

SLEDENJE PODZEMNIH VOD
V ZALEDJU IZVIRA RIŽANE

WATER TRACING IN THE RIŽANA SPRING GROUND
WATER BASIN

PRIMOŽ KRIVIC
MIHAEL BRICELJ
NIKO TRIŠIČ
MARTINA ZUPAN

Izvleček

UDK 556.34.04(497.12:282 Rižana)

Krivic P., Bricelj M., Trišić N., Zupan M.: Sledenje podzemnih vod v zaledju izvira Rižane (Slovenija, NW Jugoslavija)

Pripadnost ponikalnic pri Brezovici, Gračišču in Smokovski vali izviru Rižane je bila dokazana s sledilnimi poizkusi z uraninom, rodaminom, kalijevim kloridom in bakteriofagi. Navidezne hitrosti podzemne vode so odvisne od hidrološke situacije in smeri podzemskih tokov in se gibljejo od 11 do 520 m/h. Do sedaj ugotovljeno padavinsko zaledje izvira Rižane znaša 183 km².

Abstract

UDC 556.34.04(497.12:282 Rižana)

Krivic P., Bricelj M., Trišić N., Zupan M.: Water tracing in the Rižana spring ground water basin (Slovenia, NW Yugoslavia)

Tracing tests with uranine, rhodamine, potassium chloride and bacteriophages were done to prove the connections between Brezovica, Gračišče, Smokovska vala sinking streams and the Rižana spring. The estimated apparent velocities of ground-water vary between 11 and 520 m/h, depending upon the hydrological situation and the direction of flow. The present established catchment area of the Rižana spring amounts to 183 sq. km.

Naslov — Adress

PRIMOŽ KRIVIC
Geološki zavod Ljubljana
61000 Ljubljana, Parmova 33
Jugoslavija

MIHAEL BRICELJ
Inštitut za biologijo Univerze Edvarda Kardelja,
61000 Ljubljana, Aškerčeva 12
Jugoslavija

NIKO TRIŠIĆ
Hidrometeorološki zavod SR Slovenije
61000 Ljubljana, Vojkova 1 b
Jugoslavija

MARTINA ZUPAN
Hidrometeorološki zavod SR Slovenije
61000 Ljubljana, Vojkova 1 b
Jugoslavija

UVOD

Področje Slovenske Istre je zelo revno z vodnimi viri. Edini večji kraški izvir in najpomembnejši vodni vir v Slovenskem Primorju je izvir reke Rižane. Zato ni čudno, da so že pred 50 leti zajeli vodo tega izvira in zgradili vodovod za oskrbo obalnih mest Kopra, Izole in Pirana. Zaradi vse večjih potreb po zdravi pitni vodi se je pomen tega vodnega vira v zadnjem času še povečal. Za izkoriščanje statičnih zalog podtalnice je potrebno ugotoviti padavinsko zaledje in obseg podzemske akumulacije Rižane. Pospešena urbanizacija, industrijske odplake in tranzitni promet nevarnih snovi pa ogrožajo površinske in podzemne vode, tako v aluvijalnih, kot tudi v kraških vodonosnikih. Pri tem tudi izvir Rižane ni izjema, čeprav je lokalno razmeroma dobro zaščiten pod neprepustnimi flišnimi plastmi. Za določitev varstvenih pasov in območij z bolj ali manj strogo zaščito je torej potrebno točno poznavanje padavinskega zaledja, deleža posameznih prispevnih področij in časa zadrževanja vode v vodonosniku od potencialnega mesta onesnaženja do zajetja. Najprimernejša metoda za določitev teh parametrov je sledenje podzemnih vod. Tako smo z obarvanjem različnih ponikalnic z različnimi sledili, istočasno ali ob različnih hidroloških pogojih, pričeli s sistematičnim raziskovanjem padavinskega zaledja izvira Rižane.

PREGLED DOSEDANJIH RAZISKAV

Prvo barvanje v zaledju izvira Rižane je bilo opravljeno že v začetku tega stoletja, ko je Timeus obarval potok Brašnico pri Odolini s 50 kg uranina (G. Timeus, 1910). Obarvana voda se je po petih dneh pojavila v Rižani, ki je štiri dni tekla močno obarvana (G. Timeus, 1928). S tem je bila dokazana pripadnost potokov Matarskega podolja, ki s flišnega jugozahodnega dela Brkinov ponikajo na kontaktu s paleocenskimi in eocenskimi apnenci, povodju Rižane.

Kasnejša sledenja brkinskih ponikalnic (N. Čadež, 1963) niso dala rezultatov. Obarvane so bile Račiške ponikve, Perilo pri Obrovu (Jezerina) in ponovno Brašnica pri Odolini. Uporabljeno barvilo (40 kg uranina in obarvani trosi) pa ni bilo ugotovljeno v nobenem od številnih opazovanih izvirov od Kvarnerskega zaliva, hrvaškega dela Istre, Rižane, do Boljunca na italijanski strani meje pri Trstu.

Barvanje ponikalnice pri Slovenskem Gračišču z uraninom leta 1960 (ustni podatek P. Štefančiča) in ponovno barvanje leta 1961 (N. Čadež, Arhiv HMZ) s 7 kg uranina tudi nista dokazali zveze z nobenim od opazovanih izvirov (Rižana, Rakovec, Gaber, Mlini).

Zaradi številnih neuspešnih sledilnih poizkusov je postalo padavinsko zaledje izvira Rižane zelo vprašljivo. Zopet so se pojavila mnenja, da vode Ma-

tarskega podolja napajajo izvire Timava, kar so skušali dokazati tudi italijanski raziskovalci, in dvomi v rezultate, ki jih navaja Timeus (D'Ambrosi, 1952; Mosetti, 1966).

Tudi Gračiška, Smokovska, Lukinska in Sočerska vala s svojimi ponikalnicami naj bi pripadale povodju Mirne in ne Rižani (P. Habič in drugi, 1983). Tako bi bilo padavinsko zaledje izvira Rižane zelo majhno in vprašanje, odkod dobiva ta pomembni vodni vir toliko vode, popolnoma odprto, saj znaša njegov srednji letni pretok preko $4 \text{ m}^3/\text{s}$. Šele sledilni poizkusi, predstavljeni v tem poročilu, so potrdili rezultate prvega barvanja Brašnice pri Odolini (G. Timeus, 1910) in dokazali, da vsa zgoraj navedena področja vendarle pripadajo povodju Rižane.

Poleg omenjenih sledilnih poizkusov je bilo na obravnavanem področju opravljeno le še barvanje ponikalnice pri Velikih Ločah, ko je bila dokazana zveza s potokom v jami Dimnice pri Markovščini (I. Gams, 1966). Nadaljnja podzemski pot vode proti izviru Rižane ni bila ugotovljena, saj izvira Rižane pri tem barvanju niso opazovali, pa tudi uporabljena količina sledila je bila premajhna, da bi to zvezo lahko dokazali.

UPORABLJENE METODE SLEDENJA

Metode sledenja s fluorescenčnimi sledili in soljo so klasične, zato jih tu ne bomo posebej obravnavali. Predstavili bomo le metodo sledenja z bakteriofagi, ki je razmeroma nova in je bila v Jugoslaviji sedaj prvič uporabljena.

Bakteriofagi ali na kratko fagi, so bakterijski virusi, ki se lahko razmnožujejo le v bakterijskih celicah. Ker so sestavljeni le iz deoksiribonukleinske ali ribonukleinske kisline, ki je zavarovana s proteinskim ovojem, morajo inficirati bakterijsko celico, da se razmnože. Pri tem si podrede celotno bakterijsko celično strukturo za sintezo nukleinskih kislin in proteinov, za sestavo novih fagnih delcev.

V osnovi delimo bakteriofage v dve kategoriji: litične ali virulentne in temperirane ali lizogene bakteriofage. Za sledilne poskuse so predvsem pomembni virulentni bakteriofagi, ki na koncu svojega razmnoževalnega cikla bakterijsko celico razgrade ali lizirajo. Bakteriofagi so vrstno specifični, kar pomeni, da večinoma inficirajo le eno bakterijsko vrsto, oziroma celo bakterijski sev. Tako bakteriofagi ene bakterijske vrste ne lizirajo drugih bakterijskih vrst ali drugih organizmov, vključno s človekom. Izven bakterijske celice so bakteriofagi inertni organizmi, ki lahko prežive brez večjih škodljivih posledic daljše časovno obdobje v okolju. Ker so mnogo bolj obstojni na različne uničujoče faktorje v okolju kot bakterije, predstavljajo idealno sredstvo za sledenje tako površinskih kot podzemskih voda.

Pri planiranju uporabe bakteriofagov kot sledil moramo predvsem vedeti, kakšen bakteriofag, oziroma kakšno bakterijo bomo izbrali v določenem sledilnem poskusu. Če so določene vode fekalno onesnažene, potem lahko v njih zasledimo kolifage v večjih ali manjših količinah, poleg njihove gostiteljske bakterije *Escherichia coli*. V takem primeru fagno gostiteljski sistem kolifagi-*Escherichia coli* ni najbolj priporočljiv, ker prisotni kolifagi lahko motijo sle-

dilni poskus. V zadnjem času se zato uporabljajo bakteriofagi, ki inficirajo seve bakterije *Salmonella typhimurium*. Te bakteriofage zelo redko najdemo celo v vodah, ki so močno fekalno onesnažene. V našem poskusu smo se odločili za sistem divji sev *Salmonella typhimurium* LT2 in njen bakteriofag P22H5. Poleg tega, da ta bakteriofag tvori na prelivu gostiteljske bakterije dobro razločne čiste plake, ga lahko v kontroliranih laboratorijskih pogojih razmnožimo do dokaj velikih titrov potrebnih za sledilni poskus.

