

ZNAČILNOSTI PRETAKANJA PADAVIN SKOZI VADOZNO CONO KRASA

Janja Kogovšek*

Povzetek

Padavine na krasu prenikajo neposredno s površja v njegovo notranjost. Najprej se pretakajo skozi vadozno cono, nato pa prek stalno zalite cone koncentrirano iztekajo skozi kraške izvire, ki so na krasu skoraj edini vir pitne vode. Padavine se glede na padavinske razmere ter zapolnjenost prsti in zgornjega dela vadozne cone – epikraške cone z vodo zelo različno pojavljajo globlje v krasu, kjer jih kot kapljanja ali curke opazujemo v podzemnih jamah. Pri tem padavine spirajo razpoložljive snovi s površja, tudi onesnaženje, ki tako lahko dosežejo kraške izvire. Iste poti pa ubirajo tudi razlite snovi ob najrazličnejših nesrečah na kraškem površju. Preučevanje pretakanja padavin in prenosa snovi s sledenjem okoljskih parametrov in s sledilnimi poskusi z umetnimi sledili so pokazali sorazmerno hitro pretakanje in hiter prenos snovi v času izdatnejših in pogostejših padavin jeseni (od 0,7 do 4,3 m/h) ter počasnejši in dolgotrajnejši prenos snovi v sušnejših razmerah. Sledenje, ko smo s sledilom injicirali tudi večjo količino vode kot simulacijo razlitja nevarne snovi ob nesreči na kraškem površju, je pokazalo zelo hitro pretakanje po najprej prepustnejšem prevodniku (80 m/h) in zelo počasno po spletu slabo prepustnih prevodnikov (0,05 m/h), kar pomeni daljše zadrževanje v jamskem stropu in zakasnelo spiranje v smeri izvirov.

Uvod

Za kraški svet, ki predstavlja več kot 43 % Slovenije, je značilno, da padavine neposredno prenikajo skozi prst in karbonatne kamnine ter napajajo kraške vodonosnike. Padavine po prehodu prsti vstopajo v vadozno cono, ta lahko obsega od nekaj pa do več sto metrov debele karbonatne kamnine, kjer je kamnina v stiku z vodo in zrakom. Dosedanje raziskave kažejo na veliko heterogenost. Na eni strani gre za pomembno zadrževanje padavin v zgornjem delu vadozne cone, v epikraški coni, medtem ko se po prepustnejših razpokah voda pretaka hitreje. Pretakanje po kanalih, kot je pretakanje rek ponikalnic od ponora do izvira, pa je še hitrejše, saj so sledilni poskusi pokazali hitrosti do 4 oz. 5 cm/s, v nekaterih primerih pa celo večje hitrosti (Kogovšek, 2000b). Seveda pa so hitrosti pretakanja zelo odvisne od hidroloških razmer. Padavinska voda, ki doteka v kraški vodonosnik, pogojuje najprej iztekanje stare, kasneje pa tudi nove vode skozi kraške izvire, od katerih so številni zajeti za oskrbo prebivalstva s pitno vodo.

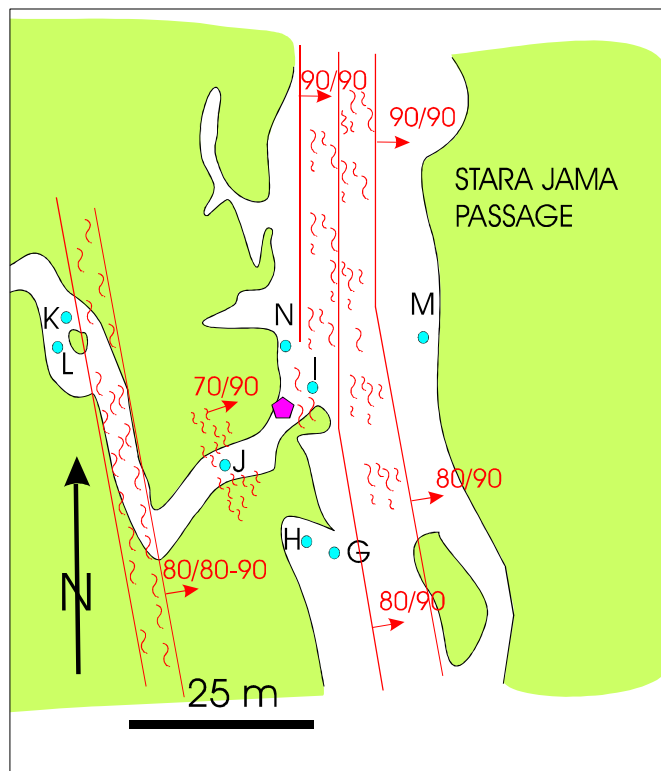
Padavine odnašajo s seboj tudi razpoložljivo onesnaženje (odlagališča odpadkov, kmetijske površine, prometnice...), po teh istih poteh pa se pretakajo tudi tekočine, ki iztekajo ob različnih nesrečah na kraškem površju (naftni derivati in druge). Vse to onesnaženje ogroža kakovost kraških izvirov, zato je zelo pomembno poznavanje načina pretakanja in prenosa snovi v krasu, kar nam omogoča ustrezno načrtovanje aktivnosti na površju, v primeru nesreč pa hitro in pravilno ukrepanje.

