijeme motrenja, koje je trajalo do 10.9. isteklo sveukupno 92 % ubačene boje. Prvi tragovi boje zabilježeni su 20.6.1968. godine, 25 dana nakon ubacivanja boje. Najveća količina boje, ukupno 74 kilograma isteklo je kroz 21 dan u razdoblju od 24.6. do 15.7.1968. Uzevši u obzir moguće pogreške prilikom određivanja protoka i određivanja malih koncentracija boje zaključeno je da je količina koja je ubačena u ponor ista količina koja je i izašla na izvoru Gradole. Promatrajući količinu vode koja je ponirala u ponor Čiže i količinu istjecanja na izvoru Gradole, proizašao je zaključak da voda iz ponora Čiže sudjeluje u svega 5 % istekle vode na izvoru(Institut "Ruđer Bošković", 1988). Prividna brzina tečenja iznosi 0,67 cm/s.

2. 16.3.1976. godine izvedeno je trasiranje ubacivanjem 1000 Ci tricirane vode pomoću specijalne sonde izravno u ponor. Za vrijeme ubacivanja ponor je bio poplavljen, a istjecanje na izvoru iznosilo je oko 7,5 m^3/s, stoga se može reći kako je trasiranje izvedeno u razdoblju velikih voda. Uzorci su prikupljani na više izvora na području Motovunske drage, od ušća Mirne, te priobaljem do Tarske vale i Limskog kanala. Od svih promatranih izvora, tricij se pojavio jedino na izvoru Gradole i to 5,5 dana nakon ubacivanja (21.3.1976). Maksimalna koncentracija pojavila se 2 dana nakon prve pojave (23.3.1976). Sva tricirana voda istekla je u razdoblju od 11 dana od prve pojave na izvoru i nakon toga aktivnost tricija više nije registrirana. Kvantitativnom analizom utvrđeno je da je količina tricija koja je istekla na izvoru jednaka količini tricija koji je ubačen u ponor(Institut "Ruđer Bošković", 1988). Prividna brzina kretanja iznosi 3 cm/s.
3. 1987. godine pristupilo se trasiranju ponora Čiže radi utvrđivanja dinamike podzemne vode za vrijeme sušnog razdoblja kako bi se procijenilo postoji li mogućnost da se u sušnom razdoblju upuštanjem vode u ponor Čiže kontrolirano poveća izdašnost izvora Gradole. Prethodnim trasiranjima zaključeno je da ne postoji dodatna veza između ponora Čiže i nekog drugog izvora. Također, svi prikupljeni podaci ukazuju na to da su glavni pukotinski sustavi u tom dijelu sliva upravo ti koji idu od ponora Čiže do izvora Gradole, te da tim pukotinama teče glavni tok podzemne vode (Institut "Ruđer Bošković", 1988). Detaljni podaci o provedenom trasiranju prikazani su u sljedećem poglavlju.

3.2.3. Utvrđivanje podzemne veze između ponora Čiže i izvora Gradole 1987. godine

Cilj ovog istraživanja bilo je što bolje utvrđivanje dinamike veze između sljedećih parametara: dotok vode, vodostaj podzemne vode, hidrostatski tlak, izdašnost izvora Gradole i mogućnosti utjecaja na te parametre umjetnim napajanjem ponora Čiže. Zbog toga je za ovo trasiranje odabrano sušno razdoblje kada je izdašnost izvora iznosila svega 400 do 450 l/s, a u ponor Čiže nije bilo prirodnog dotoka vode. Za vrijeme trasiranja, potokom Čiže nije tekla voda tako da se može reći da ***ponor Čiže*** nije bio u funkciji. Na samom grotlu ponora bilo je formirano malo jezero ustajale vode. Ovakvo stanje nije omogućavalo da se traser izravno ubaci u podzemlje, stoga izvođenje trasiranja nije bilo moguće. S obzirom da je cilj ovog trasiranja bilo prepoznavanje uvjeta za sušno razdoblje nije se smjela čekati kiša koja bi aktivirala ponor. Kako bi se trasiranje ipak izvelo, istovremeno je izvedeno i upuštanje vode koja je provizornim cijevima dovedena iz obližnjeg vodoopskrbnog sustava. Dolijevanjem vode omogućilo se unošenje ubačenog tricija izravno u podzemlje. Trasiranje je izvedeno s 1000 Ci tricija 29.9.1987. godine u 15 sati, a voda se dolijevala u ponor dva dana i ukupno je upušteno oko 4000 m^3 vode (Institut "Ruđer Bošković", 1988).

Na osnovi prijašnjih istraživanja i dobivenih rezultata, za osmatranje i prikupljanje uzoraka vode odabrani su sljedeći izvori: izvor Gradole, izvor Male Gradole, izvor Očjak, izvor Simerić, izvor u Tarskoj vali, izvor sv. Martin, izvor Funtana i izvori u Limskom kanalu. Uzorci su prikupljani na svim izvorima u razdoblju od 24.9.1987. do 15.1.1988. godine.

Izvor Gradole predstavljao je glavno mjesto za skupljanje uzoraka. Vremenske prilike neposredno prije i za vrijeme trasiranja izrazito su utjecale na smanjenje izdašnosti izvora, koje je iznosilo svega 400-450 l/s. Izvor je do 23.10.1987. bio bez preljeva, što znači da se izdašnost izvora svela samo na crpljenu količinu koja se koristi za vodoopskrbu. Nakon većih kiša došlo je do povećanja izdašnosti izvora i početka preljeva 23.10.1987. godine. Od tada je izdašnost oscilirala, no preljev je bio konstantno prisutan (Institut "Ruđer Bošković", 1988).

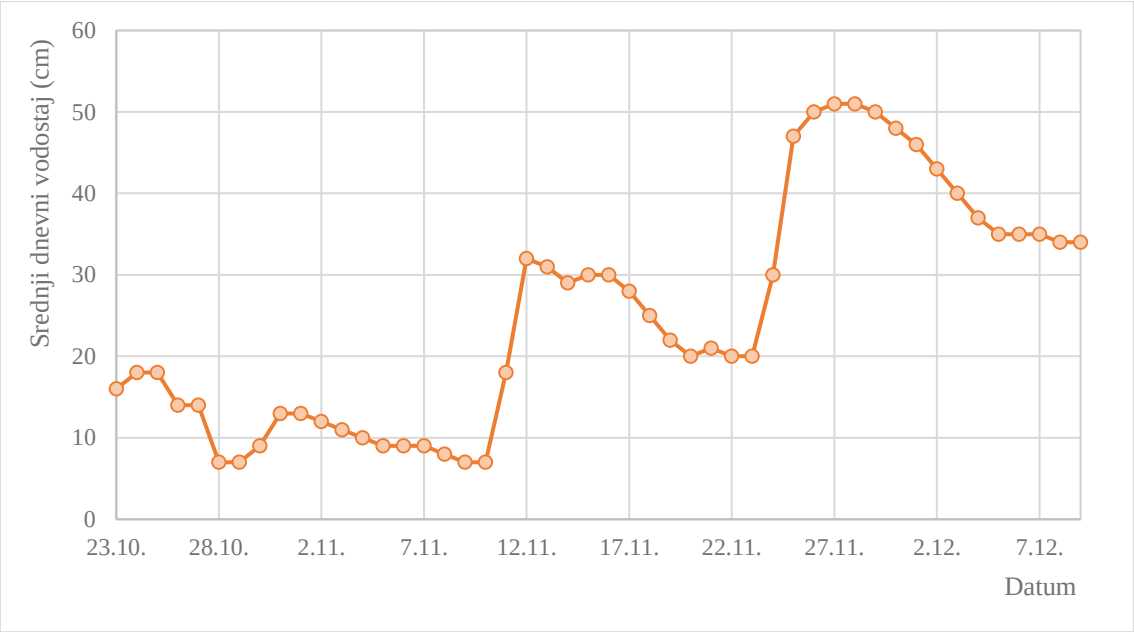
Količina preljevne vode (*Tablica 3.1.)* određivala se pomoću mjerenja vodostaja na pregradnom profilu i krivulje protoka izvora. Visina vodostaja u odnosu na preljevnu količinu vode prikazana je u tablici 3.2., dok je na slici 3.7. prikazana promjena vodostaja u vremenu.

Tablica 3.1. Prikaz količine vode na preljevu izvora Gradole 1987. godine

Datum	Mjereni protoci (m^3/s)
28.10.1987	0,176
29.10.1987	0,176
30.10.1987	0,262
31.10.1987	0,487
1.11.1987	0,487
2.11.1987	0,424
3.11.1987	0,36
4.11.1987	0,311
5.11.1987	0,262
6.11.1987	0,262
7.11.1987	0,262
8.11.1987	0,217
9.11.1987	0,176
10.11.1987	0,176
11.11.1987	0,878
12.11.1987	2,7
13.11.1987	2,53
14.11.1987	2,21
15.11.1987	2,37
16.11.1987	2,37
17.11.1987	2,06
18.11.1987	1,65
19.11.1987	1,28
20.11.1987	1,07
21.11.1987	1,17
22.11.1987	1,07
23.11.1987	1,07
24.11.1987	2,37
25.11.1987	6,04
26.11.1987	6,91
27.11.1987	7,21
28.11.1987	7,21
29.11.1987	6,91
30.11.1987	6,32
1.12.1987	5,77
2.12.1987	4,99
3.12.1987	4,29
4.12.1987	3,64
5.12.1987	3,25
6.12.1987	3,25
7.12.1987	3,25
8.12.1987	3,06
9.12.1987	3,06

Tablica 3.2. Odnos količine vode na preljevu(m^3/s) i vodostaja (cm)

H (cm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,021	0,041	0,063	0,085	0,108	0,140	0,176	0,217	0,262
10	0,311	0,360	0,424	0,487	0,556	0,629	0,707	0,790	0,878	0,972
20	1,070	1,170	1,280	1,400	1,520	1,650	1,780	1,920	2,060	2,210
30	2,370	2,530	2,700	2,880	3,060	3,250	3,440	3,640	3,850	4,070
40	4,290	4,520	4,750	4,990	5,250	5,510	5,770	6,040	6,320	6,610
50	6,910	7,210	7,520	7,840	8,170	8,500	8,850	9,200	9,560	9,930
60	10,30	10,70	11,10	11,5	11,90	12,30	12,70	13,20	13,60	14,10
70	14,50	15,00	15,50	16,00	17,00					

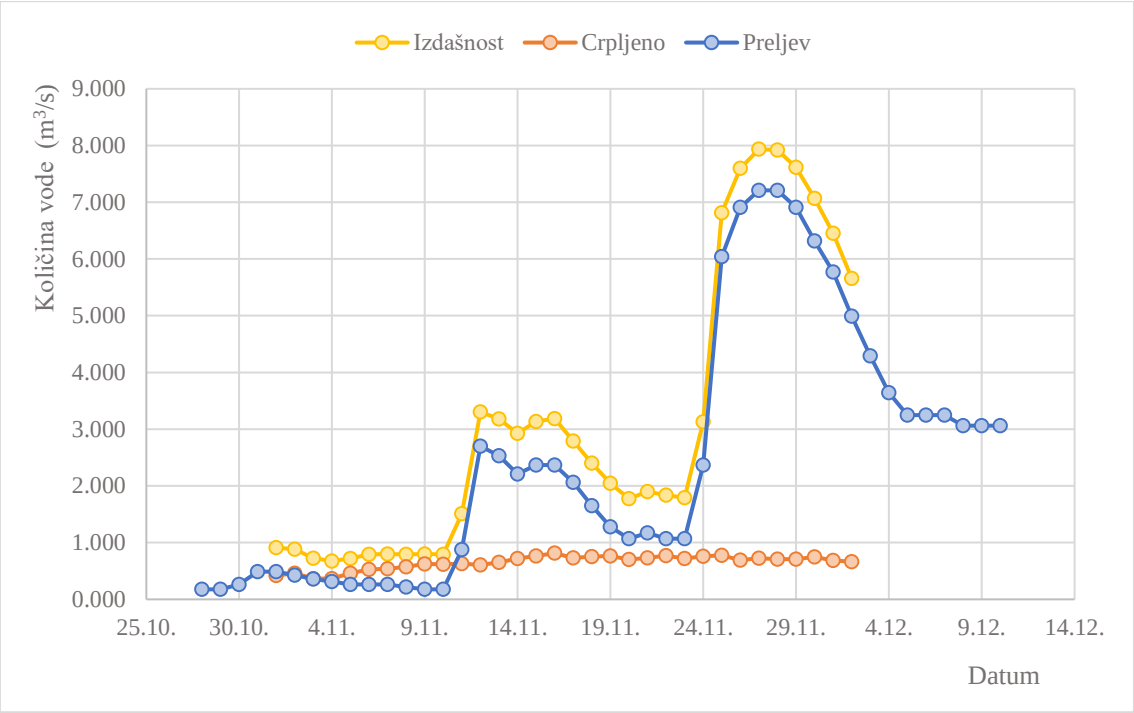


Slika 3.7. Promjena vodostaja u vremenu na izvoru Gradole

Količinu preljevne vode (*Tablica 3.1.)* i količinu crpljene vode (*Tablica 3.3.)* treba zbrojiti kako bi se dobila prava vrijednost izdašnosti izvora. Na slici 3.8. prikazani su količina preljevne vode, količina crpljenje vode te ukupna izdašnost izvora za razmatrano razdoblje. Uočljive su velike oscilacije u izdašnosti izvora, a s obzirom na manjak podataka može se pretpostaviti da su jesenske kiše uzrok kao i voda koja je ulijevana u ponor radi lakše distribucije tricija.

Tablica 3.3. Količina crpljene količin na izvoru Gradole

Datum	Crpljeno m^3/dan	Crpljeno m^3/s
1.11.1987	36460	0,422
2.11.1987	39826	0,461
3.11.1987	31622	0,366
4.11.1987	31622	0,366
5.11.1987	39528	0,458
6.11.1987	45792	0,530
7.11.1987	46526	0,538
8.11.1987	49594	0,574
9.11.1987	53827	0,623
10.11.1987	53222	0,616
11.11.1987	54388	0,629
12.11.1987	52315	0,605
13.11.1987	56186	0,650
14.11.1987	61922	0,717
15.11.1987	66138	0,765
16.11.1987	70264	0,813
17.11.1987	63288	0,733
18.11.1987	65102	0,753
19.11.1987	66139	0,765
20.11.1987	60826	0,704
21.11.1987	63158	0,731
22.11.1987	66398	0,768
23.11.1987	62251	0,720
24.11.1987	65683	0,760
25.11.1987	67046	0,776
26.11.1987	59529	0,689
27.11.1987	62640	0,725
28.11.1987	61192	0,708
29.11.1987	61192	0,708
30.11.1987	64584	0,748
1.12.1987	59270	0,686
2.12.1987	57480	0,665



Slika 3.8.Prikaz količine vode na preljevu izvora, crpljene količine te kao zbroj, ukupne izdašnosti izvora

Izvor M. Gradole nalazi se cca 100 m od izvora Gradole, te je od početka promatranja do 17.11.1987. bio suh, tako da su se uzorci vode počeli uzimati tek s prvom pojavom vode i to jedan put na dan.

