

izvirno znanstveno delo

UDK 556.3:551.44(497.4 Postojnska jama)
504.054:556.3

UGOTAVLJANJE NAČINA PRETAKANJA IN PRENOSA SNOVI S SLEDILNIM POSKUSOM V NARAVNIH RAZMERAH

Janja KOGOVSĚK

Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, SI-6230 Postojna, Titov trg 2

IZVLEĀEK

V nasprotju s sledenjem v juniju 1993, ko smo sledilo zalili s 5,5 m³ vode, kar lahko primerjamo z razlitji večjih koliĀin nevarnih tekoĀin ob nesreĀah, je bil sledilni poskus novembra 1996 opravljen v naravnih razmerah. Na površju smo kvantitativno injicirali 15 g uranina in poĀakali na padavine, ki so sledilo spirale skozi 100 m debele karbonatne kamnine v curke in kapljanja v Postojnski jami. Uranin se je pojavil najhitreje in najizraziteje v curku I (s hitrostjo 0,12 cm/s), v curkih J in L pa kasneje (s hitrostjo 0,028 oz. 0,019 cm/s) in manj izrazito. Po najbolj prepustnem prevodniku I se je v enem mesecu spralo le 0,1% injiciranega uranina, kar nakazuje le poĀasen, zato pa dolgotrajen prenos topnih snovi skozi vadozno cono z naravnim spiranjem ob padavinah. Tako se spirajo tudi nevarne snovi iz raznih odlagališĀ na kraškem površju in ogroĀajo kakovost kraške vode.

Ključne besede: krasoslovje, kraška voda, sledilni poskus, Postojnska jama, Slovenija

UTILIZZO DI TRACCIANTI PER LA DETERMINAZIONE DELLA VIA DI PERCOLAZIONE E TRASPORTO, IN CONDIZIONI NATURALI, DELLE SOSTANZE DISCIOLTE IN ACQUA

SINTESI

A differenza dell'esperimento effettuato a giugno del 1993, quando gli autori diluirono un tracciante con 5,5 metri cubi d'acqua (il che puō venir paragonato al versamento accidentale di grandi quantitā di sostanze tossiche), nel novembre 1996 il tracciante è stato utilizzato in condizioni naturali. In superficie sono stati iniettati 15 g di uranina, che la pioggia ha poi condotto attraverso rocce carbonatiche spesse 100 m e fatto gocciolare nelle Grotte di Postumia (Postojna). Le piū alte concentrazioni di uranina sono state ritrovate, in tempi brevi, nel getto I (con una velocitā pari a 0,12 cm/s); nei getti J e L sono state riscontrate, in un secondo tempo, minori concentrazioni di uranina (con una velocitā rispettivamente di 0,028 e 0,019 cm/s). Nell'arco di un mese, attraverso il conduttore piū permeabile I è passato solo lo 0,1% dell'uranina iniettata, il che conferma un passaggio lento, quindi di lunga durata, delle sostanze disciolte in acqua piovana. Allo stesso modo vengono trasportate anche sostanze tossiche provenienti da varie discariche sulla superficie carsica, che minacciano la qualitā dell'acqua carsica.

Parole chiave: carsologia, acqua carsica, utilizzo di traccianti, Grotte di Postumia (Postojna), Slovenia

UVOD

PreuĀevanje prenikanja padavin skozi 100 m debele apnenice smo od leta 1988 spremljali v Kristalnem rovu

in delu Glavnega rova Postojnske jame (KogovšĀek, 1995a). Ugotovili smo onesnaĀeno preniklo vodo in vzrok na površju - odtok odpadne komunalne vode iz manjšega vojaškega objekta. Ker nam tedaj ni bil omo-

gočen dostop na površje, smo v jami redno spremljali sestavo 4 curkov onesnažene prenikle vode, za primerjavo pa še sestavo bližnjega čistega kapljanja, medtem ko smo sledilne poskuse, ki nam naj bi pokazali smeri odtoka vode, dinamiko pretakanja in način prenosa snovi po posameznih prevodnikih, načrtovali za prihodnost.