Bakteriofag P22H5 smo razmnoževali v 10-litrskih steklenicah s 5 l gojišča v termostatisirani vodni kopeli na 37° C tako, da smo gojišče stalno prepihovali s sterilnim zrakom in mu na vsake pol ure kontrolirali in popravljali pH vrednost do nevtralnosti. Za razmnoževalno gojišče smo uporabili Triptozni bujon, katerega izdeluje Imunološki zavod TORLAK iz Beograda. V gojišče smo najprej cepili gostiteljsko bakterijo *Salmonella typhimurium* LT2 (TL747) in njeni rasti sledili s fotometrom, tako da smo merili povečevanje motnosti kulture. Ko je kultura dosegla zgornjo fazo logaritemske rasti, smo dodali bakteriofag z multipliciteto infekcije 4, kar pomeni, da so lahko eno bakterijo inficirali štirje fagni delci. Po 120 minutnem nadaljnjem razmnoževanju smo preostale nerazgrajene bakterije razbili z dodatkom 50 ml kloroforma na liter gojitvenega medija. Na ta način smo dobili 10 litrov fagne juhe za sledilni poskus, ki je vsebovala 4×10^{14} fagnih delcev oziroma plak formirajočih enot (= pfe). Bakteriofage smo shranili do poskusa v hladilniku pri 4° C.

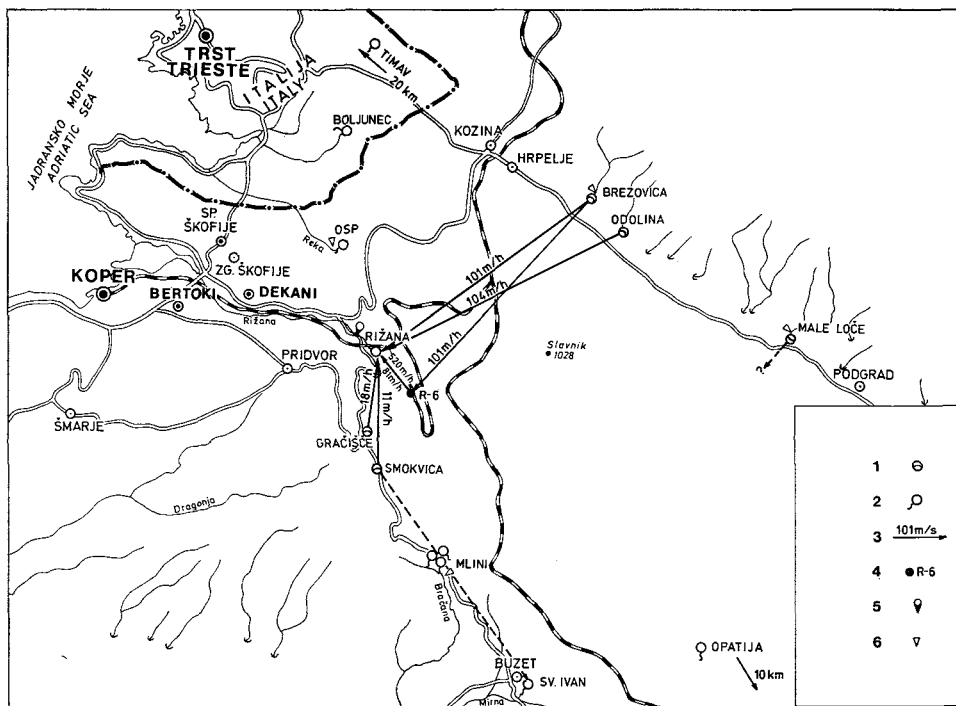
SLEDILNI POIZKUS

Z namenom, da se ugotovi vsaj del vodozbirnega zaledja izvira Rižane na področju Matarskega podolja, Gračišča in Smokvice, je bil izvršen kombiniran sledilni poizkus z istočasnim obarvanjem štirih ponikalnic s štirimi različnimi sledili. Izmed ponikalnic Matarskega podolja sta bili dne 10. 4. 1985 obarvani ponikalnici Ločica pri Brezovici in Male Loče. Južno od izvira Rižane pa sta bili obarvani ponikalnici pri Gračišču in Smokovski vali (slika 1).

V Brezovici smo uporabili 15 kg Na-fluoresceina (uranina), v Malih Ločah 3200 kg soli (KCl), v Gračišču 10 kg rodamina in v Smokovski vali 10 l bakteriofagov s titrom 4×10^{10} plak formirajočih enot/ml. Vzorčevanja so potekala od Kvarnerskega zaliva, hrvaškega dela Istre, Rižane, do izvirov ob Tržaškem zalivu v Italiji.

HIDROLOŠKE MERITVE

Zaledje kraških izvirov Rižane še ni točno definirano. Za vodomersko postajo Rižana-Kubed II smo po študiji »Hidrološki podatki za Rižano« (F. B i d o v e c — 1956) upoštevali površino povodja $F = 172.0 \text{ km}^2$. Postaja je ustanovljena leta 1955, limnigraf pa deluje od leta 1958. Potek vodnega vala Rižane smo določili po obdelavi limnigrama postaje, dnevnih kontrolnih opazovanjih ter pretočni krivulji, ki smo jo izdelali na podlagi hidrometričnih meritev v profilu vodomerske postaje Rižana-Kubed v letu 1985. Upoštevali smo tudi podatke Rižanskega vodovoda o dnevnih odvzemih vode, tako da prikazani vodni val



Sl. 1. Opazovalna mreža in rezultati sledilnega poizkusa v zaledju izvira Rižane.

- 1 — obarvani požiralnik,
- 2 — opazovani izvir,
- 3 — ugotovljena smer in navidezna hitrost podzemne vode,
- 4 — opazovana vrtina,
- 5 — vodomerna postaja z limnigrafom,
- 6 — vodomerni profil.

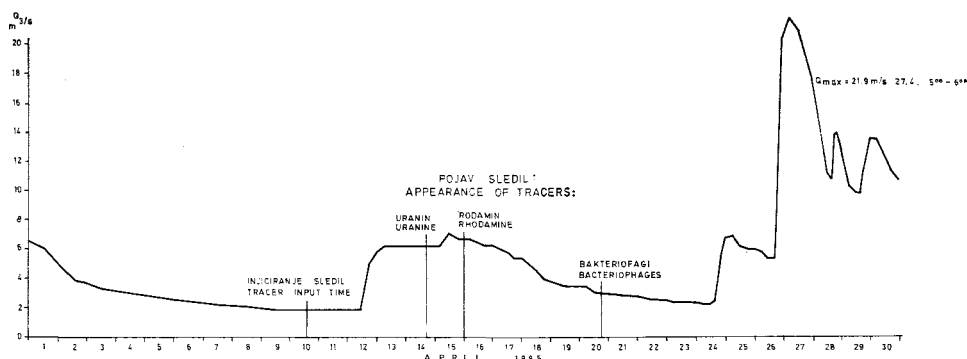
Fig. 1. Topographic map showing observation network of the Rižana catchment area and results of dye-tracing.

- 1 — swallet of traced sinking stream,
- 2 — dye-monitoring spring,
- 3 — direction and rate of ground water flow as determined by tracing,
- 4 — well sampled for tracers,
- 5 — river gauging station with autographic recorder,
- 6 — river gauging station.

(slika 2) zajema celotno količino vode izvirov Rižane do vodomerske postaje in sicer za mesec april 1985.

Na Ločici-Brezovica smo za opazovanje in meritev izbrali profil opuščene vodomerske postaje. Redna in izredna opazovanja vodostajev so se vršila od 1. 4. do 23. 6. 1985. Izdelana je bila pretočna krivulja za čas sledilnega poskusa, ki pa pri višjih vodostajih ni zanesljiva.

Na ponikalnici Velika voda — Male Loče smo za dnevna opazovanja vodostajev postavili vodomerni na kamniti podpornik na mostu. Vodostaj je bil opa-



Sl. 2. Hidrogram Rižane s celotnimi pretoki v času sledilnega poizkusa.

Fig. 2. Hydrograph of the Rižana river during tracer experiment.

zovan od 1. 4. do 26. 6. 1985. Pretoki so bili merjeni na istem mestu, vendar pretočna krivulja tudi na tem profilu pri višjih vodostajih ni zanesljiva zaradi zaježitve, ko je dotok vode večji od prepustnosti požiralnikov.