Izvor Očjak se također nalazi u neposrednoj blizini izvora Gradole od kojeg je udaljen oko 250 m. I ovaj izvor je također bio suh na početku motrenja. Prva pojava vode zabilježena je 20.11.1987., međutim nije dolazilo do preljeva. Pravi preljev se javio tek 10.12.1987. i održao se sve do 31.12. kad je izvor prestao biti aktivan.

Izvor Simerić se nalazi nizvodnije od izvora Gradole, te je također bio suh na početku motrenja. Prva pojava vode kao i prvi preljev registrirani su 22.10.1987., te su od tad i prikupljani uzorci vode za analize. Do 10.12. uzorci su uzimani jednom na dan, a kasnije svaki drugi dan do kraja promatranja.

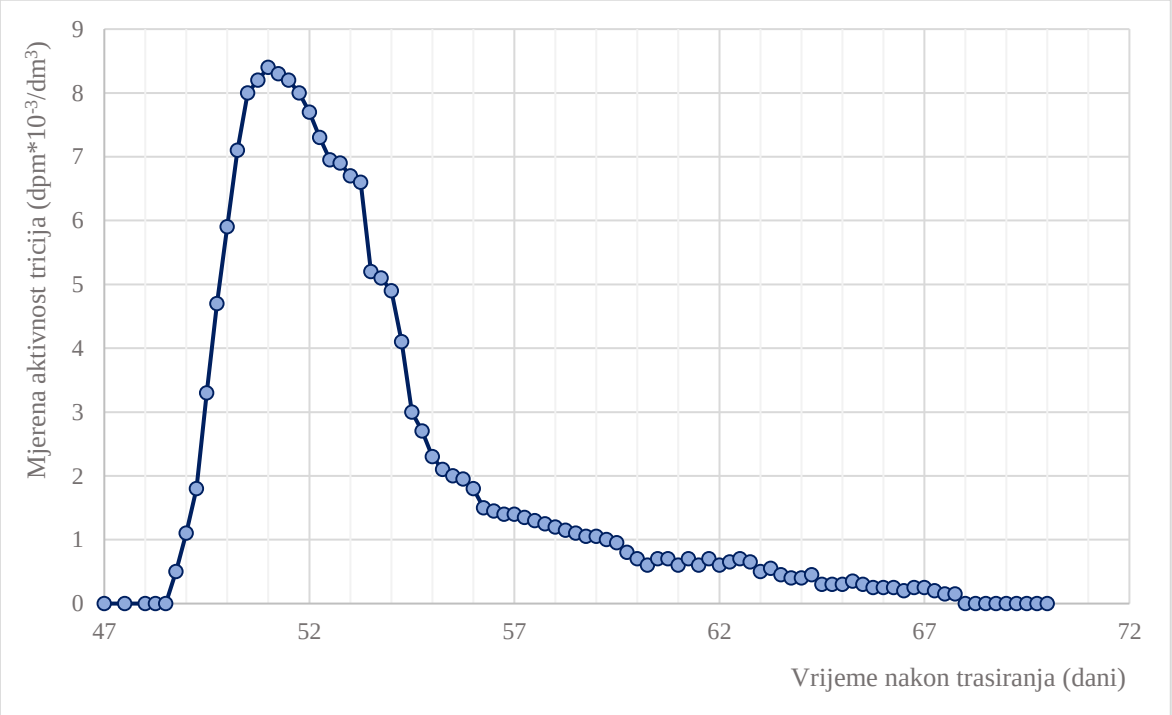
Izvor u Tarskoj vali sastoji se od tri manja izvora, no uzorci su uzimani jednom na dan samo na izvoru koji se nalazi najbliže moru.

Izvor Sv. Martin nalazi se na samoj obali mora u uvali pokraj Poreča. Uzorci su se prikupljali također jednom na dan i to u vrijeme oseke kad je utjecaj mora na izvor manje izražen.

Izvor Funtana sastoji se od dva izvora. Jedan izvor se nalazi neposredno uz obalu, dok je drugi udaljen 30 m. Uzorci su uzimani na izvoru bliže moru budući da velikog utjecaja mora nije bilo.

Izvori u Limskom kanalu, postoji veći broj izvora lociranih uz samu morsku obalu. Svi izvori su bili suhi na početku osmatranja. Pojava vode je registrirana tek 16.11. i od tad su se jednom dnevno skupljali uzorci samo na jednom izvoru.

Prva pojava tricija registrirana je u uzorku vode ***izvora Gradole*** 14.11.1987. godine, dok je maksimalna koncentracija izmjerena 51. dan nakon ubacivanja tricirane vode u ponor, a samo dva dana nakon prve pojave, 16.11.1987. godine. Na izvoru Gradole tricij je registriran u uzorcima sve do 2.12.1987. godine, sveukupno 68 dana. Prisutna koncentracija tricija određivana je mjerenjem β-radioaktivnosti uzoraka. Na slici 3.9. prikazane su mjerene razine tricija u uzorcima vode u ovisnosti o vremenu proteklom od trenutka trasiranja.



Slika 3.9. Mjerena aktivnost tricija u odnosu na vrijeme proteklo od trasiranja

Iz prikazanog je vidljivo da je istjecanje tricija na izvoru kontinuirano i da je za vrijeme promatranja zabilježen samo jedan maksimum. S obzirom na način istjecanja donesen je zaključak kako je tricij na svom putu kroz podzemlje, nošen tokom podzemne vode od ponora Čiže naišao na podzemnu akumulaciju gdje je došlo do njegovog velikog razrjeđenja. S obzirom na samo jedan maksimum zaključeno je da je tok podzemne vode između ponora Čiže i izvora Gradole direktan (Institut "Ruđer Bošković", 1988).

Iz ovisnosti koncentracije tricija prisutne u uzorcima vode o vremenu proteklom od trenutka trasiranja izračunato je srednje vrijeme prolaza izotopa t_p. Srednju brzinu toka podzemne vode u možemo izračunati pomoću sljedeće jednadžbe:

$$u = \frac{l}{t_p} \qquad (3\text{-}1)$$

gdje je l udaljenost između mjesta ubacivanja i mjesta uzimanja uzorka, a t_p srednje vrijeme prolaza izotopa. Tricij je na izvoru istjecao ukupno 18 dana. Uzevši u obzir zračnu udaljenost između ponora Čiže i izvora Gradole od 14,5 km, pretpostavljena je prividna brzina toka podzemne vode od 0,33 cm/s. Dug period istjecanja, kao i mala prividna brzina mogu se objasniti posebnim hidrološkim uvjetima koji su bili prisutni za vrijeme trasiranja i kasnije. Kao i kod prije navedenih trasiranja, od svih promatranih izvora, tricij se pojavio jedino na izvoru Gradole.

Iz dobivene ovisnosti koncentracije tricija u prikupljenim uzorcima vode o proteklom vremenu od trasiranja (*Slika 3.9.*) i s obzirom na izdašnost izvora (suma preljevne vode i vode koja je crpljena na izvoru Gradole) izračunato je kako je na izvoru u 18 dana isteklo 92,5 % ubačene količine tricija. Također izračunat je volumen podzemne vode koja se nalazi na potezu između ponora i izvora. U ovom izrazito sušnom razdoblju ovaj volumen određen je na oko 2,9 x 10^6 m^3 (Institut "Ruđer Bošković", 1988).

I pri ovom trasiranju tricij je registriran jedino u uzorcima vode s izvora Gradole, i ako se izuzmu moguće greške prilikom određivanja izdašnosti izvora kao i moguće greške pri određivanju koncentracije može se sa sigurnošću reći da je sav ubačeni tricij istekao na izvoru. Ovaj zaključak je u suglasnosti sa zaključcima donesenim u sklopu ranije provedenih trasiranja 1969. i 1976. godine.

Razlika u rezultatima ovog i prijašnjih trasiranja uočljiva je u registriranoj brzini prolaska trasera kroz podzemlje i periodu istjecanja trasera. Veličine ovih parametara u izravnoj su vezi sa hidrološkim uvjetima podzemlja koji su vladali u vrijeme pojedinih trasiranja.

Zbog različitih vodnih stanja u podzemlju prilikom izvođena trasiranja, brzine tečenja i odnos vremena zadržavanja trasera u podzemlju su vidno različiti. Brzine su manje kod niskih vodostaja i malih protoka na izvoru što upućuje na to da se traser na putu od ponora do izvora zadržao u podzemlju, do nastavka kretanja trasera prema izvoru došlo je tek dizanjem nivoa podzemne vode. Kod većih protoka pri kojima je podzemlje saturirano, te uz veću prividnu brzinu dolazi i do brže pojave, te kraćeg vremena istjecanja trasera.

S obzirom da se pri svim trasiranjima traser pojavio jedino na izvoru Gradole, to je pokazalo i dokazalo da je ponor Čiže povezan jedino sa tim izvorom. Takav zaključak upućivao je na mogućnost da se ulijevanjem vode u ponor Čiže može kontrolirano povećati izdašnost izvora Gradole.

4. Umjetno napajanje vodonosnika izvora Gradole

Ekstremne suše 1987. i 1988. godine dovele su do pada izdašnost izvora. Upravo zbog problema vodoopskrbe velika se pažnja posvetila mogućnosti da se manjak vode za potrebe vodoopskrbe osigura iz nekog drugog izvora kako bi se doprinijelo stabilnosti opskrbe vodom. To nije bilo izvedivo jer je glavni planirani opskrbljivač pitkom vodom *Vodoopskrbni sustav Istra (VSI)-Butoniga* u tom periodu još bio u fazi izgradnje, stoga je bilo potrebno pronaći neko drugo rješenje koje bi što prije osiguralo potrebnu količinu vode.

Ideja o mogućem rješenju dobivena je iz prije izvedenih, ranije navedenih trasiranja ponora Čiže te ostalih do tada provedenih istražnih geoloških i hidroloških radova na slivu izvora Gradole i izvora Bulaž.

Za osiguravanje potrebne količine vode osmišljena su dva rješenja, čija se izvedba odvijala paralelno. Prvi način, koji je djelomično kompenzirao nedostatak vode, bilo je dovođenje vode sa izvora Bulaž do izvora Gradole i to u količini od 140 l/s. No s druge strane, kao primarni zadatak pokušalo se pronaći bolji način iskorištavanja izvora Gradole kao i mogućnost kontroliranog povećanja njegove izdašnosti. Kao prvi korak izvedena je regulacija izvora izvođenjem injekcijske zavjese i izgradnjom preljeva što je uvelike pomoglo u smanjenju intenziteta pražnjenja podzemne akumulacije te su smanjeni gubici statičkih rezervi podzemne vode.

Kao što je navedeno, svi rezultati prijašnjih trasiranja potvrdili su da je ponor Čiže povezan jedino sa izvorom Gradole. Iako su sva trasiranja izvođena u različitim hidrološkim uvjetima zaključak je uvijek bio isti, glavni pukotinski sustavi u tom dijelu krša su upravo ti koji povezuju ponor Čiže i izvor Gradole. Upravo taj zaključak doveo je do ideje da se preko te veze utječe na izdašnost izvora, tj. da se kontinuiranim ulijevanjem vode u ponor Čiže poveća izdašnost samog izvora Gradole (Institut “Ruđer Bošković”, 1988).

4.1. Količine ulijevane vode

Za probno ulijevanje korištena je voda iz obližnje akumulacije Butoniga. Voda se uzimala pomoću izgrađenog pumpnog postrojenja s tri crpna agregata kapaciteta po 150 l/s i transportirala kroz dio izgrađenog magistralnog cjevovoda do ponora Čiže.

Početak crpljenja vode bio je 13.9.1988. godine u 15:20 sati, a konačni prestanak crpljenja bio je 29.10.1988. u 00:40 sati. U toku crpljenja ukupno je crpljeno i uliveno u ponor Čiže 610 722 m^3 vode iz akumulacije Butoniga, a crpljeno je i ulijevano konstantnom stopom od 150 l/s. U tablici 4.1 prikazano je vrijeme crpljenja po danima, kao i volumen vode koji je crpljen u određenom vremenskom periodu.

Vidljivo je kako je pri početku crpljenja, u razdoblju od 13.9.1988. do 10.10.1988. godine u pogonu bio samo jedan crpni agregat. U tom razdoblju ukupna dnevna crpljena količina vode nije prelazila 12 960 m^3 na dan. Od 11.10.1988. do 29.10.1988. uz glavni agregat, često se palio i dodatni, drugi crpni agregat. U tom periodu dnevne crpne količine bile su nešto veće nego u prethodnom periodu i iznosile su i do 16 740 m^3 na dan. Gledajući crpnu količinu po sekundi u određenom vremenu rada jednog agregata ona je konstanto iznosila 150 l/s za vrijeme svakog crpljenja, osim pri prvom crpljenju zadnjeg dana u trajanju od 15 minuta kada se crpilo iznosu od 100 l/s. S obzirom da su nekad istodobno bila u funkciji dva agregata od kojih svaki crpi količinom od 150 l/s, možemo reći kako se u nekim periodima voda iz akumulacije Butoniga crpila i zatim ulijevala u ponor Čiže količinom od 300 l/s. Količina od 300 l/s ulazi u raspon kapaciteta crpljenja i ulijevanja u ponor Čiže koji je određen prije samog izvođenja pomoću rezultata prijašnjih istraživanja, a koji iznosi maksimalno 450 l/s.