Po razpadu SFRJ in odhodu vojske smo junija 1993 napravili prva dva sledilna poskusa iz ponikovalnice odpadne vode, kjer smo injicirali uranin, in iz bližnje vrtače, kjer smo injicirali rodamin. Sledili smo tedaj zalili z večjo količino vode (5,5 m³). To sledenje nam je pokazalo povezavo površja s curki in kapljanji 100 m globlje v jami in način pretakanja vode in sledila v razmerah, ko smo sledilo zalili z večjo količino vode (Knez *et al.*, 1995; Kogovšek, 1997a, 1997b). Takšne razmere nastopijo ob prometnih in drugih nesrečah, v katerih so udeleženi prevozniki tekočin, ko pride do različja raznih nevarnih snovi na kraškem površju (Kogovšek, 1995b).

Sledenje novembra 1996 pa smo opravili ob naravnih razmerah, ko smo sledilo raztopili v majhni količini vode, ga injicirali, nato pa počakali na spiranje sledila s padavinami. Tako se spirajo s površja v krasu v vodi topne snovi iz številnih najrazličnejših odlagališč odpadkov (Kogovšek, 1996), gnojila in zaščitna sredstva s kmetijskih površin, onesnaženje s cestnih (Kogovšek, 1995c) in parkirnih površin.

MATERIAL IN METODE

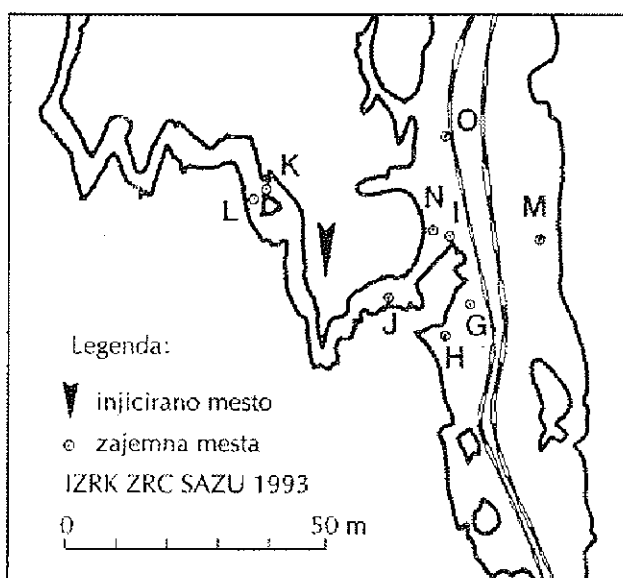
Uporabljene metode dela

Debelina jamskega stropa je bila določena na osnovi stabiliziranega poligona v jami in prenosa poligonskih točk na površje, in 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. Vsakokrat smo pretok merili trikrat in vzeli povprečno vrednost. 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, tako da smo počakali, da so se napolnile. Le v primeru minimalnih pretokov smo običajno pobrali vzorce naslednjega dne zjutraj in še istega dne opravili kemične analize. 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. Vsebnost kloridov smo določevali po standardni metodi z živosrebrovim nitratom, sulfate po standardni turbidimetrični metodi, o-fosfate po standardni metodi s ko-

sitrovim kloridom (Standard Methods, 1992), vsebnost nitratov pa po metodi z natrijevim salicilatom.

Fluorescenco 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 v krasu računamo glede na razdaljo med točko injiciranja in izvrom oz. curkom, kjer se sledilo pojavi. Zato so tako dobljene vrednosti navidezne hitrosti pretakanja. Dejanske vodne poti so daljše in zato so tudi dejanske hitrosti pretakanja večje, vendar so za zdaj dejanske dolžine vodnih poti v krasu še nedostopne, ker danes znane metode ne omogočajo vpogleda v kraško notranjost.



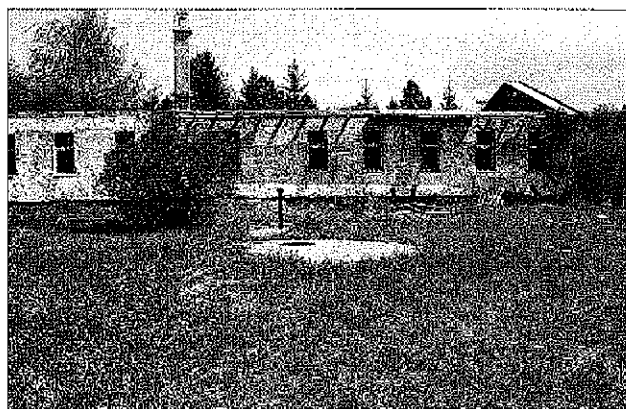
Sl. 1: Območje Glavnega in Kristalnega rova v Postojnski jami, kjer smo v okviru sledilnega poskusa novembra 1996 opazovali curke in kapljanja: G, H, I, J, K, L, M, N in O.