Naše raziskovanje pretakanja vode in prenosa snovi s površja skozi 100 m debele apnenice do Glavnega rova v Postojnski jami je obsegalo sledenje okoljskih parametrov (fizikalno-kemičnih) in sledenja z umetnimi sledili ob različnih padavinskih razmerah.

V Postojnski jami, v neposredni bližini Kristalnega rova 100 m pod površjem, smo pri curkih in kapljanjih (I, J, L, G in H) z različno izdatnostjo ugotovili onesnaženo preniklo vodo (Slika 1). Vir onesnaženja je bil manjši vojaški objekt na površju, kjer so do pomladi

* mag. Janja Kogovšek, Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Postojna, Titov trg 2

1991, ko je jugoslovanska vojska zapustila območje, odpadne vode po usedanju v sedimentacijskem bazenu ponikale v izkopano ponikovalnico globine 4 m. Od pomladi 1991, ko ni bilo več svežega onesnaževanja, se je spiralo le še staro onesnaženje po mreži prevodnikov v Postojnsko jamo.



Slika 1: Opazovana kapljanja in curki v Postojnski jami 100 m pod površjem (izdelala Stanka Šebela)

Že leta 1988 smo začeli z občasnimi meritvami in analizami 5 curkov in kapljanj ter jim določali: pretok, pH, specifično električno prevodnost, karbonate, kalcij, magnezij, kloride, nitrate, sulfate in o-fosfate. Te meritve in analize občasno potekajo še danes.

Zaradi različne stopnje onesnaženja v posameznih curkih in kapljanjih ob različnih pretokih smo predvidevali različen način pretakanja skozi 100 m debel jamski strop. Razlike v pretakanju smo nato ugotavljali s sledilnimi poskusi. Novembra 1996 smo izvedli sledilni poskus v naravnih razmerah, tako da smo uranin injicirali tik pred padavinami, ki smo jih tako označili in spremljali njihov pojav v jami. Ob sledenju junija 1993 pa smo v sušnih razmerah injicirani uranin zalili z večjo količino vode.

Metode dela

Debelina jamskega stropa, določena na osnovi stabiliziranega poligona v jami in prenosa poligonskih točk na površje, znaša 100 m z natančnostjo do 0,5 m. Izmera elementov poligona je bila napravljena z elektronskim razdaljemerom NIKON DTM-A10 LG. Meritve pretoka curkov in kapljanj smo opravljali z ustreznim merilnim valjem in štoparico. Na točki I smo merili le del celotnega pretoka, ker je del vode polzel po sigovi kopi. Za podatke o količini padavin smo uporabili meritve Hidrometeorološkega zavoda RS za padavinsko postajo Postojna. Vzorce vode kapljanj in curkov smo zajemali ročno in

neposredno v polietilenske steklenice. V sledilnem poskusu smo zajemali vodne vzorce tudi z avtomatskim vzorčevalnikom WTW PB 10/T. Specifično električno prevodnost (referenčna temperatura 25 °C) kot tudi temperaturo smo določali takoj ob zajemu vzorca s prenosnim aparatom WTW LF 196, kasneje pa z LF 597. Vsebnost kloridov smo določevali po standardni metodi z živosrebrovim nitratom, sulfate po standardni turbidimetrični metodi, o-fosfate po standardni metodi s kositrovim kloridom (Standard Methods, 1992), vsebnost nitratov pa po metodi z natrijevim salicilatam.