Tablica 4.1.Prikaz crpljene količine, vremena crpljenja i agregata koji su bili u funkciji (ujedno i količina ulijevane vode i vrijeme ulijevanja)

Datum	Vrijeme pumpanja	Ukupno sati	Br. crpnog agregata	Količina vode m^3	Ukupna crpna količina vode m^3/dan
13.9.1988	15:20 - 16:30	1:10	CA1	630	3735
	17:45 - 23:30	5:45	CA1	3105	
14.9.1988	00:50 - 24:00	23:10	CA1	12510	12510
15.9.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA1	12960	12960
16.9.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA1	12960	12960
17.9.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA1	12960	12960
18.9.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA1	12960	12960
19.9.1988	00:00 - 10:00	10:00	CA1	5400	10440
	14:42 - 14:52	0:12	CA1	108	
	14:52 - 14:55	0:03	CA1	27	
	14:55 - 24:00	9:05	CA1	4905	
20.9.1988	00:00 - 12:10	12:10	CA1	6570	12717
	12:25 - 12:28	0:03	CA1	27	
	12:40 - 24:00	11:20	CA3	6120	
21.9.1988	00:00 - 11:25	11:25	CA3	6165	12645
	12:00 - 24:00	12:00	CA3	6480	
22.9.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	12960
23.9.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	12960
24.9.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	12960
25.9.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	12960
26.9.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	12960
27.9.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	12960
28.9.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	12960
29.9.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	12960
30.9.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	12960
1.10.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	12960
2.10.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	12960
3.10.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	12960
4.10.1988	00:00 - 12:10	12:10	CA3	6570	12915
	12:15 - 24:00	11:45	CA3	6345	
5.10.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	12960
6.10.1988	00:00 - 05:40	5:40	CA3	3060	12780
	06:00 - 24:00	18:00	CA3	9720	
7.10.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	12960
8.10.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	12960
9.10.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	12960
10.10.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	13455
	23:05 - 24:00	0:55	CA1	495	
11.10.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	16515
	00:00 - 05:40	5:40	CA1	3060	

	23:05 - 24:00	0:55	CA1	495	
12.10.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	16605
	00:00 - 05:50	5:50	CA1	3150	
	23:05 - 24:00	0:55	CA1	495	
13.10.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	16650
	00:00 - 05:50	5:50	CA1	3150	
	23:00 - 24:00	1:00	CA1	540	
14.10.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	15660
	00:00 - 05:00	5:00	CA1	2700	
15.10.1988	00:00 - 11:00	11:00	CA3	5940	12825
	11:15 - 24:00	12:45	CA3	6885	
16.10.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	12960
17.10.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	12960
18.10.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	12960
19.10.1988	00:00 - 19:40	19:40	CA3	10620	12870
	19:50 - 24:00	4:10	CA3	2250	
20.10.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	16515
	00:15 - 05:55	05:40	CA1	3060	
	23:05 - 24:00	0:55	CA1	495	
21.10.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	16605
	00:00 - 05:50	5:50	CA1	3150	
	23:05 - 24:00	0:55	CA1	495	
22.10.1988	00:00 - 09:30	9:30	CA3	5130	16605
	09:40 - 24:00	14:20	CA3	7740	
	00:00 - 06:00	6:00	CA1	3240	
	23:05 - 24:00	0:55	CA1	495	
23.10.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	16740
	00:00 - 05:55	5:55	CA1	3195	
	22:55 - 24:00	1:05	CA1	585	
24.10.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	16155
	00:00 - 05:55	5:55	CA1	3195	
25.10.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	12960
26.10.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	12960
27.10.1988	00:00 - 24:00	24:00	CA3	12960	13365
	23:15 - 24:00	0:45	CA1	405	
28.10.1988	00:00 - 00:15	0:15	CA3	90	8415
	00:45 - 15:30	14:45	CA3	7965	
	00:00 - 00:40	0:40	CA1	360	

4.2. Praćenje procesa ulijevanja

Uz povećanje izdašnosti na izvoru Gradole, cilj je bio i definirati dinamiku podzemne vode kao i promjene u njenoj kvaliteti, te je dan nakon početka ulijevanja vode, 14.9.1988. u 14:20 sati ubačeno 100 Ci tricirane vode izravno u ponor Čiže. Koncentracija tricija iz prikupljenih uzoraka određivala se pomoću β-radioaktivnosti. Prikupljeni su podaci o koncentraciji tricija u uzorcima vode, kao i podaci o njegovoj vremenskoj ovisnosti i ovisnosti o protoku na izvoru.

Izvori za praćenje i skupljanje uzoraka izabrani su na temelju rezultata prethodnih istraživanja na ovom području. Odabrani su izvori Gradole, Male Gradole te izvor Očjak. Izvor Gradole bio je glavno mjesto za praćenje te je na njemu skupljanje uzoraka bilo učestalije. Uzorci su se na Gradolama skupljali četiri puta na dan, dok su na ostala dva izvora uzorci prikupljani samo jednom dnevno.

Za vrijeme izvođenja probnog ulijevanja na izvoru ***Gradole*** se crpila količina dostatna za potrebe vodoopskrbe. Crpljeno je preko 750 l/s. Također od početka ulijevanja, 13.9. pa sve do 9.11.1988. na izvoru je bio registriran i preljev vode što je vidljivo u tablici 4.2 gdje je prikazana količina preljevne vode za cijelu 1988. godinu. U tom periodu ukupna izdašnost izvora bila je zbroj crpne količine i količine preljevne vode. Iz tablice je također vidljiv i nedostatak preljeva sredinom kolovoza i ponovna pojava nakon 22.8. No nakon ponovne pojave preljeva uočljivo je postepeno smanjenje količine preljevne vode sve do njenog ponovnog nestanka 9.11.1988. Nakon tog datuma izdašnost izvora iznosi samo crpna količina. Dnevne količine crpljenja vode na izvoru Gradole, također u m^3/s za period od početka probnog ulijevanja do kraja 1988. godine prikazane su u tablici 4.3.

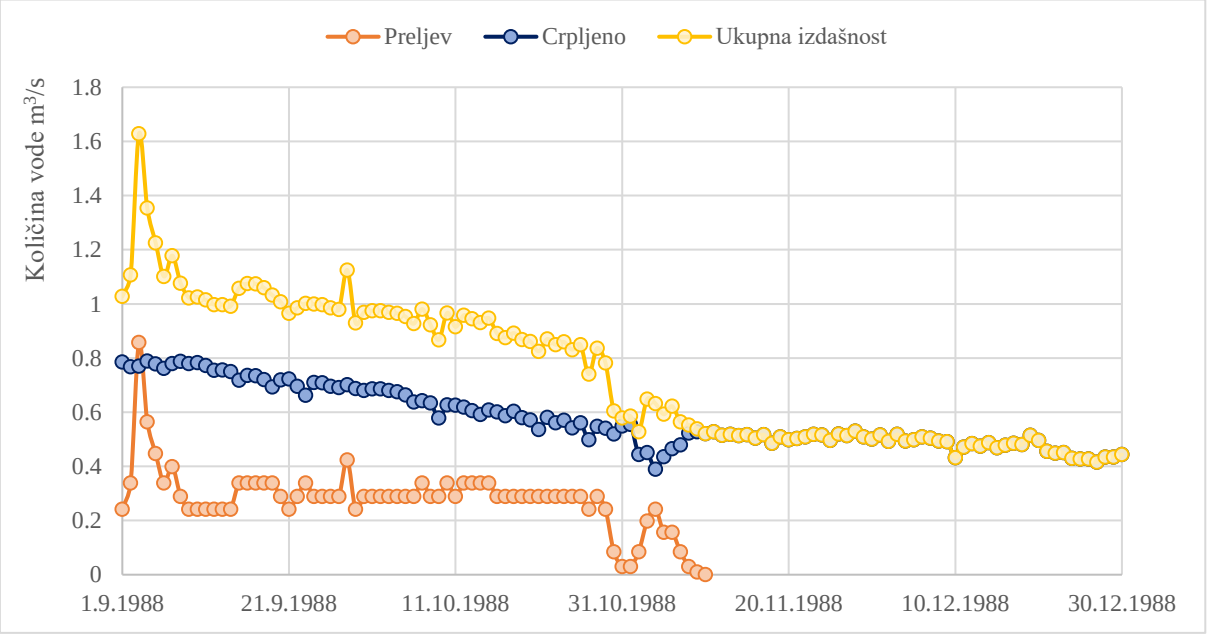
Tablica 4.2. Prikaz količine vode na preljevu za 1988. godinu (m^3/s)

Dan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1,21	3,23	4,20	3,52	1,94	2,06	1,72	0,339	0,242	0,289	0,030	0
2	1,21	3,23	4,13	3,82	1,94	1,72	1,51	0,242	0,339	0,289	0,085	0
3	1,21	3,38	3,82	4,29	1,94	1,41	1,41	0,198	0,858	0,289	0,198	0
4	1,12	3,38	3,67	4,29	1,94	1,41	1,41	0,157	0,565	0,289	0,242	0
5	1,12	3,23	3,52	4,29	1,94	1,41	1,21	0,157	0,447	0,289	0,157	0
6	1,03	3,23	3,38	4,29	1,83	1,51	1,21	0,085	0,339	0,289	0,157	0
7	1,03	3,23	3,23	3,98	1,72	1,51	1,21	0,085	0,399	0,339	0,085	0
8	1,12	3,09	3,23	3,98	1,72	1,51	1,12	0,085	0,289	0,289	0,030	0
9	1,12	2,95	3,09	4,13	1,72	1,51	1,03	0,030	0,242	0,289	0,010	0
10	1,03	3,09	2,95	4,13	1,72	1,41	1,12	0,030	0,242	0,339	0	0
11	1,03	3,09	2,69	3,98	1,72	1,31	1,12	0	0,242	0,289	0	0
12	1,12	3,09	2,55	3,82	1,72	1,31	0,941	0	0,242	0,339	0	0
13	1,03	3,09	2,43	3,67	1,61	2,06	0,941	0	0,242	0,339	0	0
14	0,941	3,09	2,30	3,38	1,61	4,78	0,941	0	0,242	0,339	0	0
15	1,03	3,09	2,18	3,38	1,61	3,98	0,941	0	0,339	0,339	0	0
16	1,03	3,38	2,18	3,38	1,61	3,09	0,941	0	0,339	0,289	0	0
17	1,03	3,38	2,06	3,23	1,61	2,82	0,858	0	0,339	0,289	0	0
18	1,03	3,09	2,06	3,09	1,51	2,82	0,858	0	0,339	0,289	0	0
19	0,941	3,09	1,94	3,09	1,51	3,82	0,778	0	0,339	0,289	0	0
20	0,941	3,09	1,94	3,09	1,51	4,62	0,701	0	0,289	0,289	0	0
21	1,03	3,09	1,94	2,95	1,51	4,45	0,627	0	0,242	0,289	0	0
22	1,61	3,09	3,52	2,82	1,41	3,98	0,565	0,030	0,289	0,289	0	0
23	2,18	2,95	3,23	2,55	1,31	3,52	0,565	0,339	0,339	0,289	0	0
24	2,30	2,82	3,52	2,55	1,31	3,09	0,505	0,157	0,289	0,289	0	0
25	2,30	4,95	3,67	2,43	1,21	2,95	0,447	0,339	0,289	0,289	0	0
26	3,52	5,30	3,67	2,3	1,21	2,69	0,392	0,447	0,289	0,289	0	0
27	4,13	5,47	3,67	2,18	1,21	2,43	0,447	0,339	0,289	0,242	0	0
28	3,98	4,95	3,67	2,18	1,51	2,18	0,447	0,242	0,424	0,289	0	0
29	3,82	4,62	3,67	2,06	3,09	1,94	0,392	0,242	0,242	0,242	0	0
30	3,67		3,67	2,06	2,82	1,83	0,339	0,242	0,289	0,085	0	0
31	3,52		3,67		2,30		0,339	0,242		0,030		0

Tablica 4.3. Prikaz crpne količine na izvoru Gradole (m^3/s)

Datum	m^3/s
1.9.1988	0,785
2.9.1988	0,768
3.9.1988	0,770
4.9.1988	0,789
5.9.1988	0,779
6.9.1988	0,762
7.9.1988	0,779
8.9.1988	0,788
9.9.1988	0,780
10.9.1988	0,783
11.9.1988	0,773
12.9.1988	0,755
13.9.1988	0,756
14.9.1988	0,749
15.9.1988	0,719
16.9.1988	0,736
17.9.1988	0,735
18.9.1988	0,720
19.9.1988	0,693
20.9.1988	0,719
21.9.1988	0,723
22.9.1988	0,696
23.9.1988	0,662
24.9.1988	0,710
25.9.1988	0,708
26.9.1988	0,696
27.9.1988	0,691
28.9.1988	0,701
29.9.1988	0,688
30.9.1988	0,680
1.10.1988	0,686
2.10.1988	0,686
3.10.1988	0,680
4.10.1988	0,676
5.10.1988	0,664
6.10.1988	0,638
7.10.1988	0,642
8.10.1988	0,634
9.10.1988	0,579
10.10.1988	0,628
11.10.1988	0,626
12.10.1988	0,619
13.10.1988	0,606
14.10.1988	0,592
15.10.1988	0,609
16.10.1988	0,601
17.10.1988	0,587
18.10.1988	0,603
19.10.1988	0,580
20.10.1988	0,572
21.10.1988	0,536
22.10.1988	0,581
23.10.1988	0,560
24.10.1988	0,571
25.10.1988	0,542
26.10.1988	0,560
27.10.1988	0,499
28.10.1988	0,548
29.10.1988	0,540
30.10.1988	0,520
31.10.1988	0,549
1.11.1988	0,555
2.11.1988	0,443
3.11.1988	0,451
4.11.1988	0,390
5.11.1988	0,435
6.11.1988	0,465
7.11.1988	0,479
8.11.1988	0,523
9.11.1988	0,528
10.11.1988	0,520
11.11.1988	0,528
12.11.1988	0,515
13.11.1988	0,518
14.11.1988	0,513
15.11.1988	0,517
16.11.1988	0,504
17.11.1988	0,517
18.11.1988	0,485
19.11.1988	0,509
20.11.1988	0,498
21.11.1988	0,503
22.11.1988	0,508
23.11.1988	0,518
24.11.1988	0,516
25.11.1988	0,496
26.11.1988	0,520
27.11.1988	0,513
28.11.1988	0,530
29.11.1988	0,508
30.11.1988	0,500
1.12.1988	0,516
2.12.1988	0,492
3.12.1988	0,518
4.12.1988	0,493
5.12.1988	0,499
6.12.1988	0,508
7.12.1988	0,504
8.12.1988	0,494
9.12.1988	0,492
10.12.1988	0,432
11.12.1988	0,471
12.12.1988	0,484
13.12.1988	0,474
14.12.1988	0,487
15.12.1988	0,468
16.12.1988	0,478
17.12.1988	0,486
18.12.1988	0,480
19.12.1988	0,515
20.12.1988	0,496
21.12.1988	0,455
22.12.1988	0,449
23.12.1988	0,450
24.12.1988	0,430
25.12.1988	0,427
26.12.1988	0,427
27.12.1988	0,416
28.12.1988	0,435
29.12.1988	0,435
30.12.1988	0,444
31.12.1988	

Na slici 4.1. su prikazani prije navedeni tablični podaci o količini crpljene vode i o količini vode na preljevu u m^3/s. Ukupna izdašnost prikazuje zbroj crpljene količine vode i količine vode na preljevu, sve do 10.11. kada količina preljevne vode pada na nulu. Vidljivo je kontinuirano opadanje izdašnosti s vremenom. Nakon tog datuma vidljivo je poklapanje crpne količine vode i ukupne izdašnosti izvora, s obzirom da preljev više nije prisutan.



Slika 4.1. Prikaz količine vode na preljevu, crpne količine, te ukupne izdašnosti za izvor Gradole od 1.9. do 31.12.1988. godine

Sljedeći izvor odabran za praćenje bio je izvor ***Male Gradole*** koji se nalazi na udaljenosti od oko 100 m od izvora Gradole. Na ovom izvoru je registrirano istjecanje vode do 22.10.1988. godine. Nakon tog datuma na izvoru nije bilo istjecanja, ali je bilo zadržane vode sve do 21.11., nakon čega je izvor u potpunosti suh. Na izvoru M. Gradole uzorci su se prikupljali jednom na dan.