Fig. 1: The area of Glavni and Kristalni rov in Postojnska jama, where trickles G, H, I, J, K, L, M, N, and O were observed after water tracing in November 1996 (arrow - injection point, circle - sampling point).

Izvedba sledilnega poskusa

Injiciranje sledila

Sledilni poskus smo opravili 17. novembra 1996, ko smo od 11.20 do 11.35 injicirali 15 g uranina, ki smo ga kvantitativno sprali z 20 l vode. Počakali smo na dež, ki je nato spiral uranin v smeri Kristalnega in Glavnega rova Postojnske jame. Uranin smo injicirali, podobno kot ob sledenju junija 1993, v ponikovalnico odpadne vode bivšega objekta JLA, ki je spomladi 1991 zapustila območje (Sl. 1, 2).



Sl. 2: Površje nad Postojnsko jamo, kjer smo v nekdanjo ponikovalnico odpadnih voda injicirali 15 g uranina (Foto: J. Kogovšek).

Fig. 2: The surface above Postojnska jama, where 15 g of uranin is injected into former sink of waste waters (Photo: J. Kogovšek).

Tab. 1: Vsebnost kloridov, nitratov, sulfatov in fosfatov v curkih I, J in L septembra 1996 pred sledenjem 17. novembra.

Tab. 1: The content of chlorides, nitrates, sulphates and phosphates in trickles I, J and L in September 1996 before tracing was carried out on November 17th.

Curk Trickle	SEP SEC	Kloridi Chlorides	Nitrati Nitra- tes	Sulfati Sulphates	Fosfati Phosphates
	$\mu\text{S/cm}$	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
I	483	2,1	20	24	0,33
J	459	1,9	7,6	19	1,4
L	469	3,8	18	17	0,34

Po prenehanju svežega onesnaževanja je dež postopoma spirala onesnaženi jamski strop, kar smo spremljali s kemičnimi analizami curkov v jami. Naše meritve sestave prenikle vode v času injiciranja po dobrih 5 letih spiranja s padavinami so pokazale že močno znižane vrednosti merjenih parametrov, ki so razvidne iz tabele 1.

Zajemanje vzorcev

Glede na rezultate sledilnega poskusa junija 1993, ko smo vzorčevali 25 kapljanj in curkov prenikle vode na širšem območju, smo tokrat vzorčevali na 9 mestih: G, H, I, J, K, L, M, N in O (Sl. 1), na točkah, kjer smo pričakovali pojav uranina, ter na dodatnih robnih točkah. Najpodrobneje smo vzorčevali curek I na vhodu v Kristalni rov, kjer smo si pomagali z avtomatskim zajemalnikom vzorcev, na drugih zajemnih mestih pa smo zajemali vzorce ročno in hkrati merili pretok.

Hidrološke razmere

Padavine

September in oktober 1996 sta bila kar obilna s padavinami, saj je padlo 203,5 oz. 185,5 mm dežja. Vendar pa je v treh tednih pred injiciranjem padlo v Postojni skupno le 20 mm dežja, tako da so pretoki curkov in kapljanj v Postojnski jami upadali in so v času injiciranja dosegali minimalne vrednosti (Tab. 2).

Tab. 2: Pretok curkov in kapljanj v času injiciranja ter minimalni in maksimalni pretoki v okviru večletnih občasnih meritev.