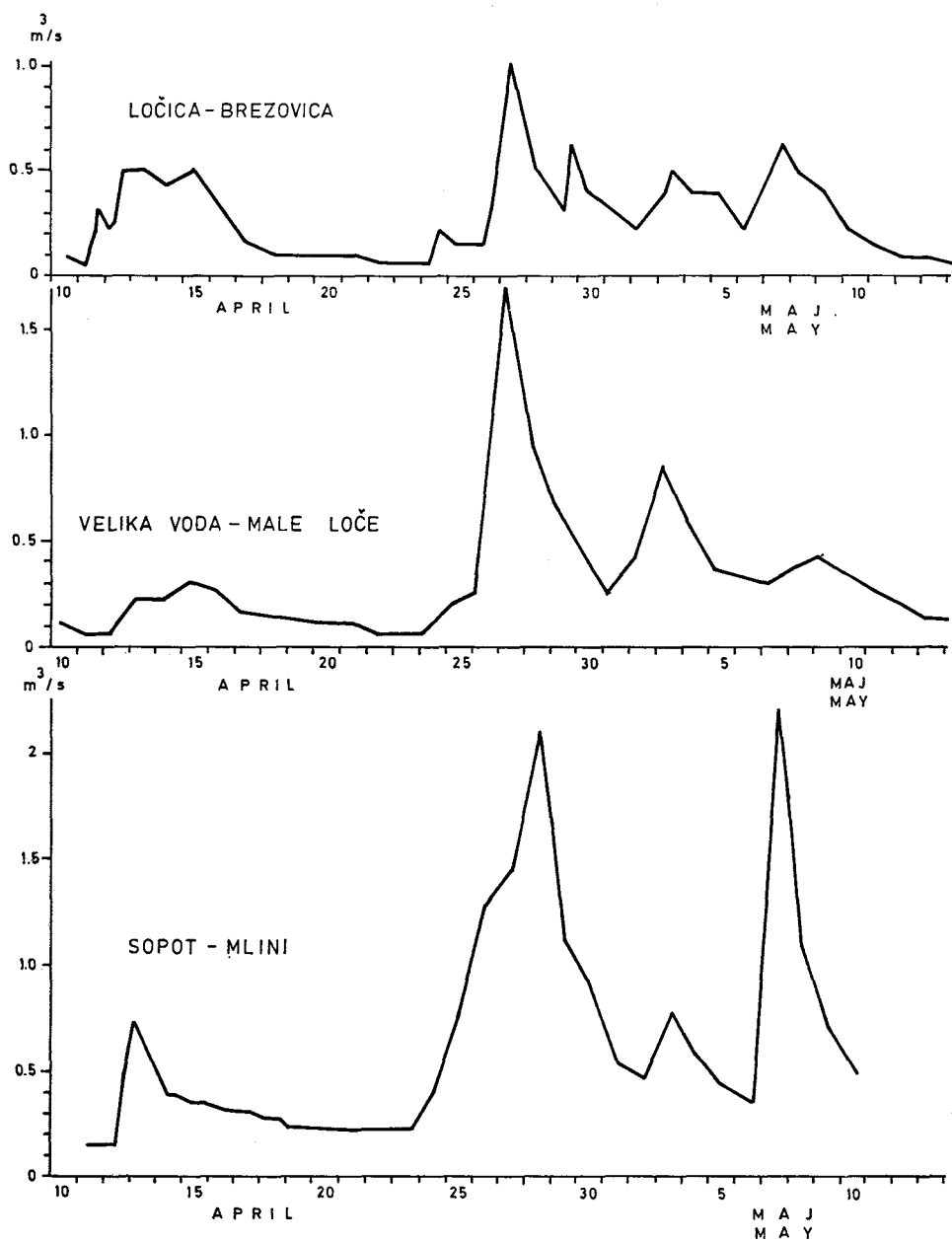
Pod vasjo Mlini smo postavili vodomero v regulirani strugi pritoka Bračane pod sotočjem Are, Sušca in Sopote. Opazovanja so se vršila hkrati z vzorčevanjem. Pretočna krivulja je zanesljiva pri vseh vodnih stanjih. Na sliki 3 podajamo pretoke voda na teh profilih v času sledenja.

Osapska reka izvira kot bruhalnik iz jame Grad nad Ospom, katerega pretoki imajo velika nihanja. Na profilu opuščene vodomerske postaje smo opravili le 2 hidrometrični meritvi, ker je bila struga običajno suha. Vzporedno z meritvami na naštetih profilih, smo za primerjavo izvedli 3 serije hidrometričnih meritev tudi na ostalih ponikalnicah na SW robu Brkinov. Na injiciranih mestih na Gračiškem polju in Smokovski vali smo majhne pretoke samo ocenjevali (sliki 1, 3).

INJICIRANJE SLEDIL

Potok Ločica priteka z bližnjih pobočij Brkinov. Že kmalu pod vasjo Brezovica se pretok Ločice zmanjšuje in ob suši ne doseže požiralnikov na jugu doline. Dne 10. 4. 1985 ob 13. uri smo injicirali 15 kg uranina »Kemika« zmešanega v 60 l vode, direktno v požiralnik približno 500 m pod mostom. Izlivanje je trajalo 3 minute, sledilo pa je odteklo v požiralnik v 30 minutah. Pretok vode v požiralnik je bil ocenjen na 5 l/s, na vodomerski postaji Brezovica pa je znašal 100 l/s. Injicirno mesto je na višini 510 m nadmorske višine.

Ponori v dolini Malih Loč so nanizani ob južnem robu doline na nadmorski višini 500 m. Ob manjših pretokih Velika voda ponikuje že v prvem ponoru, ob večjih pretokih pa preplavi vse ponore ob robu doline. V potok smo injicirali 3,2 t kalijeve soli (KCl). Da bi sledilo čim hitreje odteklo, smo dan poprej potok zaježili v mostnem profilu in s tem akumulirali približno 200 m³ vode. Sol smo injicirali 10. 4. med 11.30—11.40 v strugo pod zaježitev. Ob 11.40 smo



Sl. 3. Hidrografi ponikalnic in izvirov v času sledenja.
Fig. 3. Hydrographs of some sinking rivers and springs during tracer experiment.

pregrado podrli. Vodni val je 500 m oddaljene ponore dosegel ob 11.57 in je trajal do 12.30. Ob 12.40 je znašal pretok na vodomerski postaji 85 l/s. Ob injiciranju sledila je celotna količina vode poniknila že pri prvem požiralniku. Količina injicirane soli je bila majhna, vendar je zaradi pomanjkanja na tržišču ni bilo mogoče dobiti več. Injicirano količino soli nam je odstopila Tovarna dušika v Rušah.

Na ravnini melioriranega Gračiškega polja sta dva požiralnika, v katera se steka reguliran odtok voda s polja na nadmorski višini okoli 280 m. Ocenjen skupni pritok v oba požiralnika je bil na dan injiciranja 5–7 l/s. Zaradi boljšega spiranja sledila v ponor smo pred injiciranjem zaježili strugo severozahodnega dotoka. Zgradili smo odtok v zahodni požiralnik tako, da se je ob injiciranju sledila v južni požiralnik tudi vsa voda stekala tja. V južni požiralnik smo 10. 4. 1985 od 13. ure do 13.05 injicirali 10,3 kg fluoroscenčnega barvila rodamin FB (Braun Heitman) premešanega s 120 l vode. Spiranje posod je trajalo do 13.15. Ob injiciranju smo počasi odpirali jez, za katerim se je akumuliralo približno 1,5 m³ vode, da se je pretok v ponor povečal. Po končanem injiciranju smo jez popolnoma odpri in je voda odtekala 30 sekund s približnim pretokom 15 l/s ter izplaknila sledilo v ponor.

Injiciranje bakteriofagnega sledila je bilo izvedeno 10. 4. 1985 ob 13. uri v Smokovski vali v nadmorski višini 278 m. V petih sekundah smo v vodotok izlili 10 litrov fagne juhe s skupnim titrom 4×10^{14} plakformirajočih enot (= pfe). Pretok pred ponorom je znašal okrog 5 l/s.

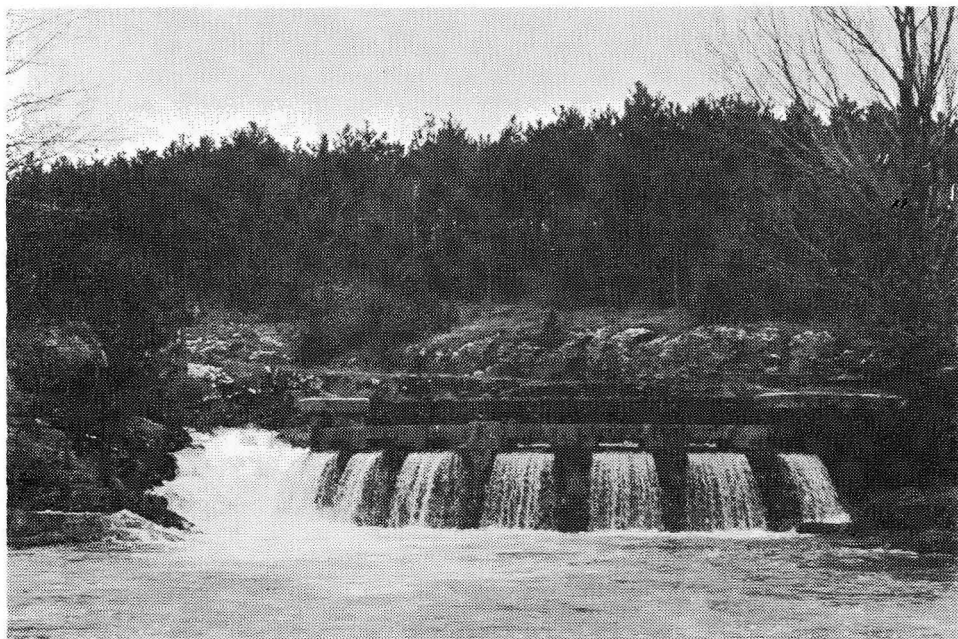
VZORČEVANJE

Na podlagi rezultatov geoloških in hidrogeoloških raziskav ter prejšnjih sledilnih poskusov je bilo izbranih dvanajst zajemnih mest. Najvažnejša lokacija za vzorčevanje je bila, z ozirom na cilj sledilnega poskusa, izvir Rižane oziroma črpališče Rižanskega vodovoda (slika 4). Vzorčevanje je tu potekalo najbolj intenzivno in sicer:

od 10. 4.—29. 4.	4 × dnevno
od 24. 4.—16. 5.	2 × dnevno
od 16. 5.—27. 5.	1 × dnevno

Po 11-dnevni prekinitvi smo od 7. 6. dalje do zaključka vzorčevanja 7. 8. 1985 vzorčevali vsak drugi dan. Na tem in vseh ostalih zajemnih mestih so bili pred injiciranjem vzeti slepi vzorci.