Flourescenco vzorcev sledilnega poskusa smo merili z luminiscenčnim spektrometrom PERKIN ELMER LS 30 pri ekscitacijskem maksimumu 492 nm in emisijskem maksimumu 515 nm z mejo določljivosti 0,005 ppb. Hitrosti pretakanja vode smo podajali glede na razdaljo med točko injiciranja in curkom, kjer se je pojavilo sledilo. Zato so tako dobljene vrednosti navidezne hitrosti pretakanja. Dejanske vodne poti so daljše in zato so tudi dejanske hitrosti pretakanja večje.

Sledilna poskusa

V prvem sledilnem poskusu smo 7. junija 1993 v sorazmerno sušnih razmerah na dno ponikovalnice vlili 0,5 m³ vode, nato injicirali raztopino 60 g uranina, ki smo jo sprali s 5,5 m³ vode v času 1 ure. V jami smo opazovali 20 curkov in kapljanj (Kogovšek, 1997).

Pred injiciranjem je od januarja do maja 1993 padlo skupno le 160 mm padavin, maja le 26 mm, 4 dni pred injiciranjem pa še 30 mm. Pretoki curkov in kapljanj so bili zelo nizki. Po injiciranju so do začetka septembra, ko so vsi curki v jami prvič izrazito reagirali, sledile le neizdatne padavine, skupno 330 mm. Pri tem moramo upoštevati veliko evapotranspiracijo. Septembra in oktobra je nato padlo še blizu 700 mm dežja.

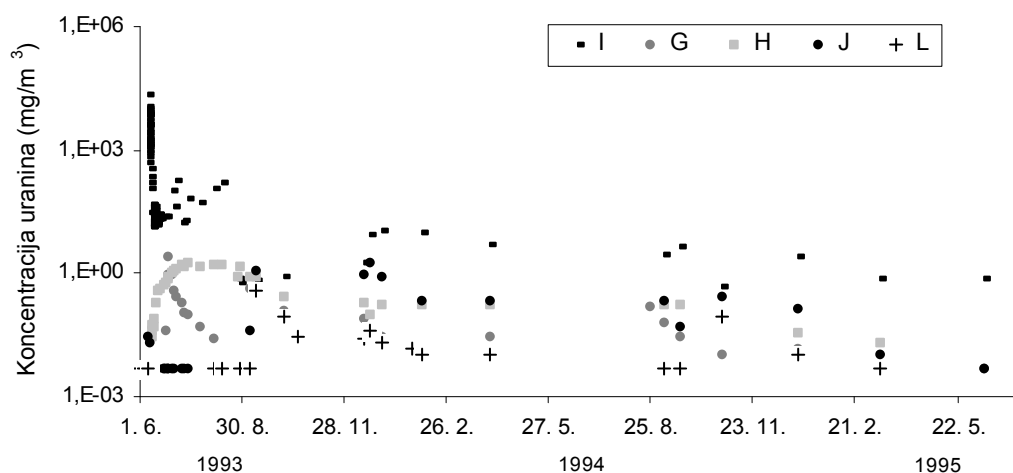
Drugi sledilni poskus smo izvedli 17. novembra 1996. Štiri tedne pred injiciranjem je padlo skupno le 15 mm dežja, medtem ko so bili september in prvi dve dekadi oktobra dobro namočeni. Tik pred injiciranjem raztopine 15 g uranina je padlo 5.2 mm dežja, ponovno je začelo deževati 4 ure po injiciranju, naslednji dan pa je padlo prek 90 mm dežja. Do konca meseca je padlo še dobrih 100 mm dežja (Kogovšek, 2000). Vzorčevali smo na 9 točkah v jami.

V obeh primerih smo sledilo injicirali na dno izkopane ponikovalnice, 4 m pod površjem.