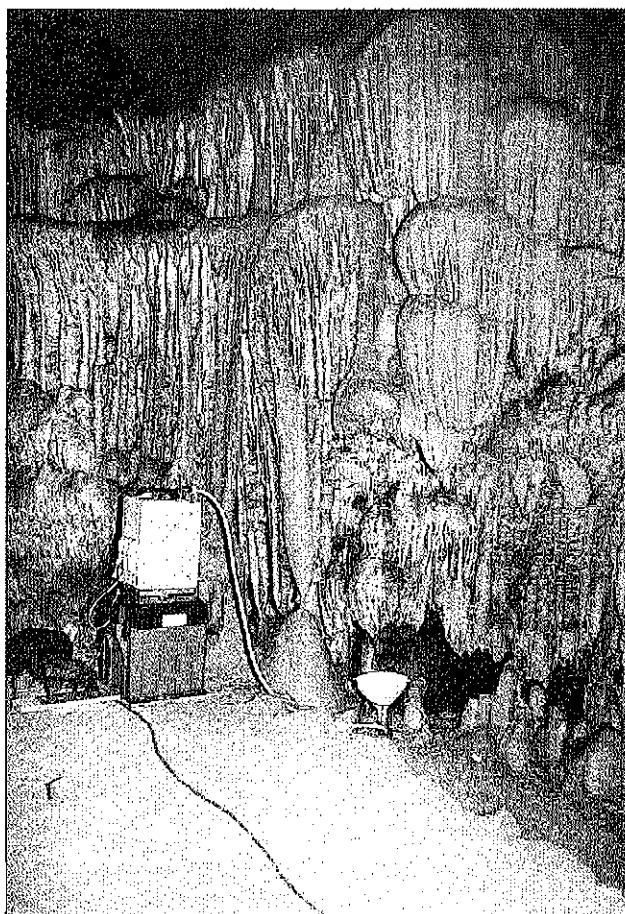
Tab. 2: Discharge (Q) of trickles and drippings at the time of injection, and minimal and maximal discharges within the framework of longstanding seasonal measurements.

Curk - Trickle	G	H	I	J	L
Pretok 17.11.96 (ml/min) - Q	1	20	5	1,5	2
Pretok - min (ml/min) - Q _{min}	0,5	1	1	1	1,5
Pretok - max (ml/min) - Q _{max}	55		1500	184	12

Po injiciranju 17. novembra so še istega dne popoldne sledile manjše padavine (4,5 mm). Do polnoči je padlo še nadaljnjih 6 mm. Nato je začelo intenzivne deževati in do 18. novembra ob 5.30, ko smo izmerili že močno povečan pretok curka I ter zajeli vzorec, je padlo kar 41,5 mm dežja. Do 9.30 je deževalo zmerno, nato pa do 11.00 intenzivno ter skupaj padlo še nadaljnjih 34 mm dežja. Zmerno je deževalo še do 15.00 (10 mm). Zvečer je ponovno začelo deževati in do 19. novembra ob 7.00 padlo 16 mm dežja.

Prek dneva (18. novembra) je tako padlo skupno 89 mm dežja. Dne 19. novembra ni deževalo, naslednjega dne, 20. novembra, pa je padlo 34 mm dežja. Sledil je zopet dan brez padavin, 22. novembra pa je prek dneva ponovno deževalo in padlo 20 mm dežja. Nato sta bila dva dneva brez omembe vrednih padavin. Do konca meseca so sledili dnevi z manjšimi padavinami v obliki snega, prva dekada decembra pa je bila suha.

Kasneje je v decembru padlo 166 mm padavin kot sneg. Januarja 1997 je padlo 163,3 mm dežja, v februarju, marcu, aprilu in maju pa skupno le 166,5 mm padavin, od tega 64,5 mm v maju. Junija in julija je padlo 149, oz. 154 mm dežja, avgust in september pa sta bila zelo suha. Oktobra je padla večina dežja v nevihti 8. oktobra (100 mm). Prve intenzivne in izdatne padavine so sledile novembra, ko je padlo 367,5 mm dežja in decembra z 216,4 mm padavin.



Sl. 3: Zajemanje vzorcev vode na točki I na vhodu v Kristalni rov z avtomatskim zajemalnikom (Foto: J. Kogovšek).

Fig. 3: Water sampling at point I at the entrance into Kristalni rov with automatic sampler (Photo: J. Kogovšek).

REZULTATI

Rezultati meritev pretokov curkov in kapljanj v času sledilnega poskusa

Curek I

Izhodna vrednost pretoka curka I (Sl. 3) v času injiciranja sledila je bila le 5 ml/min. Naslednjega dne, 18. novembra ob 5.30, ko je padla glavna intenzivna dežja v tem dnevu (41,5 mm), ki je začel padati opolnoči, smo zabeležili močno povečan pretok. Ocenjujemo, da je začel pretok curka strmo naraščati že po četrtni uri in je v štirih urah ob 8.00 dosegel skoraj maksimalno zabeleženo vrednost (1,32 l/min), ki je bila 260-krat večja od izhodne vrednosti. Prek dneva je nato pretok nekoliko nihalo do vrednosti 1,4 l/min, nato pa je bil praktično stalen vse do 22. novembra (3 dni), ko je upadel na 1,3

l/min. Opazneje je začel upadati proti večeru in 23. novembra ob 10.00 dosegel vrednost 0,55 l/min (23. in 24. novembra ni bilo padavin). Sledilo je najprej počasnejše upadanje pretoka zaradi manjših padavin konec novembra, nato pa hitreje do 10. decembra, ko ni bilo več padavin in je pretok dosegel 40 ml/min. Ponovne padavine v decembru 96 ter januarju in maju 97 so bile razlog za ponovne poraste pretoka (Sl. 4, 6, 7).