V 50 m globoki vrtini R-6 pri Srački babi je bilo vzorčevanje izvedeno s pomočjo elektroagregata in potopne črpalke z izdatnostjo 0,2 l/s. Da ne bi črpalka zajemala vode, ki v vodnjaku miruje, pač pa vedno svežo vodo, smo s krilom SOCOSOR izmerili hitrosti vode v naravnih pogojih pretoka, brez črpanja in tako določili cono največje hitrosti v globini 28,6 m (slika 5). Največja izmerjena hitrost je znašala 0,072 m/s, pretok v smeri navpično navzdol pa 3,2 l/s. Ker gre tu le za vertikalno komponento hitrosti, je naravni pretok



Sl. 4. Izvir Rižane, vodovodno zajetje zalito ob visoki vodi.

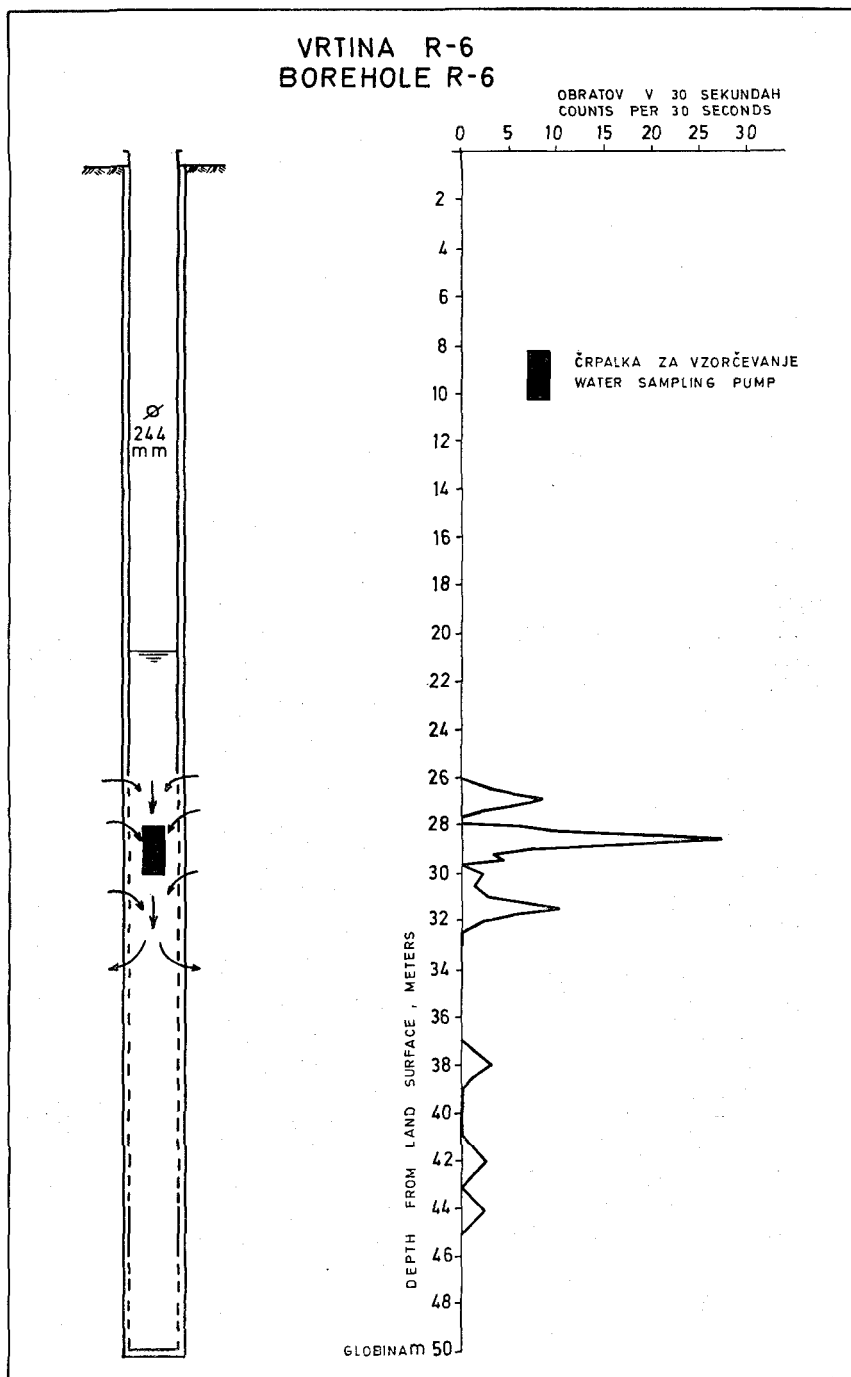
Fig. 4. Rižana spring, water intake for public supply flooded after several heavy rains.

v globini 28,6 m, kamor smo namestili črpalko za odvzem vzorcev, še precej večji. Tako smo iz vrtine R-6 dobili reprezentativne vzorce sledil, ki so potovala po vodonosniku proti izviru Rižane. Vzorčevanje na vrtini R-6, izviru Rakovec ter Gabrski potok je potekalo od 11. 4. do 26. 4. trikrat dnevno.

Na glavnem od izviru Timava pri Devinu (III. rokav) je vzorčevanje potekalo enkrat dnevno, od 13. 4. do 13. 5. 1985, v Boljuncu v Izviru pri pokriti pralnici pa dvakrat dnevno, od 11. 4. do 20. 5. 1985. Na Timavu je vzorčevanje organiziral dr. Gemiti s tržaškega vodovoda (firma ACEGA iz Trsta), na Boljuncu pa prof. Sancin (Jamarski odsek Slovenskega planinskega društva iz Doline pri Trstu). Obema se za pomoč najlepše zahvaljujemo.

Zahvaljujemo se tudi Istrskemu vodovodu iz Buzeta, kjer sta ing. Bratulić in ing. Sirotić organizirala vzorčevanje na izviru Sv. Ivan, dvakrat dnevno od 11. 4. do 16. 5. in nato enkrat dnevno vsak drugi dan do 23. 6. 85.

V Ospu smo jemali vzorce v profilu opuščene vodomerske postaje trikrat dnevno, vendar le v času delovanja bruhalnika, sicer pa je struga potoka suha. V izvirih Ara, Sopot in Sušec pri vasi Mlini smo jemali vzorce od 11. 4. do 11. 5. trikrat dnevno. Po prekinitvi, ki je trajala do 4. 6. 1985, smo vzorce do konca junija zajemali vsak drugi dan. Vzorce smo jemali tudi v močnem obmorskem izviru pod hotelom »Admiral« v Opatiji. Vzorčevanje je potekalo od 16. 4. do 11. 7. 1985 enkrat dnevno.



Sl. 5. Meritve vertikalnega pretoka vode v vodnjaku R-6 v naravnih pogojih brez črpanja.

Fig. 5. Impeller flowmeter log of a well R-6 showing direction and rate of natural ground water flow without pumping.

ANALIZE VZORCEV

V vseh vzorcih smo določali koncentracije fluorescenčnih barvil uranin in rodamin. Prav tako smo skoraj v vseh vzorcih določali K, medtem ko smo klorid analizirali le v nekaterih vzorcih kot dopolnitev analiz kalija. Fluorescenčna barvila smo določali na inštrumentu Perkin Elmer 204 z razliko ekscitacijske in emisijske valovne dolžine 25 nm ($\Delta \lambda = 25$ nm). Meja detekcije za uranin je 0,004 mg/m³, za rodamin pa 0,008 mg/m³. Kalij smo določali na plamenskem fotometru, klorid pa z metodo titracije s Hg (NO₃)₂. Meja detekcije za oba je 0,1 mg/l.