Izvor Očjak također se nalazi blizu izvora Gradole, udaljeni su svega 250 m. I na ovom izvoru je bilo istjecanja vode pri početku promatranja, no nakon 26.10. izvor je bio u potpunosti suh.

Također praćen, bio je i sam ***ponor Čiže*** koji je vrijeme izvođenja napajanja ponekad imao prirodni dotok vode iz potoka Čiže. Dotok vode za vrijeme crpljenja prikazan je u m^3/s u tablici 4.4.

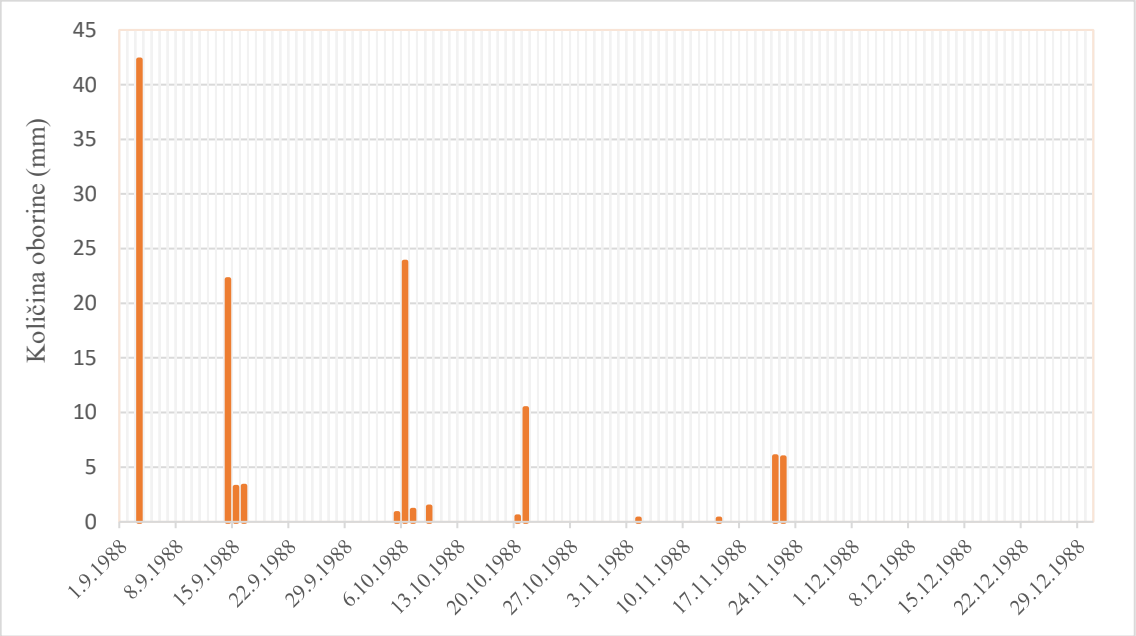
Tablica 4.4. Prikaz vodostaja i količine vode potoka Čiže

Datum	Vodostaj	m^3/dan	m^3/s
13.9.1988	-	0	0
14.9.1988	-	0	0
15.9.1988	-	0	0
16.9.1988	-	0	0
19.9.1988	-	0	0
20.9.1988	-	0	0
21.9.1988	-2	20	0,000231
22.9.1988	-2	20	0,000231
23.9.1988	-2	20	0,000231
26.9.1988	-2	20	0,000231
27.9.1988	-2	20	0,000231
28.9.1988	-2	20	0,000231
29.9.1988	ispod 0	90	0,001042
30.9.1988	-2	20	0,000231
3.10.1988	-2	20	0,000231
4.10.1988	-2	20	0,000231
5.10.1988	-2	20	0,000231
6.10.1988	0	90	0,001042
7.10.1988	-1	40	0,000463
10.10.1988	-2	20	0,000231
11.10.1988	-2	20	0,000231
12.10.1988	-2	20	0,000231
13.10.1988	-2	20	0,000231
14.10.1988	-2	20	0,000231
17.10.1988	ispod 0	90	0,001042
18.10.1988	-2	20	0,000231
19.10.1988	-2	20	0,000231
20.10.1988	0	90	0,001042
21.10.1988	-2	20	0,000231
24.10.1988	-2	20	0,000231
25.10.1988	-2	20	0,000231
26.10.1988	-2	20	0,000231
27.10.1988	0	90	0,001042
28.10.1988	0	90	0,001042

Također, za vrijeme istraživanja pratile su se i vremenske prilike na području sliva izvora Gradole. Dostupni su samo podaci sa kišomjerne stanice Botonega (*Tablica 4.5.*). U razdoblju probnog ulijevanja na ovoj kišomjernoj stanici zabilježeno je devet kiša koje su prikazane na slici 4.2. Podaci o oborini su izuzetno važni prilikom pojašnjavanja promjena u izdašnosti izvora Gradole koje će biti prikazano u narednim poglavljima.

Tablica 4.5. Podaci o oborinama s kišomjerne stanice Botonega

Datum	Količina oborine (mm)
14.9.1988	22,2
15.9.1988	3,2
16.9.1988	3,3
5.10.1988	0,8
6.10.1988	23,8
7.10.1988	1,1
9.10.1988	1,4
20.10.1988	0,5
21.10.1988	10,4



Slika 4.2. Dnevne oborine u razdoblju od 1.9. do 31.12.1988 godine

4.3. Praćenje promjene kakvoće vode

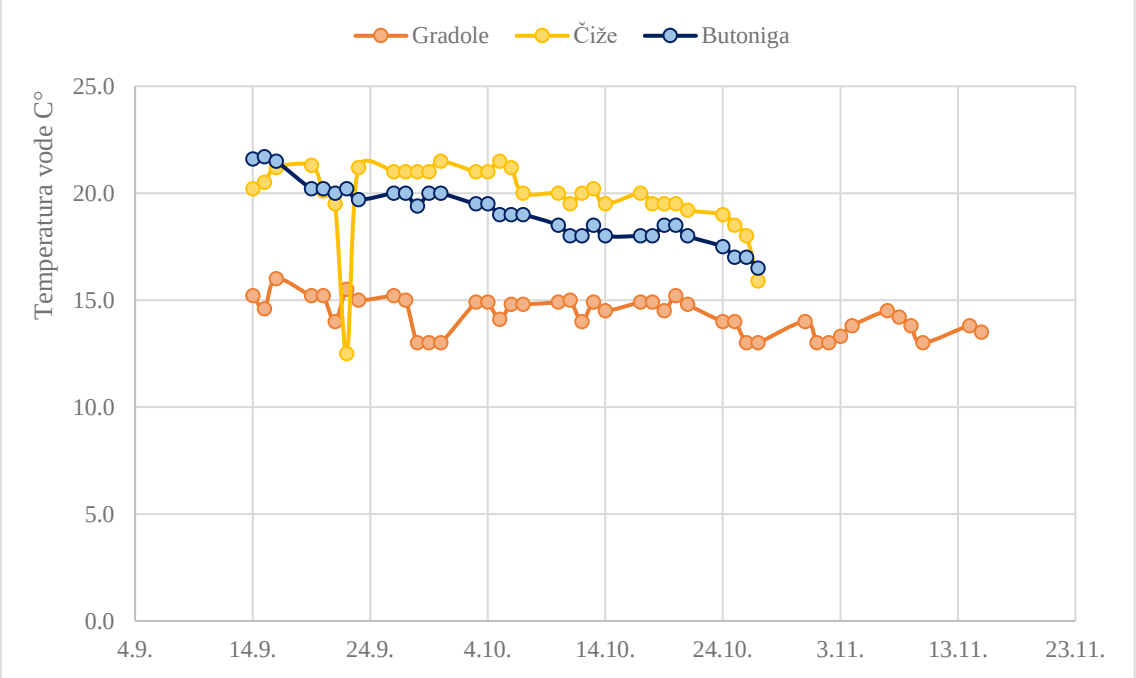
S obzirom da je ulijevana voda iz akumulacije Butoniga prema mnogim značajkama lošije kvalitete od vode koja se crpi na izvoru Gradole, praćenju promjena u kvaliteti vode na izvoru Gradole posvetilo se mnogo pažnje. Vodilo se računa o mogućem pogoršanju kvalitete vode na izvoru. Kako bi se na takvu negativnu promjenu moglo pravovremeno reagirati prestankom ulijevanja vode iz akumulacije Butoniga u ponor Čiže, rađene su detaljne analize kvalitete vode.

Fizička, bakterijska i kemijska analiza rađene su svakodnevno na uzorku vode iz akumulacije Butoniga na dubini od četiri metra, uzorku vode ulijevane u ponor Čiže i uzorku prikupljenom na izvoru Gradole. Svi rezultati su prikazani unutar tablica u prilogu 2. Dalje u tekstu biti će prikazani neki od glavnih parametara i koncentracija koji su bili praćeni za vrijeme izvođenja probnog ulijevanja vode.

4.3.1. Temperatura vode

Na slici 4.3. prikazana je temperatura vode izvora Gradole, akumulacije Butoniga te vode koja se ulijevala u ponor Čiže. Vidljivo je da su voda iz akumulacije kao i voda koja je nakon transporta cijevima ulijevana u ponor dosta toplije od vode koja je crpljena na izvoru Gradole. Voda iz akumulacije Butoniga je površinska voda te je za očekivati da je njena temperatura nešto viša. Na prikazu je vidljivo da s vremenom temperatura opada, uzrok tome je promjena godišnjeg doba, odnosno promjena temperature zraka. Voda koja je ulijevana u ponor većinom je toplija od vode koja se crpi u akumulaciji, osim velikog pada od 7° koji se javio 22.9. S obzirom da se voda prenosila cijevima, pri većim temperaturama zraka, njeno zagrijavanje je očekivano.

Voda izvora Gradole konstantno je niže temperature, temperature se kreću od 13 do 15 °C. To potvrđuje da je u podzemlju došlo do hlađenja ulijevane vode, samom cirkulacijom kroz podzemlje kao i miješanjem sa podzemnom vodom. Datum pojave tricija na izvoru, 13.10. možemo uzeti kao datum kada je ulijevana voda stigla do izvora, no ni tad nisu uočljive nikakve nagle i velike promjene u temperaturi vode, ona je i dalje konstantna. Stoga bi se dalo zaključiti da ulijevana voda nije imala velikog utjecaja na temperaturu vode u akumulaciji, već je hladnija voda iz akumulacije imala utjecaja na topliju ulijevanu vodu.



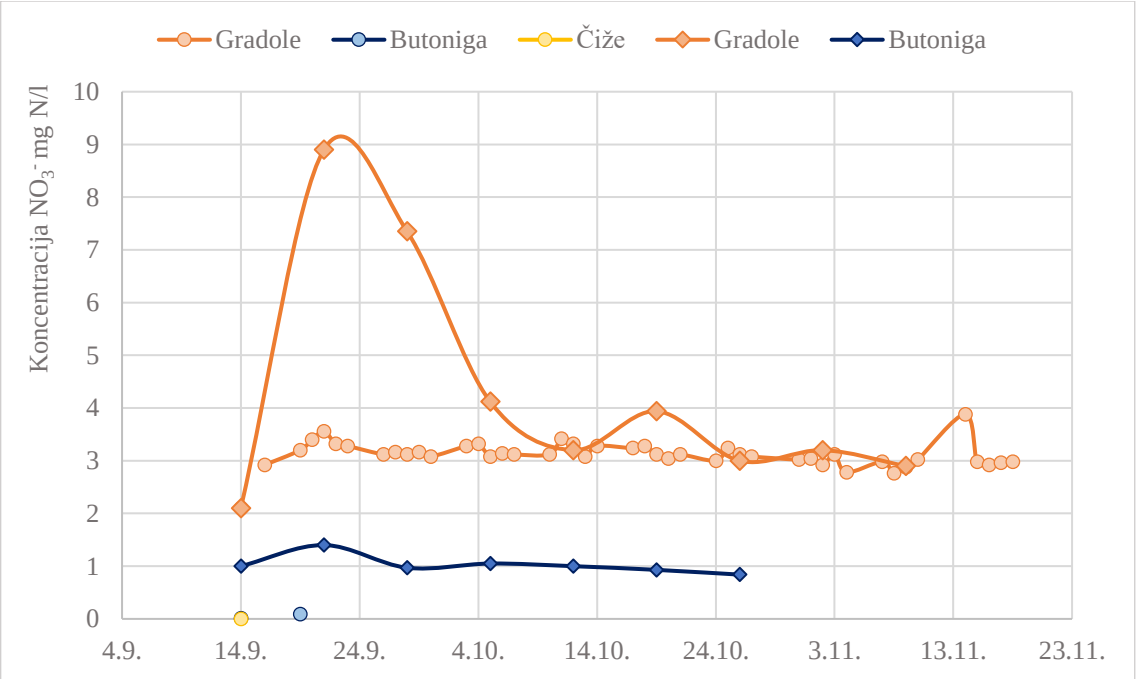
Slika 4.3. Temperatura vode mjerena na izvoru Gradole, ponoru Čiže i akumulaciji Butoniga.

4.3.2. Koncentracija nitrata

Koncentracija NO_3^- također je praćena svakodnevno. S obzirom na manjak podataka za vodu iz akumulacije Butoniga iz svakodnevnih analiza, na grafu (*Slika 4.4.*) prikazani su i podaci uzoraka prikupljanih na tjednoj bazi. Odmah je uočljiva velika razlika u mjerenoj koncentraciji nitrata.

Koncentracija nitrata u vodi akumulacije Butoniga, prema svim analizama, kreće se od 0 do 1,4 mg N/l, dok za vodu ulijevanu u ponor imamo samo jedan rezultat od prvog dana i on iznosi 0 mg N/l. U vodi izvora Gradole iz rezultata svakodnevno provođenih analiza vidljivo je da je koncentracija stalno oko 3 mg N/l, jedino 14.11. vidljivo je manje odstupanje. Prema rezultatima uzoraka koji su prikupljani na tjednoj bazi koncentracija nitrata kreće se u rasponu od 2,1 do 8,9 mg N/l, s tim da je vidljivo veliko smanjenje koncentracije 12.10.

To je otprilike i datum kada je ulijevana voda stigla do izvora Gradole, no prema svim prikupljenim podacima nije se moglo zaključiti koliko je ulijevana voda s manjom koncentracijom nitrata utjecala na stabilizaciju i poboljšanje kvalitete vode izvora Gradole (Institut "Ruđer Bošković", 1988).



Slika 4.4. Koncentracija nitrata na izvoru Gradole (mjerena svakodnevno i tjedno), vodi ulijevanoj u ponor te u akumulaciji Butoniga (svakodnevno i tjedno).