Rezultati

Sledenje junija 1993

Injicirano sledilo se je pojavilo v najizdatnejšem curku I, v manjših curkih J in H ter v kapljanjih G, L in K. Le 75 minut po končanem zalivanju z vodo na injicirni točki je prišlo do sočasne reakcije pretoka izdatnejšega curka I in pojava sledila. Pretok je v 15 minutah dosegel maksimalno vrednost 670 ml/min, kar je le polovica maksimalnega pretoka curka, in je že po 2 urah upadel na 50 ml/min. Očitno je vlita voda potisnila raztopino uranina le po najprepustnejšem prevodniku v curek I. Ta je bil zaradi velike prepustnosti tedaj »brez vode«, kar nakazuje izredno visoka začetna koncentracija uranina, 22 mg/l. Hitrost pretakanja, računana glede na čas injiciranja in pojav maksimalne koncentracije, je bila 80 m/h (Tabela 1). Del uranina se je spiral tudi skozi curke in kapljanja G, H, J, L in K, vendar šele po padavinah, ki so sledile (Slika 2).



Slika 2: Pojav uranina v opazovanih kapljanjih in curkih v Postojnski jami po injiciranju sledila junija 1993

Prve sledi uranina so se v curku H pojavile 3 dni po injiciranju, in sicer po prvih manjših padavinah (14 mm), ko se je začel oblikovati vodni val. Nadaljnjih 93 mm dežja do 17. dne po injiciranju je pogojevalo oblikovanje zaobljenega sledilnega vala, kar nakazuje podobno zvezno odtekanje sledila kot skozi curek I ob sicer znatno manjši prepustnosti prevodnika v curek H. V kapljanju G se je pojavil uranin šele 17 dni po injiciranju ter oblikoval bolj strm in krajši sledilni val, medtem ko je pretok le minimalno zanihal.

V kapljanju J in L ter občasnem curku K smo uranin določili šele septembra, 3 mesece po injiciranju, ko je padlo prek poletja 330 mm dežja, tri dni pred pojavom sledila pa še 110 mm. Pretoki curkov in kapljanj so se prvič po injiciranju z nizkih ustaljenih vrednosti povečali na 5-kratne ali celo več kot 5-kratne vrednosti.

Od opazovanih curkov je največ uranina izteklo skozi curek I. Do prvega intenzivnejšega dežja 16 dni po injiciranju, ko je prej večkrat v manjših količinah padlo skupno 47 mm dežja, je skozi curek I izteklo 180 l vode in 1,1 % injiciranega sledila. To nakazuje, da se je večina uranina zadržala v jamskem stropu in so jo spirale nadaljnje padavine, in sicer kar nekaj let. Na območju jamskih rovov smo s podrobnim vzorčevanjem sicer zajeli vse dostopne curke in kapljanja, vendar dopuščamo možnost delnega odtoka vode s sledilom tudi izven območja jamskih rovov. Tako ni možno narediti izračuna bilance povrnjenega sledila. Spremljanje sledila v curkih tekom let pa je pokazalo dinamiko njegovega spiranja.

Pred pojavom sledila je skozi kapljanja in curke izteklo od 10 do prek 400 l stare vode, ki je bila shranjena v zaledjih curkov. Ob pojavu uranina je začela iztekati skozi curke stara voda iz epikraške cone med površjem in globino 4 m, nato pa šele nova voda.