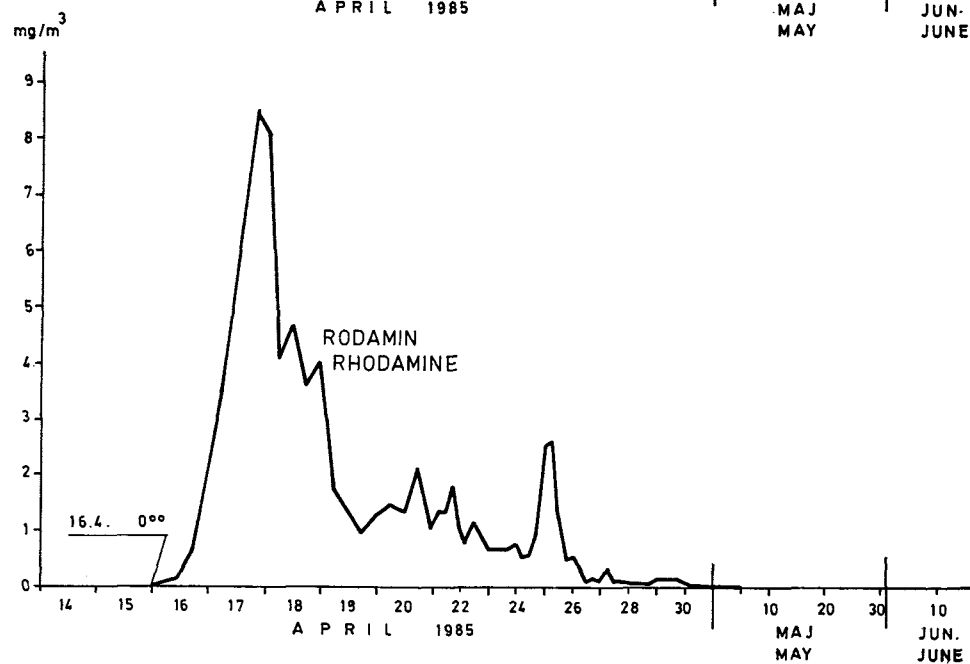
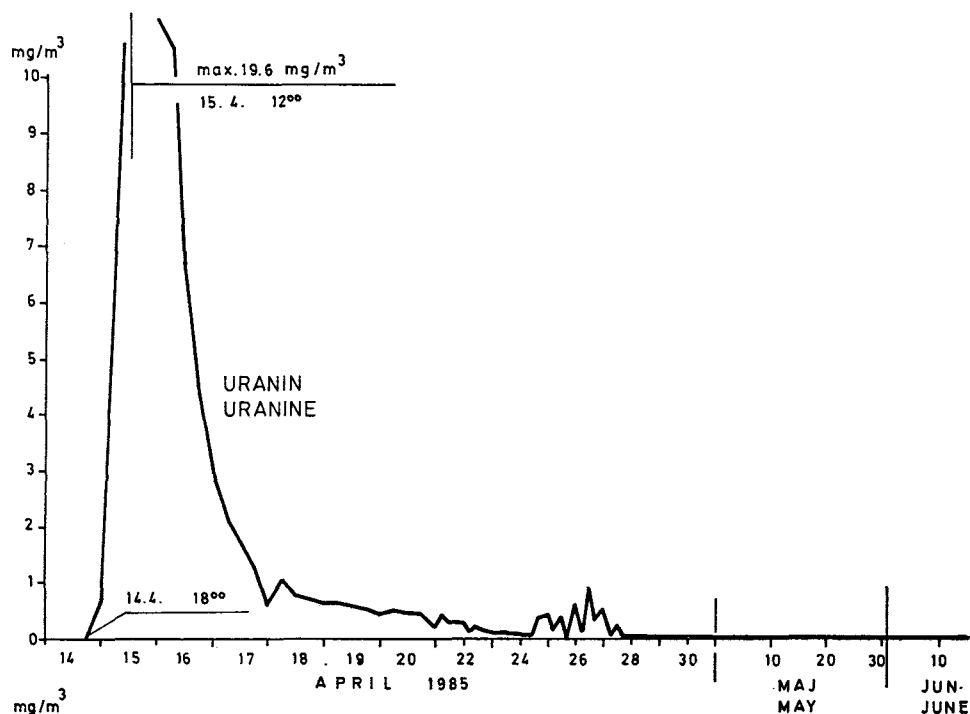
Količino bakteriofagov oziroma pfe (= plakformirajočih enot) smo določevali z dvema metodama. Metoda agarskega preliwa je osnova metoda za določevanje števila bakteriofagov v mililitru vzorca ali fagnega titra. V našem primeru smo vzeli 5×1 ml vzorca. Mililiter vzorca smo dodali v epruveto s tremi mililitri raztopljenega mehkega agarja (0,75% hranilni agar TORLAK) na temperaturi 46° C, dodali 0,2 mililitra gostiteljske bakterije v logaritemski fazi rasti, na hitro dobro premešali med dlanmi in razlili preko trdnega agarskega gojišča (1,5% hranilni agar TORLAK) v obliki homogenega preliwa. Po 18 urni inkubaciji smo plošče pregledali in prešteli razjednine ali plake (to so mesta, kjer so se bakteriofagi namnožili na gostiteljski bakteriji in jo lizirali). Rezultat smo izrazili kot število plakformirajočih enot = pfe na mililiter vzorca.

MPN metoda (določitev najbolj verjetnega števila pfe v 100 ml vzorca) temelji na enaki metodi, kot se uporablja v sanitarni mikrobiologiji za ocenitev števila koliformnih bakterij v 100 ml vzorca. Metoda je modificirana tako, da je primerna tudi za določevanje bakteriofagov. Pri našem sledilnem poskusu smo uporabili naslednji postopek: 3×10 ml vodnega vzorca smo dodali v 1 ml $10 \times$ koncentriranega triptoznega bujona; 1×1 ml in $1 \times 0,1$ ml vodnega vzorca pa v 10 ml navadnega triptoznega bujona. Vzorcem smo nato dodali 0,2 ml gostiteljske bakterije v logaritemski fazi rasti in inkubirali v vodni kopeli na 37° C preko noči. Naslednji dan smo v vzorce kapnili 3 do 5 kapljic kloroforma, jih dobro premešali na ekscentričnem mešalcu in postavili za dve uri v hladilnik na 4° C, da se je kloroform dobro vsedel. Po dveh urah smo iz vzorcev prenesli kapljico na trdno agarsko gojišče prelito z mehkim agarjem z gostiteljsko bakterijo. Po štirih do osmih urah smo pregledali prisotnost razjednin v dodanih kapljicah in rezultate ovrednotili kot število negativnih in pozitivnih. Količino plakformirajočih enot smo določili z uporabo Swaroopovih tabel.

Meja detekcije metode agarskega preliwa pri uporabi 5×1 ml vzorca je 0,2 pfe/ml, kar pomeni 1 razjednina na petih uporabljenih ploščah. Meja detekcije MPN metode je pri uporabljeni količini 3×10 ml, 1×1 ml in $1 \times 0,1$ ml vzorca pri 6 pfe/100 ml vzorca, kar pomeni, da smo zasledili prisoten bakteriofag le v enem 10 mililitrskem vzorcu. Pri tem je potrebno omeniti, da se 6 pfe/100 mililitrov ne more dokazati z metodo direktnega agarskega preliwa.

URANIN

Uranin se je v višjih koncentracijah, ki zanesljivo dokazujejo povezavo med ponorom in izviri, pojavil v vrtini R-6 in izviru Rižane. Prva koncentracija, višja od koncentracij v slepih vzorcih, se je v vrtini R-6 pojavila 14. 4. ob 19.15



Sl. 6. Časovni potek koncentracij uranina in rodamina v izviru Rižane.

Fig. 6. Uranine and rhodamine concentration curves in the Rižana spring.

(0,009 mg/m³), v izviru Rižane (vodarna) pa v vzorcu, vzetem 14. 4. ob 18. uri. Maksimalna koncentracija 20,5 mg/m³ je bila izmerjena v vzorcu vrtine R-6 vzetem 15. 4. ob 9.15, v vzorcu izvira Rižane pa 15. 4. ob 12. uri (19,6 mg/m³). Časovni potek koncentracij uranina je prikazan za Rižano in za vrtino R-6 na slikah 6 in 7.

V vzorcih vode izvirov Timava in Boljunca smo določili uranin le v sledovih na meji detekcije in ne zvezno. Signal na valovni dolžini značilni za uranin je najbolj verjetno posledica onesnaženja, peneče kopeli v komunalnih odpadnih vodah ali naravnih organskih spojin.

V Osapski reki se je uranin v koncentraciji 0,009—0,010 mg/m³ pojavil v dveh zaporednih vzorcih vzetih 14. 4. 1985, sicer pa tudi v nepravilnih časovnih razmakih in nizkih koncentracijah na meji detekcije. Z ozirom na čas pojava barvila v Rižani in razdalje, je v primeru Ospa možno, da uranin določen v Ospu, izvira iz ponora Ločice. Vendar zaradi prenizkih koncentracij tega z gotovostjo ni mogoče trditi, še posebej ker se je v sledovih pojavil uranin že v slepem vzorcu. Popolnoma izključiti pa možnosti povezave ne moremo.