Propisana granična koncentracija od strane Svjetske zdravstvene organizacije postavljena je na 11,3 mg N/l što je jednako 50 mg NO_3^- po litri (Drinking Water Directive 98/83/EC; WHO, 2004.), stoga možemo zaključiti kako su sve izmjerene koncentracije unutar

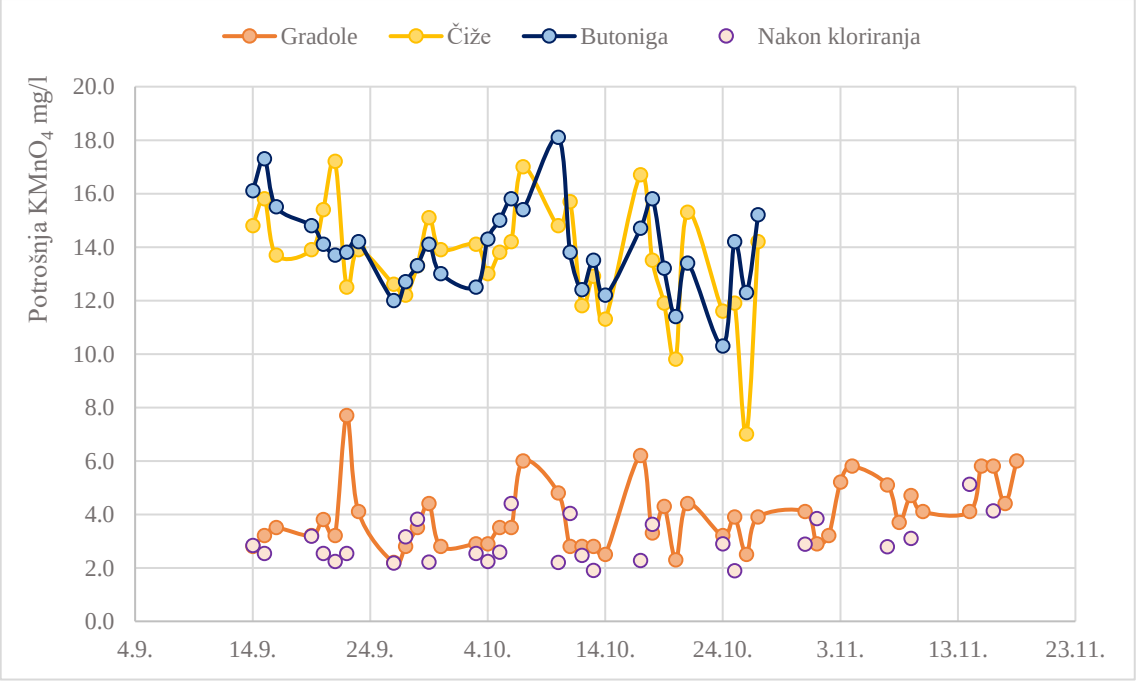
propisanog okvira. No s obzirom na velika odstupanja i velike razlike u mjerenim koncentracijama, čak i u uzorcima koji su prikupljani isti dan možemo reći da su ovakvi podaci izuzetno nepouzdani i neprikladni za bilo kakvu interpretaciju.

4.3.3. Kalij permanganat

Na prikazu utroška kalijevog permanganata (*Slika 4.5.)* odmah je vidljiva velika razlika.

Vode crpljene i ulijevane u ponor Čiže imaju prilično veliku potrošnju kalijevog permanganata koja se većinom kreće od 12 do 14 mg/l, no s većim odstupanjima. Maksimum izmjeren u praćenom razdoblju je 18,1 mg/l, a minimum 7 mg/l.

Voda sa izvora Gradole ima stabilnije i kvalitetnije rezultate. Utrošak kalij permanganata se kreće u granici od 2 do 4 mg/l. Jedino veće odstupanje pojavilo se 22.9. u iznosu od 7,7 mg/l. Na prikazu je također nanesen i utrošak $KMnO_4$ nakon kloriranja i vidljivo je da su vrijednosti stabilnije i manje variraju, što je svakako pozitivno za daljnje korištenje vode za vodoopskrbu.

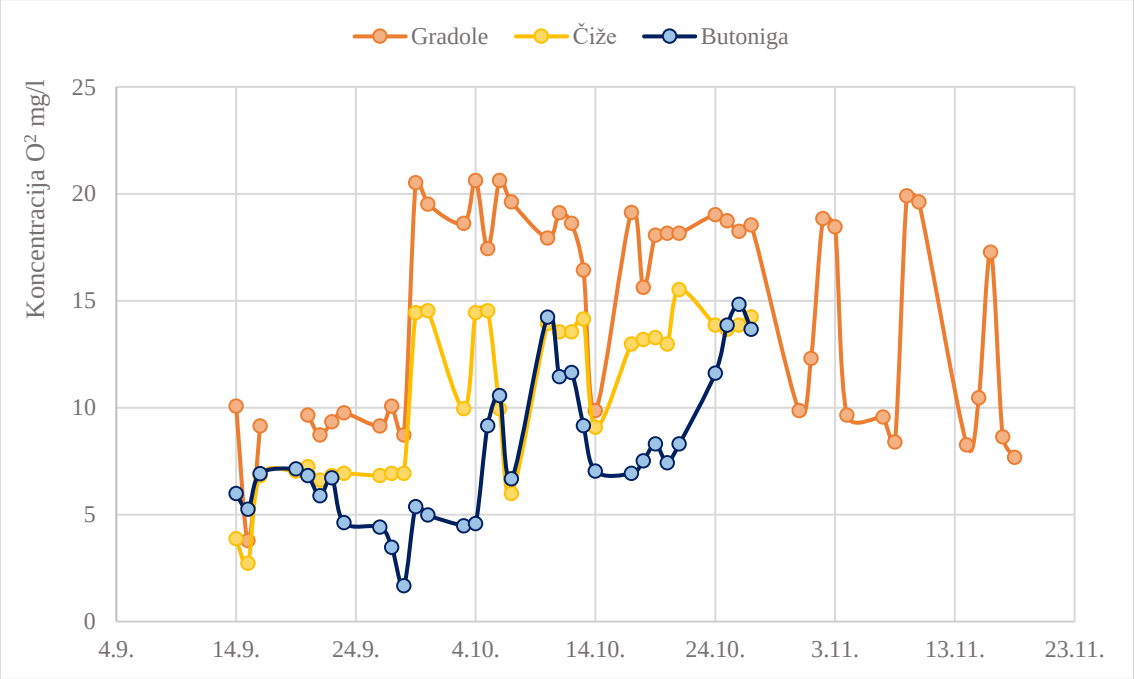


Slika 4.5. Utrošak kalij permanganata na izvoru Gradole(prije i nakon kloriranja), vodi ulijevanoj u ponor, vodi iz akumulacije Butoniga.

4.3.4. Koncentracija kisika

Količina O_2 mjerena u litri uzorka ima nagli porast početkom listopada kao što je i vidljivo na prikazu (*Slika 4.6.).*

Voda iz akumulacije Butoniga ima više-manje konstantno malu koncentraciju kisika. U vodi koja je ubacivana u ponor vidimo nagli porast koncentracije 29.9. te također i na vodi izvora Gradole. Od tog datuma voda izvora Gradole i ulijevana voda se prate u oscilacijama koncentracije kisika. Uočljive su velike varijacije u koncentracijama, no točan uzrok njima nije moguće odrediti.

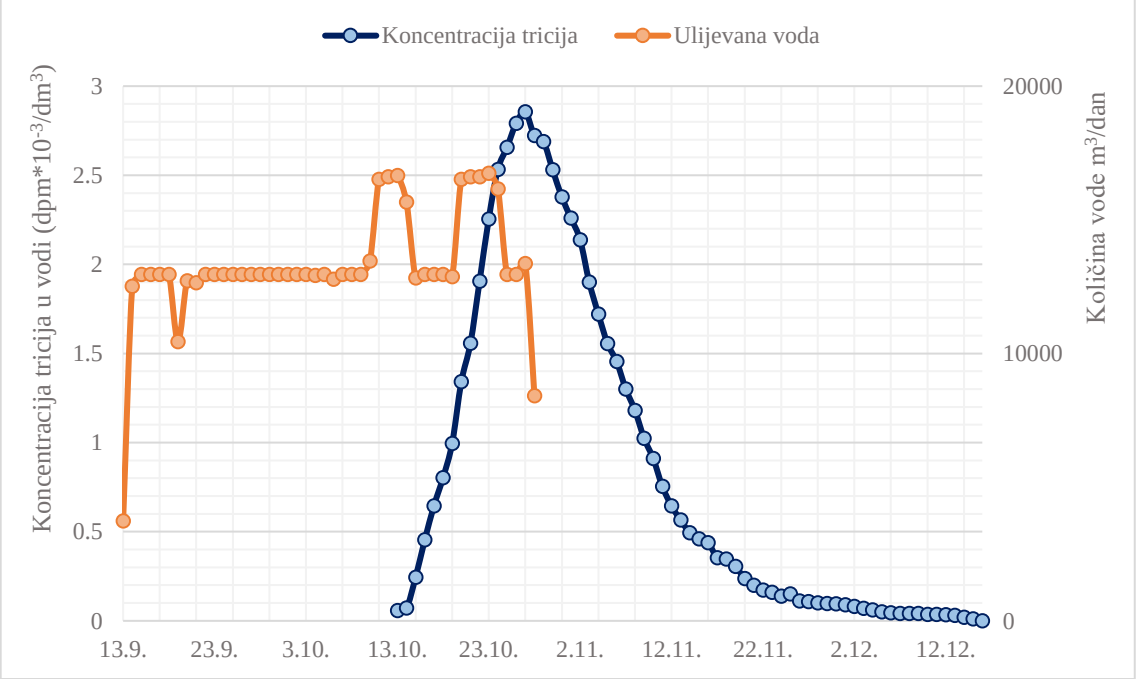


Slika 4.6. Koncentracija kisika mjerena na izvoru Gradole, vodi ulijevanoj na ponor Čiže, te na akumulaciji Butoniga.

5. Analiza rezultata ulijevanja vode u ponor Čiže

5.1. Rezultati trasiranja

Glavni zaključak provedenog trasiranja jednak je zaključcima donesenim pri svim prijašnjim trasiranjima, smjer toka vode od ponora Čiže ide prema izvoru Gradole te uvelike ovisi o hidrološkim uvjetima koji prevladavaju u podzemlju. Rezultatima trasiranja se još jednom poduprla ideja o kontroliranom povećanju izdašnosti izvora Gradole ulijevanjem vode u ponor Čiže, koje i je već bilo u tijeku. Na priloženoj slici (*Slika 5.1.*) vidljiva je ovisnost koncentracije tricija u uzorcima vode o vremenu proteklom od trenutka trasiranja, kao i količina ulijevane vode u m^3/dan.



Slika 5.1.Prikaz koncentracije tricija u uzorcima vode o vremenu proteklom od trasiranja i količine ulijevane vode u ponor Čiže

Ubacivanje tricija u ponor izvedeno je 14.9., a prva pojava tricija registrirana je 30 dana nakon ubacivanja, 13.10. Nakon prve pojave tricija koncentracija raste linearno s vremenom, povećanje koncentracije postaje sve izraženije do njenog maksimuma, koji je zabilježen 27.10., 44 dana nakon izvođenja trasiranja, te 15 dana nakon prve pojave. Nakon zabilježenog maksimuma, koncentracija tricija postupno opada sa nešto blažim nagibom i manje izraženim promjenama koncentracije nego u periodu porasta. Zadnja zabilježena

koncentracija tricija u uzorku vode registrirana je 15.12. i iako su se uzorci vode prikupljali i analizirali i nakon toga, koncentracije tricija više nije bilo.

Promjena nagiba porasta koncentracije koja je vidljiva 19.10. može se dovesti u odnos sa povećanjem količina ulijevane vode u ponor. Do povećanja količine ulijevanja je došlo 11.10., otprilike devet dana prije vidljive promjene u koncentraciji tricija. Povećanjem ulijevane količine povećala se i izdašnost izvora Gradole, što se isto tako odrazilo i na povećano istjecanja tricija. Uzevši u obzir ovaj pomak od devet dana, zaključeno je da je i pri prvoj pojavi tricija devet dana bilo potrebno za pronos tricija podzemnim kanalima od ponora do izvora. Iz čega je proizašao zaključak da je kontinuirani tok vode u podzemlju bio uspostavljen tek 4.10. što je točno devet dana prije pojave prve koncentracije tricija, tj. devet dana tricij je putovao kroz podzemlje kontinuiranim tokom. Ako je tok bio kontinuiran tek 4.10. to znači da se od početka ulijevanja do tada podzemna akumulacija punila, što je ujedno i onemogućavalo triciju da kontinuirano prođe prema izvoru (Institut "Ruđer Bošković", 1988).

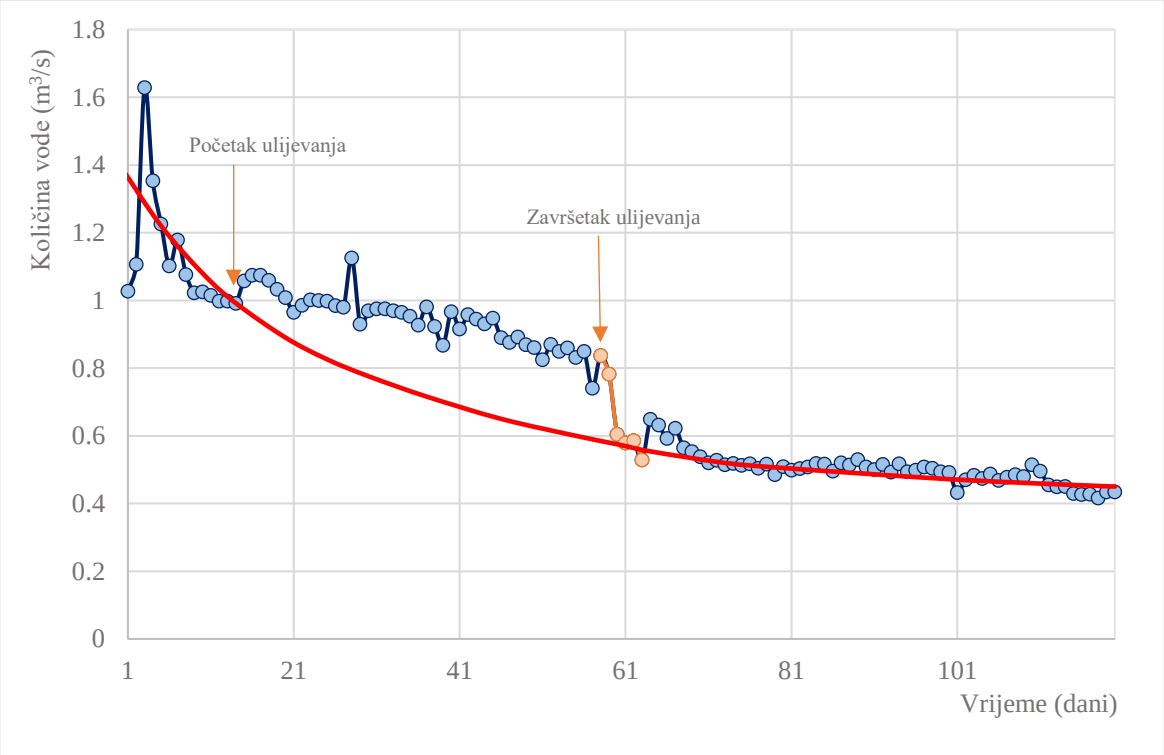
U razdoblju od 13.9. do 4.10. ukupno je ubačeno 272 322 m^3 vode u ponor Čiže. Što je u hidrološkim uvjetima koji su tada vladali bilo dovoljno za popunjavanje podzemne akumulacije i osiguravanje kontinuiranog toka od ponora Čiže prema izvoru Gradole.