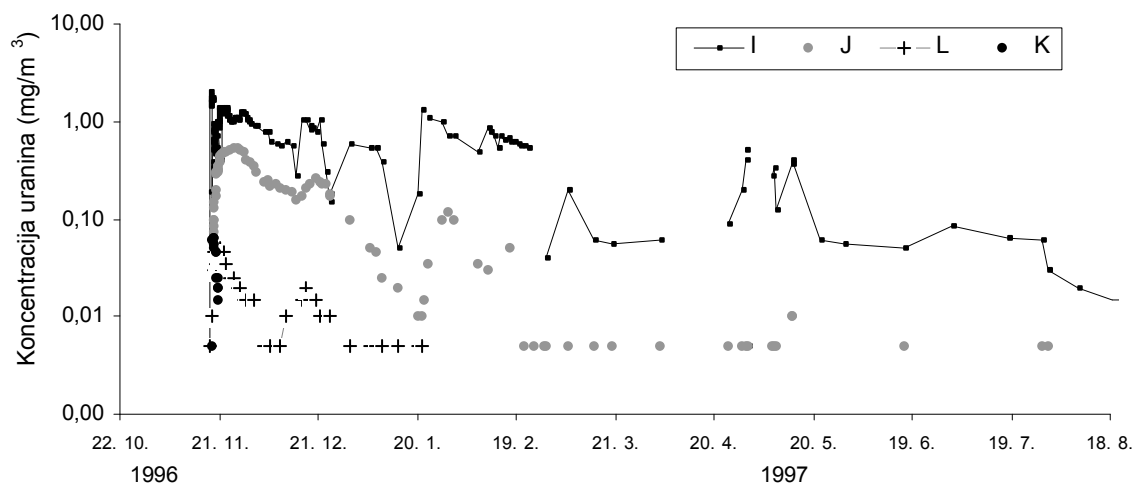
Ugotavljamo, da je uranin iztekal skozi curke in kapljanja G, H, J in L več kot dve leti, ko je padlo skupaj 3600 mm padavin. Po dveh letih je koncentracija uranina v curkih in kapljanjih namreč prvič upadla do meje določljivosti. Verjetno se je uranin v manjših koncentracijah pojavljal še kasneje ob spiranju po padavinah. Le curek I je po dveh letih še vedno dosegal koncentracije uranina okoli 0.7 ppb. Ponovne meritve fluorescence pred izvedbo sledenja novembra 1996 so pokazale nekoliko povišane signale curka I v primerjavi z vrednostmi pred sledenjem 1993, zato sklepamo, da se je junija 1993 injicirani uranin spiral v sledeh še po treh letih in pol, ko je po injiciranju padlo skupno 6000 mm padavin. To pomeni, da je skozi curke iztekal tudi del vsaj tako stare vode.

Očitno je z vodo slabo zapolnjena mreža prevodnikov v zaledju curkov ob točkovno vlti vodi 4 m pod površjem, ki je potisnila uranin globlje v epikraško cono, omogočala odtok le po najprejprejšanem osrednjem prevodniku v curek I. Šele kasnejše padavine, ki so razpršeno zapolnjevale zaledja curkov, pa so pogojevale pretakanje vode po širši mreži razpok in spiranje zastalega uranina, a skozi najslabše prepustne prevodnike v curek J in kapljanje L šele po 3 mesecih, po prvih izdatnih jesenskih padavinah.

Bakalowicz et al. (1974) so ugotavljali vlogo epikrasa, ki odvaja vodo v sistem šele, ko je dovolj zapolnjen z vodo. Tudi Williams (1983) ugotavlja, da je iztok iz epikraške cone počasnejši kot dotok vanjo. Zato zadrževanje v epikraški coni povzroča znatne zakasnitve v odtoku vstopajočih razpršenih padavin (Klimchouk, 1995). Raziskave Gunn-a (1983) v Novi Zelandiji in Williams-a (1983) v Združenih državah Amerike kažejo, da taka zakasnitev lahko traja od 2-14 tednov.

Sledenje novembra 1996 v naravnih razmerah

Tudi v času sledenja v naravnih razmerah novembra 1996 so imeli curki sorazmerno nizke pretoke, vendar smo sklepali na boljšo zapolnjenost epikraške cone z vodo. Intenzivne padavine, ki so sledile, ko je v 5 urah padlo 40 mm dežja, so povzročile hiter porast pretokov, najprej v curku I. Prve sledi uranina so se pojavile v curku I s 4-urno zamudo za porastom pretoka (21 ur po injiciranju), ko je iz zaledja curka že izteklo okoli 300 l vode brez sledila, torej vode, ki je bila uskladiščena v njegovem zaledju že pred dežjem. Dež jo je potisnil v curek I podobno kot kasneje uranin (Slika 3).



Slika 3: Pojav uranina v opazovanih curkih in kapljanjih po injiciranju novembra 1996

Pretok kapljanj L in K je reagiral 10 ur za curkom I, po nadaljnjih 3 urah pa se je pojavil tudi uranin (30 ur po injiciranju). Skozi kapljanje L so do pojava uranina iztekli le 4 l stare vode, skozi K pa 22 l. Curek K je imel vodo le pet dni. Pretok stalnega curka J je začel naraščati 6 ur za curkom I, vendar pa se je sledilo pojavilo v curku J nekako 20 ur po reakciji njegovega pretoka (43 ur po injiciranju), ko je skozi curek izteklo okoli 60 l stare vode. Večja zakasnitev in oblika sledilne krivulje nakazujeta počasnejše pretakanje po obširnejši mreži slabo prepustnih prevodnikov v curek J (Kogovšek, 2000a).