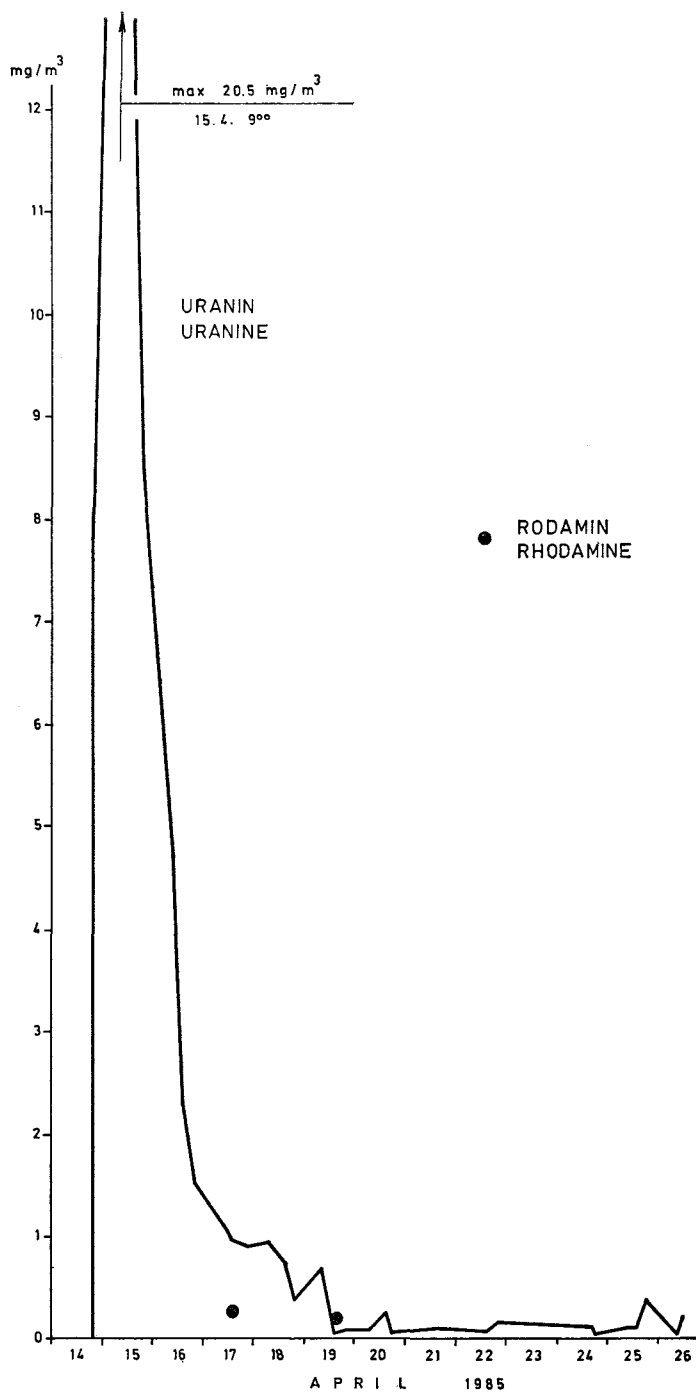
V Gabrskem potoku smo uranin določili v večini vzorcev, vendar v enakih koncentracijah kot v slepih vzorcih, torej gre pri tem zajemnem mestu za naravno ozadje. Tudi v izviru Rakovec smo v večini vzorcev določili koncentracijo uranina v mejah, ki je bila določena tudi v slepih vzorcih. Izstopata dva vzorca, v katerih je bila določena koncentracija uranina 0,015 mg/m³ (14. 4. ob 14.30 in 23. 4. ob 9. uri). Z ozirom na pogosto prisotnost sledov uranina oziroma snovi s signalom pri isti valovni dolžini domnevamo, da je ta dva višja signala prej pripisati ozadju kot pa sledilu. Z ozirom na padavine in povezavo z melioriranim poljem na Gračišču je to veliko bolj verjetno kot povezava z Ločico.

V izvirih Ara in Sopot v Mlinih so bile v posameznih vzorcih izmerjene koncentracije uranina na meji detekcije, za katere je težko reči, da izvirajo iz ponora Ločice. Zelo verjetno tudi izmerjene koncentracije v izviru Sušec ne. Vendar pa je bil v izviru Sušec pojav barvila v koncentracijah na meji detekcije, ki smo jih izmerili po 24. aprilu 1985, veliko pogostejši kot prej. Žal ravno med 21. in 23. 4. vzorci na tem izviru niso bili jemani. Z ozirom na istočasno povišane pretoke je možno in verjetno, da so te povišane koncentracije tudi posledica povišanega naravnega ozadja.

V izviru Sv. Ivan v Buzetu in izviru pod hotelom Admiral v Opatiji smo izmerili sledi v posameznih vzorcih, ki pa skoraj gotovo ne izvirajo iz ponora Ločice, temveč predstavljajo ozadje.

RODAMIN

Rodamin se je v visokih koncentracijah, ki lahko dokazujejo povezavo s ponorom na Gračiškem polju, pojavil le v izviru Rižane in v dveh vzorcih vrtine R-6. Prvi pojav barvila rodamin v vzorcu izvirov Rižane smo izmerili 16. 4. 1985 ob 0.00, maksimalno koncentracijo 8,5 mg/m³ pa v vzorcu vzetem 17. 4. ob 18. uri. Časovni potek koncentracije rodamina v izviru Rižane je prikazan na sliki 6, za vrtino R-6 pa sta na sliki 7 vrisani obe povišani koncentraciji v vzorcih



Sl. 7. Časovni potek koncentracij uranina in rodamina v vodnjaku R-6.
Fig. 7. Uranine and rhodamine concentrations in samples of water well R-6.

zajetih 17. 4. 1985 ob 14.05 in 19. 4. 1985 ob 14.50. V vrtini R-6 nismo izmerili povečanih koncentracij rodamina v obliki krivulje, temveč le posamezne višje vrednosti. Sledovi rodamina so se v vrtini R-6 pojavili 15. 4. 1985 ob 19.45, torej 4 ure prej kot v izviru Rižane, maksimalna koncentracija ($0,26 \text{ mg/m}^3$) je bila prav tako izmerjena 17. 4. 1985 ob 14.05, torej tudi 4 ure prej kot v izviru Rižane.

Že ob barvanjih z uraninom junija 1984, ko rodamina sploh nismo uporabili, so se pojavili posamezni vzorci s fluorescenčno snovjo z maksimalno emisijsko valovno dolžino 578 nm, ki odgovarja valovni dolžini značilni za barvilo rodamin, v koncentracijah do $0,6 \text{ mg/m}^3$. Zato menimo, da je barvanje ponikalnice pri Gračišču dokazalo le zvezo z izvirom Rižane, ne pa tudi z vrtino R-6.

Razen v teh dveh zajemnih mestih smo rodamin v manjših koncentracijah in posameznih vzorcih izmerili v naslednjih izviri: Rakovec 14. 4. ob 14.30 $0,010 \text{ mg/l}$ in 16. 4. ob 9. uri $0,015 \text{ mg/l}$, Gabrski potok 14. 4. ob 9.45 sled na meji detekcije, Boljunec 1. 5. ob 9.10 in 20.5 ob 9.10 sled na meji detekcije, izvir pod hotelom Admiral 28. 5. ob 10. uri in 25. 6. ob 10. uri sled na meji detekcije. V vseh ostalih vzorcih je bil rezultat analize na rodamin negativen.

KALIJEV KLORID

Koncentracija kalija in klorida v nobenem vzorcu ni bila bistveno višja od vrednosti ozadja. V izviru Rižane so bile slepe vrednosti za kalij precej konstantne ($0,6 \text{ mg/l}$), najvišja izmerjena pa je bila $1,0 \text{ mg/l}$. Kot dokaz za povezavo izvira s ponorom je to odločno premalo.

V izviri Boljunec, Ara, Sopot, Sušec in Sv. Ivan so bile izmerjene najvišje vsebnosti K okrog 1 mg/l , v slepih vzorcih pa $0,5\text{--}0,9 \text{ mg/l}$. Nekoliko višje vsebnosti kalija smo izmerili tako v slepih kot tudi pozneje jemanih vzorcih Gabrskega potoka in Rakovca, vendar je to posledica drugačne geološke sestave tal v zaledju teh dveh izvirov.

Edini od izvirov, kjer vsebnost kalija bolj niha, je izvir Osapske Reke v Ospi. 19. 4. ob 14. uri je bilo izmerjenih $2,6 \text{ mg/l}$, 20. 4. ob 14. uri pa $3,7 \text{ mg/l}$. Z ozirom na vsebnost kalija v slepem vzorcu vzetem 26. 2. 1985 ($2,4 \text{ mg/l}$) pa tudi te koncentracije ne pomenijo dokaza za povezavo s ponorom v Malih Ločah, temveč so prej znak za občasno onesnaženje iz zaledja.

Količina injiciranega sledila je bila z ozirom na razredčitve prenizka in bo treba injiciranje v ponoru Male Loče ponoviti. Na izvir pod hotelom Admiral vpliva morska voda in je vsebnost kalija ter klorida tako visoka, da meritve niso bile smiselne. Tudi dokazovanje povezav ponorov s tem izvirom s kalijevim ali natrijevim kloridom je nemogoče.

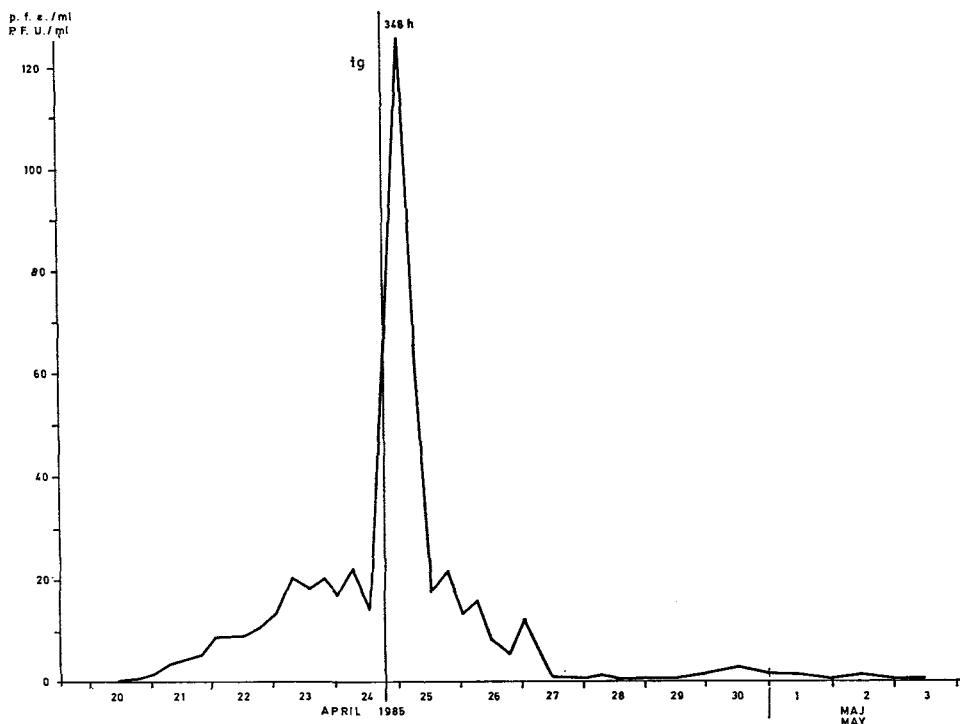
BAKTERIOFAGI

Ker so bili vzorci Rižane najbolj pomembni, to se vidi iz števila dnevnih vzorcev, smo se odločili, da ga preizkušamo samo z metodo direktnega agar-skega preliva, pri kateri dobimo točno določeno število pfe/ml. Tako smo od