Curek J

Izhodna vrednost pretoka curka J (Sl. 8) v Kristalnem rovu je bila le 1,5 ml/min. Po padavinah 18. novembra ob 10.00 je začel pretok naraščati. Toda naraščanje ni bilo tako hitro kot pri curku I, saj je maksimalno vrednost dosegel šele 25 ur po začetku naraščanja pretoka. Maksimalno vrednost 86 ml/min, ki je bila 60-kratna vrednost izhodnega pretoka, je dosegel 19. novembra ob 11.30. Pretok je nato le malo nihalo in vztrajal 5 dni na vrednosti nekoliko nad 80 ml/min vse do 24. novembra ob 10.00 (Sl. 9). Sledilo je zložno upadanje pretoka, počasnejše kot v curku I. Ob ponovnih intenzivnejših padavinah decembra je pretok ponovno porasel, vendar z določenim časovnim zaostankom za curkom I.

V zaledju curka J je v primerjavi s curkom I opazno močnejše dušenje pretakanja, ki se izkazuje v manjših nihanjih pretoka, v njegovem počasnejšem reagiranju na padavine in kasneje v počasnejšem in zadržanem upadanju pretoka.

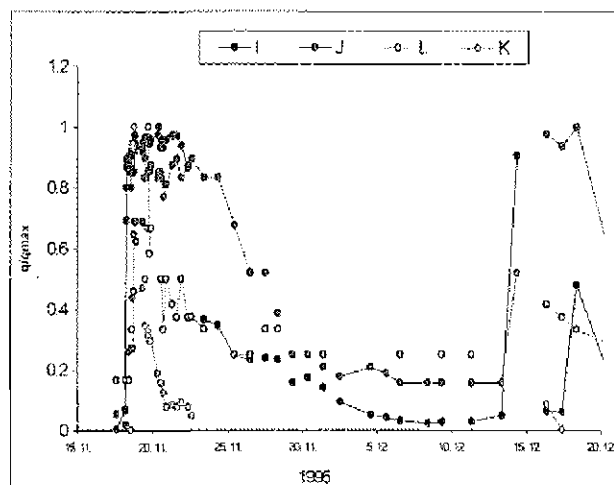
Kapljanje L in občasni curek K

Kapljanje L v Kristalnem rovu ima prek leta zelo konstanten pretok, ki tudi po intenzivnih padavinah le redko preseže 10-kratno vrednost minimalnega pretoka. V času injiciranja je dosegal 2 ml/min, na izdatne padavine 18. novembra pa je reagiral šele zvečer istega dne ob 18.00, medtem, ko je maksimalno vrednost 12 ml/min dosegel naslednjega dne ob 17.00, kar je 6 ur za curkom J (Sl. 10).

Občasni curek K v neposredni bližini je bil v času injiciranja suh, prvi vzorec pa se nam je nabral 18. novembra do 14.30. Pretok je v treh urah porasel do 128 ml/min, nato pa brez opaznejših nihanj upadal do 23. novembra, ko je ponovno presušil (Sl. 11).