5.2. Utjecaj ulijevanja na izdašnost izvora Gradole

Ulijevanje vode u ponor Čiže izvedeno je u svrhu povećanja izdašnosti na izvoru Gradole. Zapravo se ulijevanjem omogućilo održavanje izdašnosti na nekoj više-manje konstantnoj razini.

Do smanjenja izdašnosti izvora za vrijeme pokusa dolazilo je u manjoj mjeri i to prilično usporeno. Sa 0,992 m^3/s (85663,4 m^3/dan) koliko je iznosila izdašnost na dan početka ulijevanja vode u ponor Čiže izdašnost se smanjila na samo 0,836 m^3/s što je 72301,7 m^3/dan koliko je iznosila na zadnji dan ulijevanja. Za zaključiti je, a i iz prikaza (*Slika 5.2.*) je uočljivo da promjene izdašnosti, ne uzimajući u obzir dnevne oscilacije, unutar 46 dana aktivnog ulijevanja vode nisu bile nagle i velike.

Do naglog pada izdašnosti došlo je s prestankom ulijevanja vode, 28.10. Izdašnost izvora je u sljedećih pet dana pala na svega 0,554 m^3/s (45645,1 m^3/dan). Prestankom ulijevanja došlo je do suprotnog efekta, i smanjenja izdašnosti za skoro 50 %.



Slika 5.2. Prikaz promjene izdašnosti izvora Gradole u vremenu te aproksimirane glavne recesijske krivulje za promatrano razdoblje.

Kada krivulju pražnjenja dobivenu sa podacima zabilježenima za vrijeme ulijevanja vode 1988. godine usporedimo s glavnom recesijskom krivuljom (*Slika 3.3.*) aproksimiranoj prema izdašnostima koje su zabilježene u promatranom razdoblju, kao što je prikazano na slici 5.2., vidimo koliko krivulja pražnjenja iz 1988. godine odskače od načina pražnjenja koji bi se, prema glavnoj recesijskoj krivulji, očekivao za to razdoblje. Umjetno napajanje izvedeno od 13.9. do 28.10. ulijevanjem 610 722 m^3 vode zaslužno je za odstupanje od uobičajenog načina pražnjenja i održavanje skoro pa konstantne izdašnosti na izvoru.

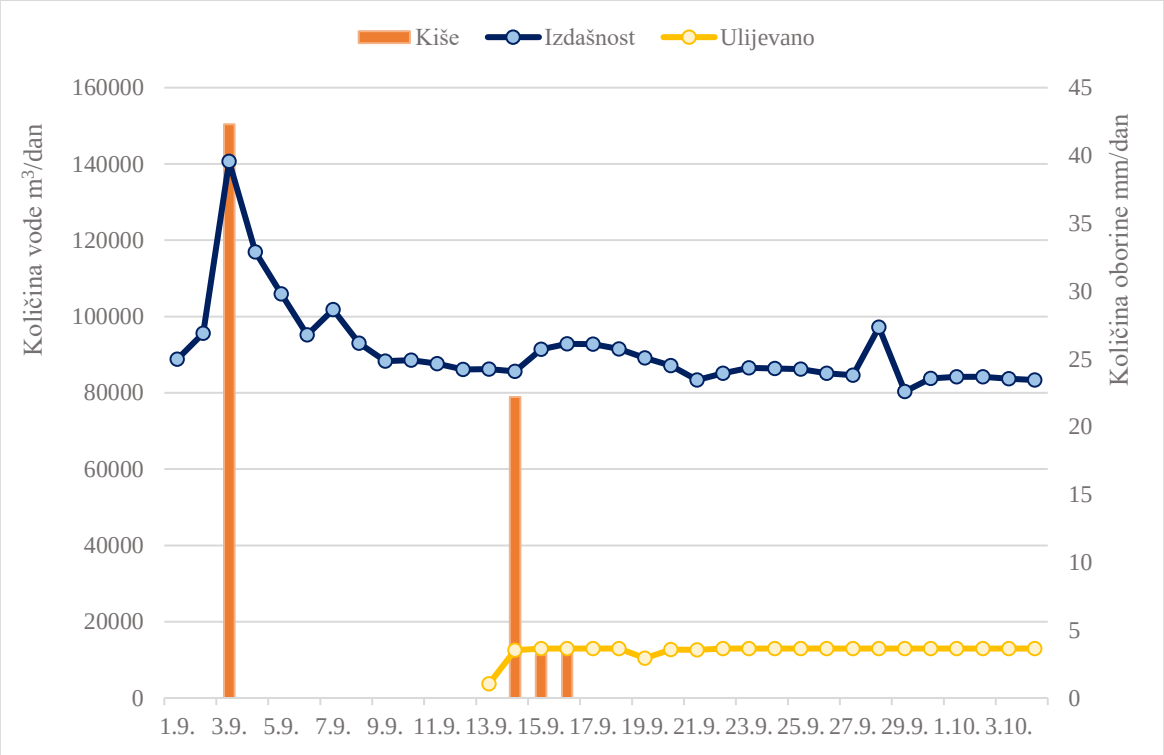
5.3. Analiza oscilacija izdašnosti izvora Gradole

Ukupna izdašnost izvora Gradole sastoji se od zbroja crpne količine i količine vode na preljevu. U prethodnom poglavlju analiziran je utjecaj ulijevanja na izdašnost, u ovom poglavlju posvetit ćemo se mnogim oscilacijama u izdašnosti izvora Gradole koje su se javile u promatranom razdoblju.

Utjecaja na izdašnost izvora imaju kiše i površinski dotok sa sliva ponora Čiže te također dotok koji stiže podzemnim putem sa ostalih dijelova sliva izvora Gradole. U razmatranom razdoblju na izdašnost izvora svakako je utjecala i količina ulijevane vode u ponor Čiže.

Grafički prikaz izdašnosti izvora, ulijevane vode i kišnih epizoda od rujna do kraja prosinca prikazan je u prilogu 1. Iako je u dosadašnjim prikazima za količinu vode korištena mjerna jedinica m^3/s, u prilogu i na prikazima koji slijede koristit će se jedinica m^3/dan kako bi se lakše uspoređivali podaci o ulijevanom volumenu vode s obzirom da je gledajući sekunde ulijevanje bilo konstantnih 0,15 m^3/s. Radi jednostavnijeg prikaza, analiza će biti prikazana u više kraćih razdoblja.

Prva značajnija kiša količine 43 mm pala je deset dana prije početka ulijevanja vode u ponor, 3.9.1988. Iz grafa (*Slika 5.3.*) se može očitati da je do povećanja izdašnosti došlo već dan prije te kiše zabilježene na stanici Butoniga. Razlog tome ne može se točno utvrditi zbog manjka podataka, no može se pretpostaviti da su oborine na drugim dijelovima sliva razlog naglog povećanja izdašnosti na izvoru. Nakon toga vidljivo je, uz manje oscilacije, postepeno smanjenje izdašnosti do 15.9. kada postaje primjetan utjecaj ulijevanja vode u ponor Čiže koji je započeo dva dana ranije.



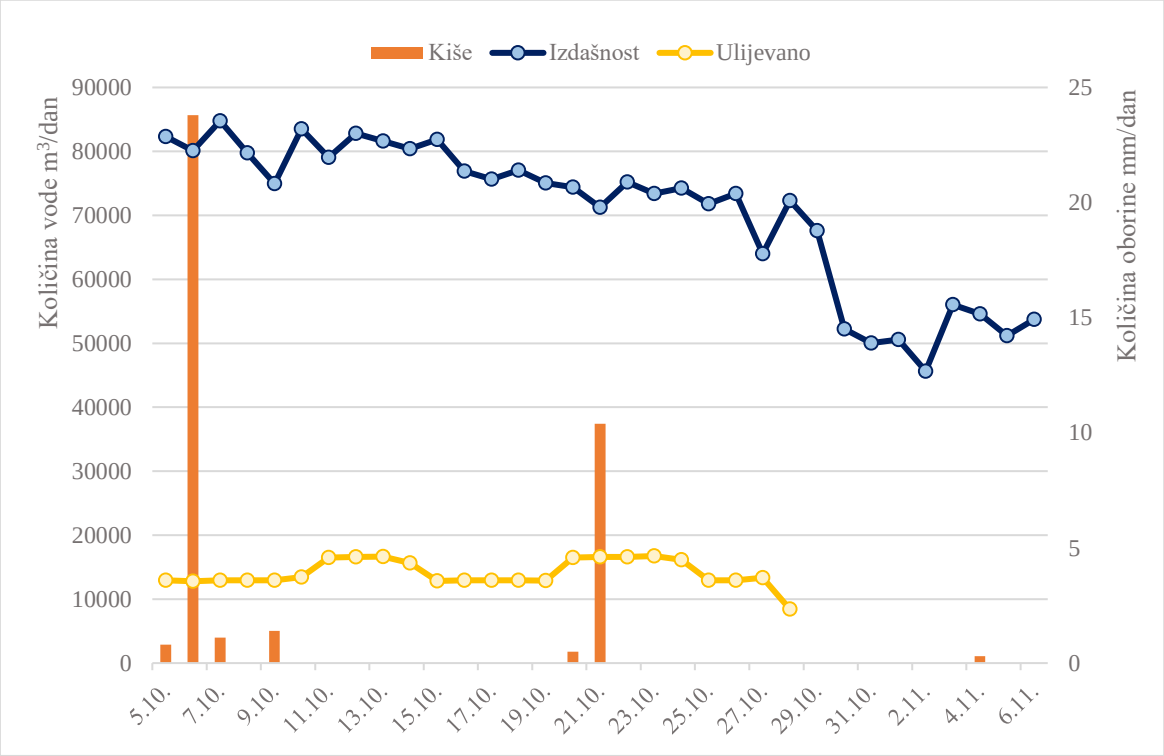
Slika 5.3. Prikaz izdašnosti izvora, ulijevane vode i kišnih epizoda od 1.9. do 4.10.

Sa ulijevanjem vode u ponor Čiže započeto je 13.9. u 15:20, te je u prva dva dana u ponor ubačeno 16 245 m^3 vode. Dan nakon ulijevanja zabilježena je još jedna intenzivnija kiša s količinom oborine od 22,2 mm te dvije manje kiše narednih dana, 15. i 16.9. Može se uočiti dosta brza reakcija podzemlja na pristiglu vodu s obzirom da je do povećanja izdašnosti došlo relativno brzo, već nakon dva dana.

Nakon naglog povećanja izdašnosti, količina vode na izvoru Gradole se postepeno smanjuje. Razlog smanjenoj izdašnosti koja je zabilježena 21.9. možemo, no ne sa sigurnošću, naći u prekidanom i slabijem ulijevanju vode 19.9. koje je iznosilo svega 10 440 m^3. Nakon 19.9. količina ulijevane vode u ponor Čiže raste i od 22. do 30.9. održava se na konstantnih 12960 m^3/dan i to ulijevanjem vode konstantnom brzinom kroz cijeli dan. S obzirom na konstantno

ulijevanje do kraja mjeseca, razlog za nagle oscilacije 28. i 29.9. ne može se utvrditi sa sigurnošću. Tu bi uvelike pomogli podaci o oborinama sa drugih dijelova sliva Gradole.

Početkom listopada (*Slika 5.4.*) količina ulijevane vode u ponor Čiže većinom je iznosila 12 960 m^3 na dan. Ulijevanje je i dalje bilo kontinuirano kroz cijeli dan no izdašnost izvora je bila u laganom porastu od 29.9. do 2.10. nakon čega je ustupio postepeni pad sve do 6.10. Zbog manjka podataka ne može se utvrditi točan razlog za oscilacije u ovom razdoblju, no jedna od mogućnosti su kiše na drugom dijelu sliva izvora Gradole koje su dotokom napunile podzemne akumulacije. Slaba kišna epizoda 5.10. praćena je većom kišom količine 23,8 mm 6.10.



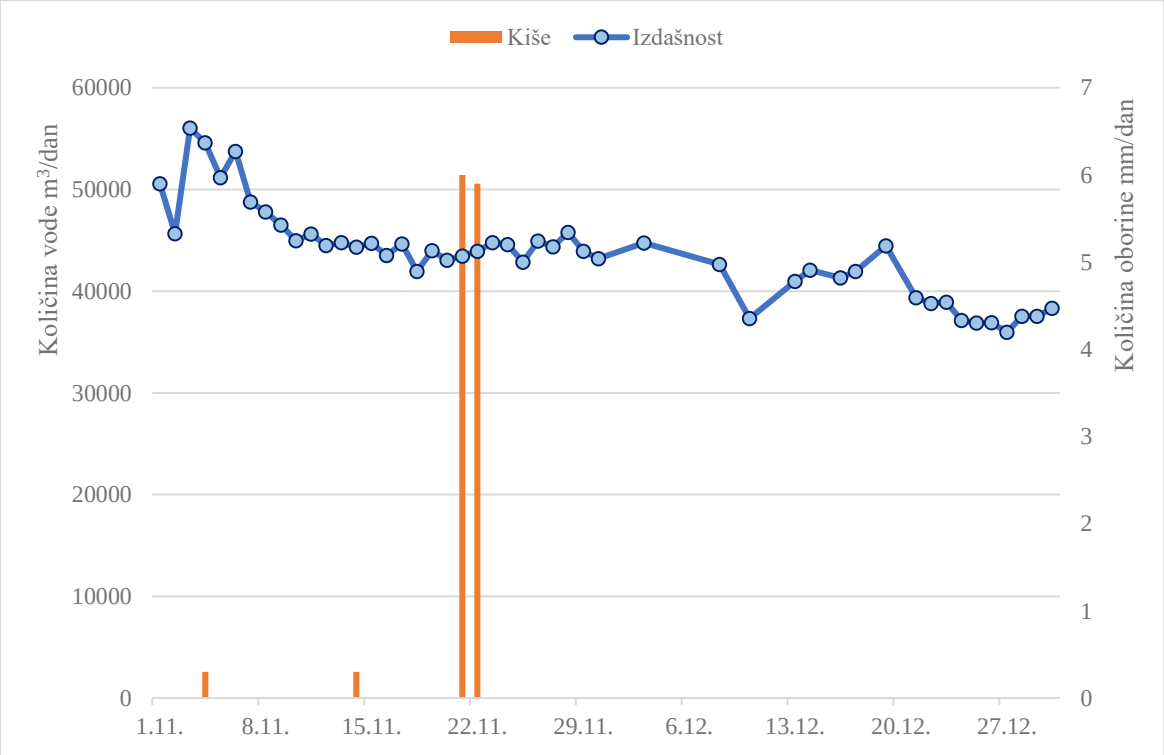
Slika 5.4. Prikaz izdašnosti izvora, ulijevane vode i kišnih epizoda od 5.10. do 7.11.