11. 4. do 19. 4. določevali število bakteriofagov dvakrat dnevno. Od 20. 4. pa do 17. 6. pa smo pregledali vse vzorce. Prvi pojav bakteriofagov smo zasledili 20. 4. v vzorcu ob 18. uri. Koncentracija bakteriofagov se je povečevala do maksimuma dne 25. 4. ob 6. uri, ko je dosegla vrednost 128,4 pfe/ml, nato pa je začelo število bakteriofagov upadati (slika 8) in doseglo 3. 5. ob 6. uri zadnjo pozitivno vrednost. Od tega datuma pa do 17. 6. v vzorcih Rižane nismo več zasledili nobenega prisotnega bakteriofaga. S tem je dokazana zveza med ponikalnico v Smokovski vali in izviro Rižane.

Vzorke vode iz vrtine R-6 smo preizkusili z metodo MPN, enkrat dnevno pa smo en vzorec preizkusili tudi z metodo direktnega agarkega preliva. Vsi vzorci, preizkušeni z obema metodama, so bili negativni, bakteriofagov v vzorcih vode ni bilo prisotnih. Zato lahko sklepamo, da povezava med Smokovsko valo in vrtino R-6 ne obstaja.

Vzorke iz izvirov pri Mlinih (Sušec, Sopot in Ara) ter Sv. Ivan pri Buzetu smo obdelali z obema omenjenima metodama. Pri izviru Ara sploh nismo dobili pozitivnih rezultatov, pri ostalih izviroh pa je bilo nekaj vzorcev na meji detekcije metode. V izviru Sušec smo v vzorcu z dne 15. 4. ob 6. uri z MPN metodo dobili 6 pfe/100 ml. V izviru Sopot je vzorec direktnega agarkega pre-



Sl. 8. Časovni potek koncentracij bakteriofagov v izviru Rižane.
Fig. 8. Concentration curve of bacteriophages in the Rižana spring.

liva pokazal dne 17. 4. ob 12. uri 0,4 pfe, z MPN metodo pa smo v istem vzorcu dobili 6 pfe/100 ml. MPN metoda je bila pozitivna sicer v meji detekcije tudi v vzorcu z dne 16. 4. ob 12. uri in 18. 4. tudi ob 12. uri. Vzorci iz izvira Sv. Ivan so dali pozitivne rezultate na meji detekcije z MPN metodo 17. 4. ob 19. uri in 18. 4. ob 7. uri.

Iz dobljenih negativnih rezultatov in le nekaj posameznih pozitivnih vzorcev, ki so na meji detekcije MPN metode, in enega pozitivnega rezultata metode direktnega preliva lahko zaključimo, da povezava med Smokovsko valo in izviri pri Mlinih in Buzetu zelo verjetno ne obstaja, še zlasti, ker se tudi rodamin iz bližnjega Gračiškega polja v teh izviri ni pojavil.

IZRAČUN KOLIČINE POVRNJENIH SLEDIL

Izračun količine povrnjenih sledil je narejen le za izvir Rižane, ker so se le v njem pojavili uranin, rodamin in bakteriofagi v višjih koncentracijah z značilnim časovnim potekom. Za izračun smo uporabili hidrološke podatke za vodomersko postajo Rižana — Kubed II z upoštevanjem odzema vode za Rižanski vodovod.

Sledilo uranin se je pojavilo v izviri Rižane 14. 4. ob 18. uri. Do 24. ure istega dne je priteklo v izvir 46,2 g uranina, 15. 4. 7143 g uranina, 16. 4. pa 4074 g. V času od pojava barvila 14. 4. ob 18. uri do 16. 4. ob 24. uri je v izvir priteklo 11 263 g uranina ali preko 75 % celotne injicirane količine sledila. Do zaključka vzorčevanja 7. 8. 1985 se je količina povrnjenega barvila dvignila na 13 960 g oz. 93,06 %. Izračunana količina povrnjenega sledila je glede na izkušnje zelo visoka, vendar je možna glede na ugodne hidrološke razmere ob sledenju in razmeroma hiter pojav v izviru.

Rodamin se je pojavil v vzorcih Rižane 16. 4. ob 0.00. Do 19. 4. ob 24. uri je priteklo v izvir Rižane 5592 g sledila oziroma 54,3 %. Do 10. 5. 1985 je v izvir priteklo 8504 g sledila, do zadnjega vzorca, v katerem smo še ugotovili prisotnost rodamina 21. 6. pa še 13 g. Skupno je povrnjenega 8517 g rodamina oziroma 82,7 %.

Procent povrnjenega rodamina je nižji kot pri uraninu, vendar je dovolj velik za sklepanje, da barvilo ni odtekalo nikamor drugam, kot v izvir Rižane. Časovni potek količine povrnjenih barvil uranina in rodamina je prikazan na sliki 9.

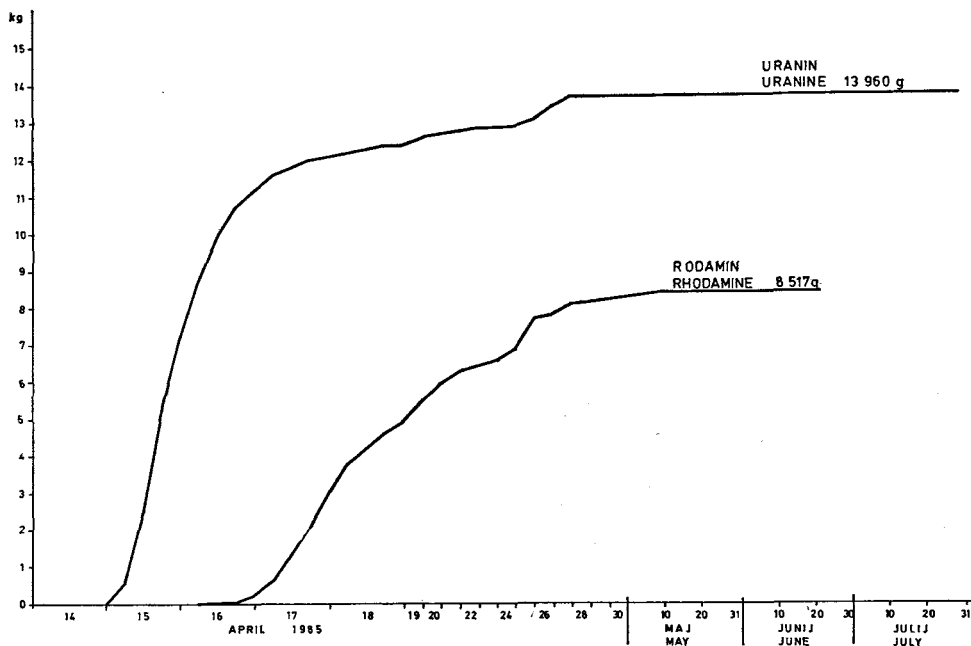
Z ozirom na neobičajno visoko količino povrnjenih sledil smo preverili tudi pravilnost analiz barvil in ostalih obdelav ter pretokov Rižane. Iz dobljenih pozitivnih rezultatov analiz bakteriofagov smo sestavili sledilno krivuljo, katero predstavlja slika 8. Iz podatkov smo lahko izračunali tudi težiščno vala. Pri tem smo uporabili naslednjo formulo

$$t_g = \frac{\sum_{i=1}^n c_i t_i}{\sum_{i=1}^n c_i}$$

pri kateri pomeni

c_i — koncentracija fagov v vzorcu i

t_i — čas, ki je potekel od injiciranja do zajetja vzorca i



Sl. 9. Povrnjene količine sledil v izviru Rižane.

Fig. 9. Returned quantities of tracers as appeared in the Rižana spring.

Izračunana težiščnica vala ima vrednost 347,98 ure, kar lahko zaokrožimo na 348 ur.

Če vzamemo težiščnico vala kot povprečni čas potovanja mase bakteriofagov, lahko po naslednji empirični formuli izračunamo potrebno količino bakteriofagov za sledilni poskus:

$$P_{\text{mark}} = a \cdot t \cdot Q$$

P_{mark} = število bakteriofagov potrebno za sledilni poskus (pfe)

a = faktor z vrednostjo od 20 do 50, ki odraža osnovni nivo bakteriofagov, oziroma neugodne pogoje za preživetje (pfe/ml)

t = ocenjeni čas do pojave sledila v vzorcu (sec)

Q = pretok (m^3/sec)

Če v našem primeru vzamemo povprečni pretok na postaji Rižana-Kubed kot $7,64 \text{ m}^3/\text{sec}$ v času od začetka pojava fagov do konca, ko doseže koncentracija ponovno ničelno vrednost, potem v primeru uporabe faktorja 20 dobimo potrebno količino v vrednosti $1,7 \times 10^{14}$ Pfe; v primeru uporabe faktorja 50 pa $4,4 \times 10^{14}$ Pfe. Dodana količina pa je bila 4×10^{14} Pfe. Ker v našem primeru nismo zasledili nobenega osnovnega nivoja salmonelnih fagov v vzorcu, lahko upoštevamo faktor 20 ali še manj, torej je bila količina dodanih fagov za sledilni poskus dovolj velika.