V curkih G in H smo beležili vrednosti fluorescence le nekoliko nad mejo detekcije. Glede na sledenje junija 1993, ko smo uranin točkovno zalili z vodo in je uranin oblikoval

izraziti sledilni krivulji ob minimalnih porastih pretokov, je prišlo po padavinah novembra 1996 do razpršenega napajanja s celotnega zaledja curka in do večjih razredčitev.

V prvem mesecu po injiciranju, ko je padlo 270 mm dežja, je izteklo skozi curek I le 0,1 % injiciranega sledila. Koncentracija uranina je v kapljanju L upadla pod mejo določljivosti (0.005 mg/m^3) že po dveh mesecih, v curku J pa po 4 mesecih iztekanja. V curku I smo zabeležili prvi upad koncentracije uranina do meje določljivosti po 20 mesecih, ko je padlo skupaj 2250 mm padavin. Predvidevamo, da je prihajalo do dokončnega spiranja uranina še ob padavinah, ki so sledile.

V primerjavi z ugotovitvami sledenja junija 1993 v sušnih razmerah je v razmerah boljše zapolnjene epikraške cone z vodo in izdatnejših padavinah, ki so sledile, pretakanje vode in prenos topnih snovi zvezen in opazno hitrejši, z manjšimi razlikami med različno prepustnimi prevodniki.

Prenos onesnaženja

Občasne analize vsebnosti kloridov, nitratov, sulfatov in o-fosfatov ter specifične električne prevodnosti curkov in kapljanj G, I, J, L, so v času od 1988 do 2002 pokazala razlike med curki ter nihanja in upadanje teh parametrov s časom. Meritve do pomladi 1991 odražajo vpliv aktivnega onesnaževanja s površja, po tem datumu pa le še spiranje starega onesnaženja z dna ponikovalnice, kjer je ostala plast finega organskega sedimenta in onesnaženja iz jamskega stropa.

Analize so zajele razmere različnih pretokov, za primerjavo pa smo sočasno zajemali in vzorčevali tudi »čisti«
curek, ki leži izven območja onesnaženja. Analize nitratov, kloridov, sulfatov in o-fosfatov so pokazale največje onesnaženje curkov I in J, nekoliko manj kapljanja L, najmanj pa curkov G in H. Curka I in J imata zelo podobna poteka nitratov in kloridov (Kogovšek, 1997), tako po velikosti kot po časovni razporeditvi.

Po prenehanju aktivnega onesnaževanja je prišlo v času treh let do intenzivnega spiranja in hitrega upadanja koncentracij, nato pa do počasnejšega spiranja in približevanja izhodnim vrednostim v času nadaljnjih 8 let, pri kloridih celo nekoliko hitreje. Spiranje sulfatov in o-fosfatov je počasnejše in po 11 letih še traja. Največje razlike smo ugotavljali pri prenosu o-fosfatov, kjer časovni potek kaže bistveno počasnejše spiranje skozi curek J v primerjavi s curkoma I in L.

Zaključki

Meritve sestave prenikle vode na štirih točkah v jami: v izdatnejšem curku I, stalnejšem in manj izdatnem curku J ter kapljanjih G in L ter vzporedno na referenčni točki (čista prenikla voda) so pokazale na različno stopnjo izhodne onesnaženosti glede na meritve SEP, nitrate, kloride, sulfate in o-fosfate. Spiranje s padavinami tekom let po prenehanju aktivnega onesnaževanja je pokazalo razlike v spiranju posameznih snovi kot tudi razlike v spiranju po različno prepustnih prevodnikih. Nitrati in kloridi so se spirali skozi najbolj onesnažena curka I in J ter kapljanje L intenzivno 3 leta, v nadaljnjih 8 letih pa so dosegli vrednosti referenčnega neonesnaženega curka. Spiranje sulfatov in o-fosfatov je počasnejše in po 11 letih še traja. Največje razlike smo ugotavljali pri prenosu o-fosfatov, ki se bistveno počasneje spirajo skozi curek J v primerjavi z drugimi curki. Kapljanje G je izkazovalo ves čas manjše onesnaženje, kar nakazuje slabšo povezavo z virom onesnaženja na površju.