Dan nakon kiše, 6.10. dolazi do povećanja izdašnosti izvora što još jednom pokazuje brzo reagiranje podzemlja na pristiglu vodu. No isto tako vidljivo je i dosta brzo smanjenje u naredna dva dana. Dvije manje kiše od svega 1,1 mm i 1,4 mm zabilježene na stanici Butoniga, nisu imale velik utjecaj na izdašnost izvora.

Ponovo povećanje izdašnosti na 83518,6 m^3 na dan za vrijeme konstantne količine ulijevane vode 10.10., dovodi do pretpostavke o mogućim većim kišama koje su pale na drugim dijelovima sliva i koje su imale veći utjecaj na napajanje podzemnih akumulacija te na izdašnost izvora Gradole. Od 11. do 14.10. dolazi do povećanja količine ulijevane vode,

ulijeva se preko 16 000 m^3 na dan. U tom periodu oscilacija u izdašnosti izvora i dalje ima, no izdašnost se održavala iznad 80 000 m^3 na dan što je svakako bilo povoljno.

Nakon ovog razdoblja povećane izdašnosti ponovo se smanjuje količina ulijevane vode na 12 960 m^3 na dan, a s time dolazi i do postepenog smanjenja izdašnosti. Smanjenje izdašnosti zahtjeva ponovo povećanje količine ulijevane vode, stoga se 20.10. opet ulijeva preko 16 000 m^3 na dan. Povećanje količine ulijevanja praćeno je sa većom kišom što rezultira u brzoj pozitivnoj promjeni izdašnosti izvora. Nakon toga paralelno smanjenju količine ulijevane vode dolazi i do smanjenja izdašnosti 27.10. Zadnji dan ulijevanja, 28.10. izdašnost opet raste no nakon toga vidljivo je naglo smanjenje izdašnosti idućih dana. Prestankom ulijevanja, u kratkom roku došlo je do naglog smanjenja izdašnosti koja je u svom minimumu iznosila oko 45 000 m^3 na dan što je skoro upola manje od izdašnosti prije početka i za vrijeme ulijevanja. Pad u izdašnosti izvora trajao je pet dana nakon prestanka ulijevanja, 3.11. te je nakon toga nanovo uslijedio rast u količini vode na izvoru. Uzrok tog rasta iz dostupnih podataka ne možemo točno odrediti no nakon rasta, na prikazu (*Slika 5.5.)* je vidljivo kontinuirano opadanje uz sitne oscilacije vjerojatno zbog kišnih epizoda.



Slika 5.5. Prikaz izdašnosti izvora, ulijevane vode i kišnih epizoda od 1.11. do 31.12.

6. Zaključak

Cilj ovog rada bio je prikazati ideju i izvedivost umjetnog napajanja, pogotovo u krškim vodonosnicima. Prikazane su mogućnosti, ciljevi, svrhe i problematika koju sa sobom umjetno napajanje vodonosnika nosi. Uzevši sve to u obzir može se sa sigurnošću reći da ono pruža novi pogled u sigurniju i kvalitetniju eksploataciju vodenih resursa.

Uz pravilnu karakterizaciju vodonosnika te uz danas dostupne metode i alate moguće je vrlo precizno odrediti pogodnost vodonosnika i same lokacije za izvršenje umjetnog napajanja. Tako je i analizirano umjetno napajanje vodonosnika izvora Gradole 1988. godine dalo pozitivne rezultate iako je napajanje izvedeno izravnim ulijevanjem u ponor, na način drukčiji od onog koje se danas sa novim saznanjima i iskustvima preporuča. Iz dobivenih rezultata uočljiva je iznimno brza reakcija vodonosnika na vodu ulijevanu u ponor, ali i brze reakcije na pale oborine koje govore u prilog pristupu difuznog napajanja vodonosnika. Gledajući moguće promjene u kvaliteti vode može se zaključiti da izravno ulijevanje u ponor nije najbolja opcija u slučaju krškog vodonosnika s brzim tokovima podzemne vode. Velike varijacije u rezultatima upućuju još jednom na glavnu problematiku, tešku karakterizaciju i definiranje krških vodonosnika. Ukoliko bi *ARAK* metodu (*Poglavlje 2.3.*) primijenili na istraživano područje sliva, lokacija odabrana za umjetno napajanje tom metodom i provedeno testno umjetno napajanje na ponoru Čiže, vjerojatno bi se razlikovali.

Sve u svemu, umjetno napajanje 1988. godine bilo je uspješno. Izgradnjom vodoopskrbnog sustava potrebe za njim u ovom području više nema, no svakako ne bi bilo na odmet istraživati i skupljati nova saznanja za krška područja jer je za očekivati da će se s obzirom na brojne mogućnosti umjetno napajanje vodonosnika u budućnosti sve češće koristiti.

7. Literatura

ANONIMNO, 1951. – 1964., Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000 List Trst L 33 – 88. Ljubljana: Institut za geološka istraživanja Zagreb.

BAKALOWICZ, M., 2004. The epikarst, the skin of karst. U: Jones, W.K., Culver, D.C., Herman, J.S., The epikarst conference. Karst water institute special publication n 9. The karst water institute, Sheperdstown, str. 16-22.

BAKALOWICZ, M., 2005. Karst groudwater: a challenge for new resources. Hydrogeology Journal 13(1), str. 48-160.

DAHER, W., PISTRE, S., KNEPPERS, A., BAKALOWICZ, M., NAJEM, W., 2011. Karst and artificial recharge: Theoretical and practical problems; a preliminary approach to artificial recharge assessment. Journal of Hydrology, 408, str. 189-202

DETAY, M., 1997. La gestion active des aquifèrs. Masson, Paris. str. 416

FLEURY, P., BAKALOWICZ, M., DE MARSILY, G., 2007. Submarine springs and coastal karst awuifers: a review. Journal of Hidrology, 339, str. 79-92.

FORD, D.C., WILLIAMS, P.W., 2007. Karst hydrogeology and geomorphology. Wiley, London, str. 576.

GALE, I., DILLON, P., 2005. Strategies for managed aquifer recharge (MAR) in Semi-arid areas. UNESCO-IHP, Paris.

KAVOURI, K., PLAGNES, V., DÖRFLIGER, N., TRÉMOULET, J., REJIBA, F., MARCHET, P., 2011. Karst resource and source intrinsic groundwater vulnerability mapping, as basis to desineate protection areas of capture works: Application of the PaPRIKA method on th Ouysse karst sistem (SW France), Hydrogeology Journal, 19, str. 229-353.

Institut Ruđer Bošković, 1989. Praćenje dinamike toka podzemne vode od ponora Čiže do izvora V. Gradole, prilikom kontinuiranog ulijevanja vode iz akumulacije Butoniga u ponor Čiže. Zagreb.

Institut Ruđer Bošković, 1988. Utvrđivanje podzemne veze između ponora Čiže i izvora Gradole. Zagreb.

PARLOV, J., 2010. Identifikacija parametara za modeliranje toka podzemne vode glavnih izvora u porječju Mirne. Disertacija. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet. str. 112.

PERRIN, J., JEANNIN, P.Y., ZWAHLEN, F., 2003. Epikarst storage in a karst aquifer: a conceptual model based on isotopic idea; Milaandre test site, Switzerland. Journal od hidrology, 279, str. 106-124.

POLLAK, Z., 1997. Umjetno napajanje vodonosnika. Hrvatske vode, 5(1997)21, str. 319-337.

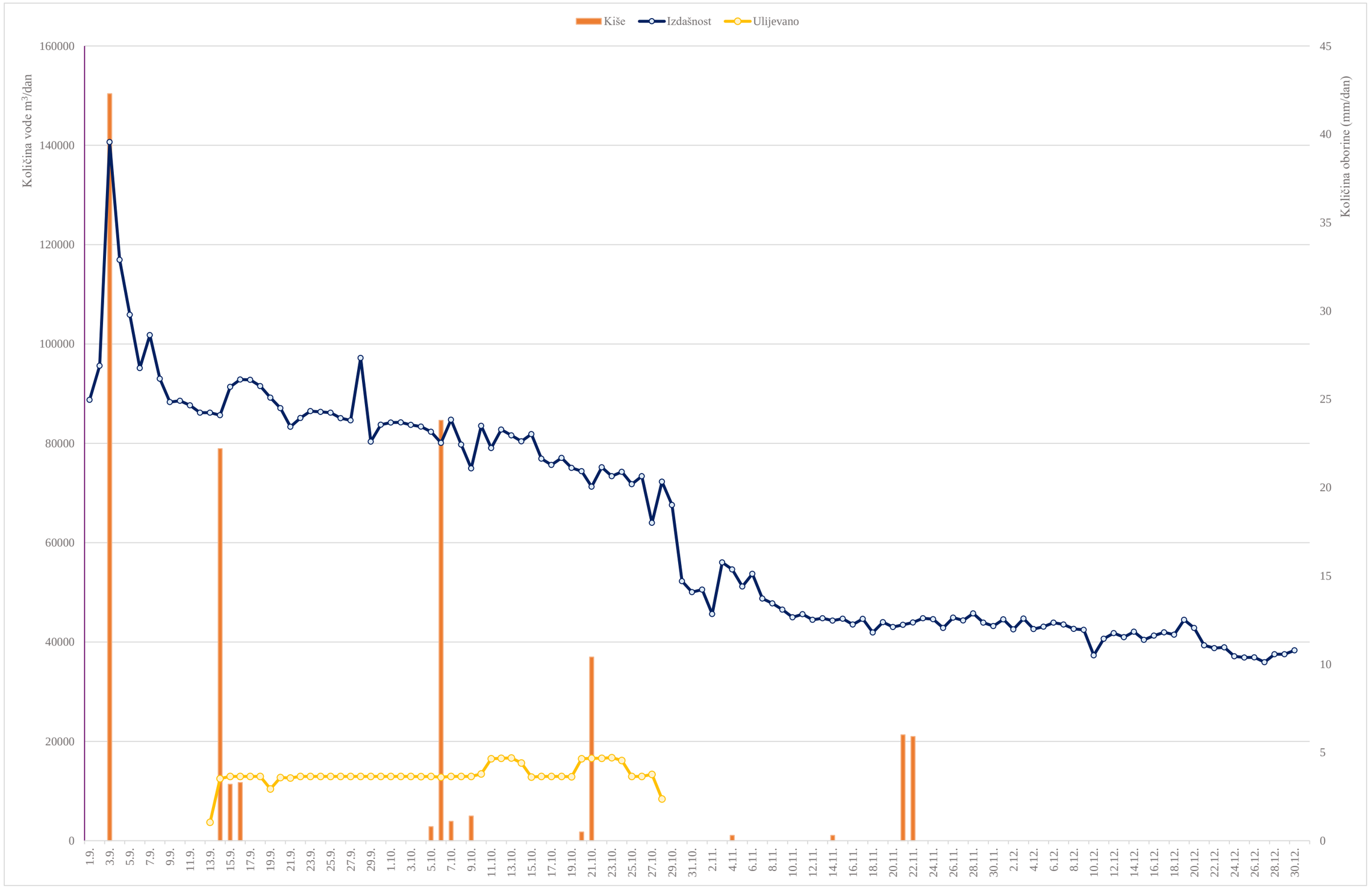
POLŠAK, A. & ŠIKIĆ, D., 1973. Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000 Tumač za list RovinjL 33 – 100. Beograd: Savezni geološki zavod.

POLŠAK, A. & ŠIKIĆ, D.,1969. Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, list Rovinj L 33 – 100. Beograd: Savezni geološki zavod.

POSAVEC, K., PARLOV, J. NAKIĆ, Z., 2010. Fully Automated Objective-Based Method for Master Recession Curve Separation, Ground Water. 48(4). str. 598-603.

World Heath Organization (WHO), 2004. Guidelines for Drinking Water Quality, third ed. WHO,Geneva.
https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:31998L0083&from=EN (15.08.2018.)

Prilog 1. Prikaz izdašnosti izvora (m^3/dan), uz količinu ulijevane vode u ponor (m^3/dan) te kiše u promatranom razdoblju (mm/dan)



Prilog 2a.: Prikaz rezultata analize vode iz akumulacije Butoniga (na dubini od 4m)