Izkoristek, oziroma količino povrnjenega sledila smo izračunali po naslednji formuli:

$$\text{izkoristek} = \frac{M_2}{M_1} \cdot 100$$

M_1 — količina injiciranega bakteriofaga

$$M_2 = Q \cdot \sum_{i=1}^n c_i (t_i - t_{i-1})$$

M_2 — količina bakteriofaga v površini vala

V vzorcih Rižane smo dobili količino vrnjenih bakteriofagov $6,24 \times 10^{13}$ pfe, kar pomeni le 15,6 % izkoristek.

ZAKLJUČEK

Dne 10. 4. 1985 ob 13. uri je bilo izvedeno istočasno obarvanje štirih ponikalnic s štirimi različnimi sledili. Priprave za ta poizkus pa so trajale že en mesec pred dnevom injiciranja. Večkrat so bili izmerjeni pretoki vseh ponikalnic na južnem obrobju Brkinov, pri Gračišču, Smokovski vali, ter izvirov, kjer smo kasneje odvezemali vzorce vode za analize. Vgrajene so bile hidrometrične letve in izmerjeni profili za opazovanje pretoka med sledilnim poizkusom. Nad ponorom v Malih Ločah je bila zgrajena pregrada za akumuliranje vode, s katero je bila kasneje odplavljena večja količina sledila v podzemlje.

Z uraninom obarvana voda iz Brezovice se je že po 4,5 dneh pojavila na vrtini R-6 pri Srački babi in na izviru Rižane. Barvilo rodamin iz Gračišča je prišlo do izvira Rižane po 6,5 dneh. Bakteriofagi iz Smokovske vale so bili z gotovostjo ugotovljeni v izviru Rižane prvič po 10,5 dneh, v močni koncentraciji po 14 dneh, le sledovi sledila pa so bili ugotovljeni tudi v Mlinih (Sušec, Sopot) in v izviru Sv. Ivan pri Buzetu. Sledilo KCl iz ponikalnice Male Loče ni bilo ugotovljeno v nobenem od opazovanih izvirov.

Ugotovljene navidezne hitrosti podzemne vode proti izviru Rižane z ozirom na maksimum koncentracije znašajo iz Brezovice 101 m/h, iz Gračišča 18,5 m/h in iz Smokovske vale le 11,3 m/h. Visoka hitrost dotokov iz smeri Brkinov (104 m/h), je bila ugotovljena tudi že pri barvanju Brašnice pri Odolini leta 1910. Počasni pretok vode z južne strani proti izviru Rižane pa je verjetno vzrok za neuspela barvanja, ki so bila izvedena na tem področju.

Rezultati sledilnih poizkusov so služili predvsem za določitev padavinskega zaledja izvira Rižane in za zaščito tega pomembnega vodnega vira. Na osnovi predhodno izvršenih raziskav so bili določeni varstveni pasovi in območja izvira Rižane. Za določitev varstvenih pasov so bili uporabljeni sledeči kriteriji:

- hidrografski kriteriji (površinske razvodnice)
- hidrogeološki kriteriji (podzemske razvodnice)
- litološki kriteriji (kolektorji — prepustne plasti: apnenci, dolomiti; izolatorji — neprepustne plasti: fliš)

- hidrodinamični kriteriji (hitrost pretoka vode od potencialnega mesta onesnaževanja do izvira in čas zadrževanja vode v podzemlju z ozirom na samočistilno sposobnost in eventuelno možnost posredovanja v primeru nesreče z izlitjem škodljivih snovi).

Zaradi značilne heterogenosti kraških vodonosnikov v vertikalni in horizontalni smeri varstveni pasovi niso več bolj ali manj nepravilne elipse, kot v primeru aluvijalnih vodonosnikov, pač pa ponekod oddaljenejša področja (ponorne cone ponikalnic) zahtevajo strožjo zaščito od izvira bližjih ozemelj brez direktne infiltracije do kraškega vodonosnika Rižane.

Ugotovljeno padavinsko zaledje izvira Rižane obsega 183 km² površine, od katere odpade na najožji varstveni pas 2,5 km², na ožji varstveni pas 43,7 km², na širši varstveni pas 110,8 km² in na vplivni varstveni pas 26 km². Z nadaljnjimi sledilnimi poizkusi se bo ugotovljeno padavinsko zaledje izvira Rižane nedvomno še povečalo. S tem pa se bodo povečala tudi varstvena območja, zlasti ožji in širši varstveni pas.

Kot nadaljevanje opravljenih raziskav predvidevamo sledenja ponikalnic pri Hotični, Velikih Ločah, Jezerini in ponovitev barvanja v Malih Ločah, za določitev razvodnice med Rižano in Kvarnerskim zalivom, ter barvanja v Čičariji (ponikalnice pri Vodica, Danah in druge) za določitev razvodnice med Rižano in izvirom Sv. Ivan pri Buzetu in ostalimi pritoki Mirne. Sledilni poizkusi opravljeni v letu 1985 so že precej razjasnili doslej neznano zaledje izvira Rižane in upravičeno lahko pričakujemo, da bodo tudi nadaljnji poizkusi pripomogli k poznavanju zaledja tega zelo pomembnega vodnega vira.

LITERATURA

- D'Ambrosi, C., 1952: Osservazioni geo-idrologiche preliminari presso Trieste, Boll. Soc. Adr. Sc. Nat., 46, (1951—1952), 75—90, Trieste.
- Čadež, N., 1963: Barvanje in poizkus z raziskovalno metodo s trosi v Brkinih leta 1963. Arhiv HMZ, Ljubljana.
- Gams, I., 1966: Poročilo o barvanjih v Dimnicah in v Triglavskem breznu v l. 1964. Acta Carsologica, 4, 151—156, Ljubljana.
- Habič, P., R. Gospodarič, A. Mihevc, F. Šušteršič, 1983: Movraška in Smokovska vala ter Jama pod Krogom. Acta Carsologica, 11, (1982), 77—97, Ljubljana.
- Mosetti, F., 1966: Lo stato delle attuali conoscenze sulla idrologia carsica e relative ripercussioni sul problema dell'alimentazione idrica di Trieste, Atti Mus. civ. St. Nat., 25, 4, 73—105, Trieste.
- Timeus, G., 1910: Studi in relazione al provvedimento d'acqua per la città di Trieste. 1—82, Trieste.
- Timeus, G., 1928: Nei misteri del mondo sotterraneo. Alpi Giulie, 29, 1—38, Trieste.

WATER TRACING IN THE RIŽANA SPRING GROUND WATER BASIN

Summary

The investigations of the catchment area of the Rižana spring started in 1910 when G. Timeus proved by 50 kg of uranine dye the connection between the Brašnica sinking river at Odolina and the spring of Rižana. Dye-tracings done in the years 1960 to 1963 in three sinking streams at the Matarsko podolje in the SW part of the Brkini Mts., and twice in the swallet of sinking brook near Gračišče did not result into significant outcomes. So, the catchment area of this very important Karst spring of the Rižana river was unknown until recent tracing experiment presented in this paper.

Four different tracers were injected at the same time on the 10th of April 1985 at 1 p. m., into four sinking rivers, selected for this experiment. Two of them are on the foothills of the Brkini Mts. (Brezovica and Male Loče), and two in Čičarija region (Gračišče and Smokovska vala). 15 kg of uranine has been injected into the swallet of sinking river Ločica near Brezovica. At Male Loče tracing with 3200 kg of potassium chloride has been achieved and 10 kg of rhodamine was used in Gračišče swallow hole, while the injection of bacteriophage tracer P 22 H 5 was performed with 10 liters of phage broth with titer of 4×10^{13} P. F. U. in Smokovska vala.

Samples were collected from the springs Rižana, Rakovec and Gaber, and from the drilled water well R-6, in the Rižana valley; from the springs Sopot, Ara, Sušec and Sv. Ivan in the Mirna valley; from the springs Timavo and Boljunec on the rim of the Trieste Bay in Italy and in one spring near Opatija in Kvarner Bay in Croatia.

Uranine appeared at Rižana spring and in R-6 borehole four days after the injection. Practically the total amount of the injected tracer emerged at Rižana spring and the apparent velocity of the water from the sinkhole to spring was about 101 m/h. Rhodamine appeared six days after the injection, but only at Rižana spring. As calculated, the 82 % of injected dye reappeared at Rižana spring and the apparent velocity of the water flow from Gračišče was 18,5 m/h. Bacteriophages from Smokovska uvala also appeared only at Rižana spring after ten days. But only 15,6 % of injected phages reappeared with the velocity of groundwater flow of 11,3 m/h. In other springs only some traces of injected tracers were detected, as e. g. potassium chloride from the Male Loče sinkhole, on the limit of detection.

The present established precipitation recharge area of the Rižana spring amounts to 183 sq. km, of which the most narrow groundwater quality protection area comprises 2,5 sq. km, the narrow protection area 43,7 sq. km, the broader protection area 110,8 sq. km and the influence protection area 26 sq. km. The known precipitation catchment area of the Rižana spring can be increased by further investigations.