Razlike v pretakanju in prenosu snovi, ki sta jih pokazala sledilna poskusa (Tabela 1), pripisujemo predvsem razlikam v zapolnjenosti epikraške cone v času injiciranja ter količini in razporeditvi padavin, ki so sledile, kar je pogojevalo različen prenos sledila.

Trickle	G	H	I	J	K	L
V _{dom} (m/h): 6.1993	0,23	0,12	80	0,05	0,05	0,05
V _{dom} (m/h): 11.1996			4,3	0,7	1,0	1,0

Tabela 1: Navidezne hitrosti pretakanja sledila (v_{dom} v m/h) v posamezne curke v sledenjih junija 1993 in novembra 1996, računane glede na čas injiciranja

Dvakrat dalj časa trajajoče spiranje uranina, ko je padlo 2,5-krat več padavin, ob injiciranju 60 g junija 1993 v primerjavi z injiciranjem 15 g novembra 1996, je do določene mere odraz večje količine sledila, predvsem pa posledica različne zapolnjenosti vadozne cone pred injiciranjem in načina začetnega spiranja oz. zastajanje uranina v slabo prepustnem delu. Dotok padavin v curke, ki sicer dobivajo vodo tudi po prepustnejših prevodnikih, je v daljših sušnih obdobjih minimalen ali celo izostane. Vendar pa so taki prevodniki sposobni prevajati tekočine tudi v sušnih razmerah v primeru večjih točkovnih izliti ob raznih nesrečah. Torej lahko pričakujemo hiter pojav izlite snovi, tudi nevarnih snovi, brez večjih razredčitev. Na območjih slabše prepustnosti pa ne pride do takojšnjega prenosa, temveč do uskladiščenja v slabo prepustnem delu vadozne cone (v našem primeru do 3 mesecev) in iztekanja šele po dovolj izdatnih padavinah, ki potisnejo izlite snovi v prepustnejše dele vadozne cone.

V razmerah boljše zapolnjenosti slabše prepustnega dela vadozne cone in izdatnejših padavin, kot je bilo v sledenju novembra 1996, pa izdatne padavine pogojujejo postopno, sorazmerno hitro zapolnjevanje celotnega zaledja curkov, vključno z mrežo najslabše prepustnih razpok, ter sočasno iztiskanje in potiskanje uskladiščene vode iz epikrasa v vadozno cono. Gre za zvezen prenos snovi po vseh razpoložljivih razpokah, za hitrejše pretakanje ter za krajše zadrževanje v slabše prepustnih delih vadozne cone, ko prihaja tudi do večjih razredčitev.

Literatura

- American Public Health Association, 1992: Standard methods for the Examination of Water and Wastewater 18th Edition, Washington D.C.
- Bakalowicz, M., Blavoux, B. & A. Mangin, 1974: Apports du trackage isotopique naturel a la connaissance du fonctionnement d'un systeme karstique – teneurs en oxygene-18 de trois systemes des Pyrenees, France. *Journal of Hydrology* 23:141-158.
- Gunn, J., 1983: Point-recharge of limestone aquifers – a model from New Zealand karst. *Journal of Hydrogeology* 61:19-29.
- Klimchouk, A., 1995: Karst morphogenesis in the epikarstic zone. *Cave and Karst Science* 21(2):45-50.
- Kogovšek, J., 1997: Pollution transport in the vadose zone. In: Günay G & Johnson A.I., *Karst waters & environmental impacts: proceedings*. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp 161-165.
- Kogovšek, J., 2000a: How to determine the way of percolation and transport of substances by water tracing test in natural conditions. *Annales* 10/1(19):133-142.
- Kogovšek, J., 2000b: Underground water Velocities in Slovene Karst (Tracing Experiments). *Proceedings of Second Croatian Geological Congress/Cavtat – Dubrovnik/17-20.May 2000/ Ed. I. Vlahović & R. Biondić/ 629-633*, Institut za geološka istraživanja, Zagreb.
- Williams, P.W., 1983: The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. *Journal of Hydrology* 61:45-67.