Datum	Temperatura vode °C	Temperatura zraka °C	Miris	Mutnoća NTU	pH	Potrošak $KMnO_4$ mg/l	NH_4^+ mg N/l	NO_2^- mg N/l	NO_3^- mg N/l	Cl^- mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	O-fosfati mg P/l	O_2 mg/l	SO_4^{2-} mg/l	Fenoli µg/l	Anionski detergenti
14.9.	21.6	22.8		5.3	7.87	16.1	0.073	0.002	<0.01	11.0	<0.01	0.001	<0.001	5.98	6.42	11.4	0.169
15.9.	21.7	17.0		2.4	7.83	17.3	0.146	<0.001		11.0	0.03	<0.001		5.25	6.42	12.2	0.147
16.9.	21.5	18.0		1.9	8.00	15.5	0.124			12.0		0.005		6.92	7.70		0.094
19.9.	20.2	21.0		2.2	7.86	14.8	0.102	0.002	0.09	11.0	0.1	0.004		7.14	7.06		0.112
20.9.	20.2	18.0		2.3	7.88	14.1	0.120	0.001		11.0	0.05	0.006		6.82	17.30	0.2	0.089
21.9.	20.0	11.7		1.7	7.94	13.7	0.135	0.003		11.0		0.002		5.88	6.42		0.026
22.9.	20.2	19.0		2.1	7.93	13.8	0.121			11.0		0.003		6.72	6.42	1.9	0.012
23.9.	19.7	21.5		2.0	7.86	14.2	0.059	0.001		11.0	0.05	0.008		4.62	6.42		0.057
26.9.	20.0	24.0		1.5	7.83	12.0	0.176			11.0		0.002		4.41	10.90	0.4	0.067
27.9.	20.0	22.0		1.5	7.78	12.7	0.099	0.001		11.0		0.001	0.008	3.47	12.82	0.9	0.134
28.9.	19.4	19.2		1.5	7.87	13.3	0.388	0.002		11.0				1.68	7.06		0.076
29.9.	20.0	21.5		1.2	7.85	14.1	0.216			11.0				5.38	5.76		0.150
30.9.	20.0	16.0		1.6	7.80	13.0	0.117	0.001		11.0		0.003		4.98	19.22	0.6	0.211
3.10.	19.5	20.0	+	1.4	7.78	12.5	0.146			12.0	0.04	0.003		4.48	22.42	0.8	0.029
4.10.	19.5	17.0		2.0	7.77	14.3	0.183			11.0		0.003	0.002	4.58	26.90	4.0	0.092
5.10.	19.0	14.4		2.3	7.81	15.0	0.200	0.001		11.0		0.003		9.16	23.06		0.026
6.10.	19.0	16.7		2.9	7.87	15.8	0.051	0.001		12.0		0.003		10.56	23.70	1.0	0.081
7.10.	19.0	17.0		2.0	7.99	15.4	0.044			11.0	0.01	0.001		6.67	24.34		0.035
10.10.	18.5	17.5		4.9	7.98	18.1	0.143	0.001		11.0	0.01	0.005		14.24	24.34		
11.10.	18.0	20.7		3.0	7.89	13.8	0.165	0.002		12.0	0.04	0.001		11.45	24.45		0.171
12.10.	18.0	19.1		1.9	7.95	12.4	0.147	0.001		11.0		0.002		11.65	24.98		0.062
13.10.	18.5	21.5		2.1	7.90	13.5	0.158	0.001		11.0		0.001		9.16	25.62		0.098
14.10.	18.0	15.5		1.7	7.92	12.2	0.132	0.003		14.0	0.03	0.001		7.03	24.98		0.257
17.10.	18.0	20.0		2.4	7.83	14.7	0.136	0.006		11.0	0.01	0.004	0.002	6.93	23.06	0.2	0.067
18.10.	18.0	17.0		1.4	7.81	15.8	2.143	0.001		11.0	0.02			7.52	23.34	4.1	0.067
19.10.	18.5	19.5		1.4	7.81	13.2	0.077			10.0	0.03	0.001		8.30	23.06	1.7	0.051
20.10.	18.5	18.9		1.2	7.84	11.4	0.158			11.0		0.001	0.048	7.42	23.06		0.073
21.10.	18.0	14.2		1.3	7.84	13.4	0.117			11.0		0.001	0.005	8.30	24.34	1.9	0.045
24.10.	17.5	14.7		2.2	7.97	10.3	0.227	0.002		11.0		0.001		11.61	23.70	1.3	0.058
25.10.	17.0	15.1		2.5	8.01	14.2	0.106	0.002		10.0		0.002		13.86	23.06	5.4	0.075
26.10.	17.0	10.0		1.5	8.00	12.3	0.143	0.002		11.0	0.007	0.002		14.84	28.18	4.9	0.100
27.10.	16.5	15.9		1.6	8.03	15.2	0.062	0.002		11.0		0.003	0.006	13.66	25.62	3.9	0.039

Prilog 2b. Prikaz rezultata analize vode ulijevane u ponor Čiže

Datum	Temperatura vode °C	Temperatura zraka °C	Miris	Mutnoća NTU	pH	Potrošak $KMnO_4$ mg/l	NH_4^+ mg N/l	NO_2^- mg N/l	NO_3^- mg N/l	Cl^- mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	O-fosfati mg P/l	O_2 mg/l	SO_4^{2-} mg/l	Fenoli µg /l	Anionski detergenti
14.9.1988	20.2	21.0	jak	14.0	7.96	14.8	0.297	0.005	<0.00	10.0	0.11	0.007	0.012	3.88	8.98	0.1	0.116
15.9.1988	20.5	12.5	slab	3.0	8.18	15.8	0.396	<0.001		11.0	0.03	<0.001	<0.001	2.73	8.34	1.9	0.110
16.9.1988	21.2	18.0		2.0	7.99	13.7	0.172			11.0	0.06	0.009		6.82	8.34	3.3	0.052
19.9.1988	21.3	17.0		1.5	7.94	13.9	0.150			11.0	0.11	0.003		7.03	10.90	0.9	0.030
20.9.1988	20.1	17.0	slab	1.6	7.94	15.4	0.187			11.0	0.03	0.001		7.24	10.90	<0.1	0.014
21.9.1988	19.5	11.5		1.6	7.98	17.2	0.095	0.002		11.0	<0.01	0.001		6.62	7.70		0.030
22.9.1988	12.5	21.0	slab	1.7	7.94	12.5	0.150			11.0		0.003		6.82	5.78	1	0.022
23.9.1988	21.2	22.0	slab	1.4	7.95	13.9	0.132			12.0	0.06	0.001	0.004	6.93	7.06	0.9	0.028
26.9.1988	21.0	25.0	slab	1.2	7.94	12.6	0.158	0.001		11.0		0.001		6.82	6.42		0.022
27.9.1988	21.0	24.2	slab	1.0	8.06	12.2	0.092	0.001		12.0		0.003	0.001	6.93	6.42	1.4	0.025
28.9.1988	21.0	21.5	slab	1.0	8.11	13.3	0.264	0.002		10.5		0.002		6.93	6.42	0.7	0.116
29.9.1988	21.0	23.0	slab	1.0	8.04	15.1	0.154			12.0				14.44	18.58		0.096
30.9.1988	21.5	22.0	slab	1.2	8.04	13.9	0.344			11.0				14.54	23.70	1.6	0.106
3.10.1988	21.0	18.0	slab	1.0	7.92	14.1	0.117			11.0				9.96	25.62		0.096
4.10.1988	21.0	14.5	slab	1.3	7.89	13.0	0.143			11.0		0.001		14.44	25.62		0.171
5.10.1988	21.5	15.0	slab	1.2	8.00	13.8	0.073	0.001		11.0		0.001		14.54	23.70		0.013
6.10.1988	21.2	16.6	slab	1.4	7.99	14.2	0.044	0.002		11.0				9.96	24.34	0.2	0.144
7.10.1988	20.0	17.0	slab	1.8	8.03	17.0	0.172	0.002		12.0		0.001		5.98	23.70		0.055
10.10.1988	20.0	18.0	slab	5.1	8.01	14.8	0.147	0.002		11.0		0.002		13.94	24.34		
11.10.1988	19.5	21.0	slab	1.6	7.93	15.7	0.223	0.004		10.5	0.02			13.54	24.34		0.124
12.10.1988	20.0	14.0	slab	1.4	7.95	11.8	0.073	0.005		10.0	0.02	0.002		13.54	25.62		0.079
13.10.1988	20.2	21.5	slab	1.4	8.02	12.9	0.147	0.008		10.0				14.14	29.46		0.016
14.10.1988	19.5	19.0	slab	1.3	7.96	11.3	1.172	0.009		12.5	0.06	0.001		9.08	26.26		0.038
17.10.1988	20.0	18.0	slab	1.0	7.93	16.7	0.183	0.019		10.0	0.05	0.002		12.98	24.34		0.078
18.10.1988	19.5	17.0	slab	0.9	7.94	13.5	0.176	0.023		10.0	0.03	0.001	0.005	13.18	30.74	4.1	0.023
19.10.1988	19.5	17.5	slab	0.9	7.94	11.9	0.136	0.02		11.0				13.27	23.70		0.045
20.10.1988	19.5	18.0	slab	1.0	8.02	9.8	0.150	0.016		10.0	0.01			12.98	23.06		0.077
21.10.1988	19.2	12.1	slab	1.2	8.16	15.3	0.201	0.015		11.0	0.04		0.028	15.52	24.98	2.3	0.012
24.10.1988	19.0	16.0	slab	1.0	7.96	11.6	0.168	0.018		10.0		0.001		13.86	24.34		0.119
25.10.1988	18.5	14.6	slab	1.3	7.98	11.9	0.077	0.029		10.0				13.66	24.34		0.020
26.10.1988	18.0	12.0	slab	1.0	7.96	7.0	0.099	0.024		10.0	0.03	0.001		13.86	26.26	0.6	0.059
27.10.1988	15.9	8.5	slab	1.0	8.00	14.2	0.040	0.023		11.0				14.25	25.65	3.9	0.032

Prilog 2c. Prikaz rezultata analize vode sa izvora Gradole

Datum	Temperatura vode °C	Temperatura zraka °C	Miris	Mutnoća	pH	Potrošak $KMnO_4$ mg/l	NH_4^+ mg N/l	NO_2^- mg N/l	NO_3^- mg N/l	Cl^- mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	O-fosfati mg P/l	O_2 mg/l	SO_4^{2-} mg/l	Fenoli µg /l	Anionski detergenti
14.9.1988	15.2	8.0		1.5	7.34	2.8	0.040	<0.001		13	<0.01	0.003	0.016	10.08	5.78	<0.01	0.244
15.9.1988	14.6	14.0		1.5	7.37	3.2	0.059	<0.001		13	<0.01	<0.001	<0.001	3.78	6.42	<0.01	0.036
16.9.1988	16.0	19.0		1.5	7.36	3.5	0.033	<0.001	2.92	14	<0.01	0.007	0.016	9.14	12.18	<0.01	0.048
19.9.1988	15.2	22.0		1.4	7.33	3.2	0.000										
20.9.1988	15.2	22.0		1.4	7.30	3.8	0.026	<0.001	3.40	13	0.03	0.002	0.017	9.66	12.82	<0.01	0.017
21.9.1988	14.0	9.0		0.9	7.43	3.2	0.048	<0.001	3.56	14	<0.01	<0.001	0.002	8.72	8.34	<0.01	0.038
22.9.1988	15.5	18.0		2.2	7.32	7.7	0.026	<0.001	3.32	14	0.02	0.003	0.018	9.34	3.86	<0.01	0.009
23.9.1988	15.0	21.0		1.6	7.32	4.1	<0.001	<0.001	3.28	14	0.02	0.005	0.018	9.76	12.82	<0.01	0.01
26.9.1988	15.2	24.0		1.4	7.33	2.2	0.011	<0.001	3.12	14	<0.01	0.001	0.003	9.14	5.14	<0.01	0.04
27.9.1988	15.0	22.2		1.5	7.34	2.8	0.011	0.001	3.16	15	<0.01	0.002	0.015	10.08	4.50	<0.01	0.041
28.9.1988	13.0	13.0		1.0	7.42	3.5	<0.001	0.001	3.12	13	0.04	<0.001	0.019	8.72	10.90	<0.01	0.035
29.9.1988	13.0	22.5		1.4	7.44	4.4	0.048	<0.001	3.16	14	<0.01	<0.001	0.004	20.52	5.14	<0.01	0.083
30.9.1988	13.0	14.5		1.4	7.33	2.8	<0.001	0.004	3.08	13	<0.01	<0.001	<0.001	19.52	19.86	<0.01	0.045
3.10.1988	14.9	21.2		1.3	7.35	2.9	0.073		3.28	13		0.002	0.018	18.62	19.86		0.028
4.10.1988	14.9	16.0		1.5	7.38	2.9	0.026		3.32	13			0.014	20.62	19.22	1.3	0.009
5.10.1988	14.1	12.5		1.2	7.29	3.5	0.033		3.08	13			0.012	17.43	18.58		0.004
6.10.1988	14.8	16.1		1.4	7.36	3.5			3.14	13			0.015	20.62	18.58		0.144
7.10.1988	14.8	19.0		1.4	7.35	6.0		0.001	3.12	12	0.02		0.008	19.62	23.06		0.025
10.10.1988	14.9	18.9		1.5	7.34	4.8	0.018		3.12	12		0.002	0.008	17.93	20.50		
11.10.1988	15.0	21.0		1.3	7.34	2.8	0.011		3.42	13		0.001		19.12	21.14		0.097
12.10.1988	14.0	11.0		1.1	7.32	2.8			3.32	13	0.01	0.001	0.012	18.62	20.50		0.032
13.10.1988	14.9	20.0		1.5	7.34	2.8	0.026		3.08	13			0.010	16.43	23.06		0.009
14.10.1988	14.5	15.5		1.2	7.32	2.5	0.015		3.28	13		0.001	0.015	9.86	17.94		0.112
17.10.1988	14.9	18.0		1.2	7.36	6.2		0.001	3.24	13		0.001	0.009	19.13	19.22		0.049
18.10.1988	14.9	17.8		1.1	7.32	3.3	0.011		3.28	13	0.03		0.011	15.62	19.22	0.2	0.019
19.10.1988	14.5	15.1		1.2	7.34	4.3			3.12	14	0.02	0.001	0.008	18.06	18.58		0.041
20.10.1988	15.2	16.9		1.4	7.31	2.3	0.044		3.04	14	0.02		0.008	18.15	19.22		0.020
21.10.1988	14.8	14.1		1.0	7.31	4.4	0.037		3.12	13			0.038	18.15	19.22		0.039
24.10.1988	14.0	15.0		1.2	7.37	3.2	0.062	0.001	3.00	13			0.008	19.03	19.86		0.019
25.10.1988	14.0	15.9		1.4	7.35	3.9	0.077		3.24	13			0.021	18.74	19.86		0.040
26.10.1988	13.0	9.0		1.4	7.36	2.5	0.059	0.001	3.12	13		0.001	0.012	18.25	21.14	0.3	0.029
27.10.1988	13.0	9.0		1.3	7.39	3.9	0.026		3.08	13				18.54	23.06		0.032
31.10.1988	14.0	8.0		1.4	7.38	4.1	0.044	0.001	3.02	14		0.001	0.004	9.86	24.34		0.052
1.11.1988	13.0	8.5		1.3	7.38	2.9	0.099		3.04	13			0.042	12.3	21.78	0.6	0.065
2.11.1988	13.0	2.5		1.4	7.33	3.2	0.037		2.92	13			0.012	18.84	23.06		0.031

3.11.1988	13.3	8.3		1.6	7.36	5.2	0.029		3.12	13	0.02		0.017	18.45	22.42		0.045
4.11.1988	13.8	2.0		1.6	7.35	5.8	0.022		2.78	13		0.001	0.016	9.66	27.54	0.6	0.038
7.11.1988	14.5	3.0		1.6	7.38	5.1	0.037	0.001	2.98	13			0.009	9.56	20.50		0.029
8.11.1988	14.2	1.8		1.4	7.37	3.7	0.026	0.002	2.76	13		0.001	0.015	8.39	23.60		0.023
9.11.1988	13.8	2.0		1.6	7.45	4.7	0.018		2.88	13			0.002	19.91	23.06	0.9	0.036
10.11.1988	13.0	4.8		2.4	7.37	4.1			3.02	13			0.011	19.62	23.06		0.041
14.11.1988	13.8	8.2		1.7	7.45	4.1		0.002	3.88	13			0.019	8.26	24.34		0.045
15.11.1988	13.5	7.5		1.4	7.45	5.8	0.029	0.001	2.98	13			0.016	10.46	19.86		0.028
16.11.1988				1.7	7.35	5.8	0.048	0.001	2.92	13	0.03		0.014	17.28	23.06		0.039
17.11.1988				1.4	7.33	4.4			2.96	13			0.016	8.64	22.42		0.058
18.11.1988				1.3	7.36	6.0		0.002	2.98	13			0.010	7.68	21.14		0.07