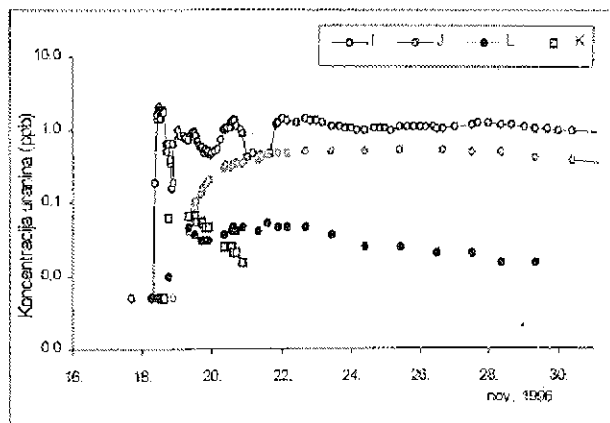
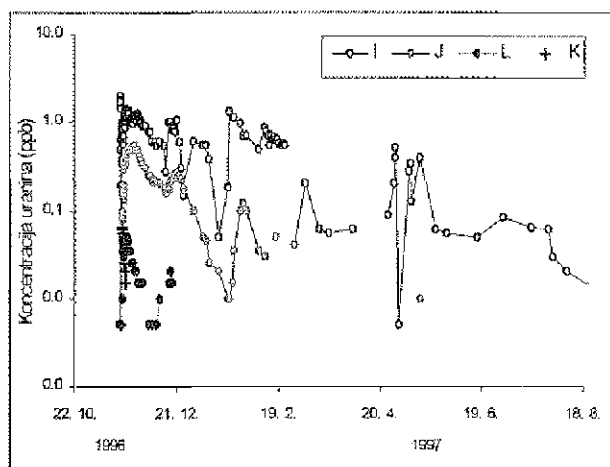
Rezultati sledilnega poskusa z uraninom

Uranin se je pojavil v curkih: I, J, K in L (Sl. 5). Najizraziteje se je pojavil v curku I, slabše pa v curku J, kapljanju L in v občasnem curku K. Na osnovi rezultatov sledenja junija 1993 smo pričakovali pojav uranina tudi v curkih G in H, vendar ga na teh dveh mestih nismo določili. Temu je zelo verjetno vzrok majhna količina injiciranega sledila (4-krat manjša kot junija 1993) in razmere daljšega in manj intenzivnega



Sl. 4: Potek pretokov (q/q_{max}) v curkih I, J, K in L, kjer se je pojavil uranin.

Fig. 4: Flow through-time (q/q_{max}) in trickles I, J, K, and L where the uranin appeared.



Sl. 5: Sledilne krivulje curkov: I, J, K in L.

Fig. 5: The tracer recovery curve in trickles I, J, K, and L.

spiranja, kar je verjetno vzrok za pojav uranina v curkih G in H v koncentracijah pod mejo določljivosti.

Curek I

Prvo sled uranina smo izmerili 18. novembra ob 8.00, nekako 4 ure za prvim porastom pretoka (Sl. 5, 6). Koncentracija je čez 3 ure že dosegla maksimalno vrednost 2 ppb, nato pa ob sicer konstantno visokem pretoku (Sl. 7) večkrat zanihala. Štiri ure po koncu intenzivnih padavin (dopoldne 18. novembra) je začela upadati tudi koncentracija uranina. Ponovne manjše padavine so bile razlog za nadaljnje spiranje uranina in porast njegove koncentracije, vendar ne prek vrednosti 1 ppb. Sledil je dan brez padavin, ko je ob maksimiranem pretoku koncentracija uranina postopno upadala, ob ponovnih manjših padavinah pa porasla v tretji vrh sledilnega vala. Ob maksimiranem pretoku so pojav več vrhov v sledilni krivulji uranina povzročale vsakokratne padavine, ki so potiskale uranin.

Sledeče izdatnejše padavine pa so povzročile upadanje koncentracije uranina, ker je prišlo do razredčevalnega učinka. Sledil je dan brez padavin, kar je povzročilo počasno upadanje pretoka in hkrati naraščanje koncentracije uranina. Ponovne padavine so zadržale upadanje pretoka, ki je vztrajal na vrednosti 1,3 l/min; koncentracija uranina pa je bila 1,3 ppb. Izostanek nadaljnjih padavin je bil razlog za hiter upad pretoka ter vzporedno zelo zadržano upadanje koncentracije uranina.

Nihanja koncentracije uranina ob maksimiranem pretoku nakazujejo dotok vode iz širšega zaledja curka I, ki pa se mu je ob vsakokratnih padavinah intenzivneje pridružil dotok vode z uraninom po najbolj prepustnem prevodniku s točke injiciranja.

Skozi curek I je v času po injiciranju sledila in pred njegovim pojavom v curku izteklo približno 300 l čiste vode, kar pomeni zapolnjenost zaledja curka I v danih hidroloških razmerah, torej ob slabši zapolnjenosti in majhnih pretokih curka (Sl. 6).

Ponovno intenzivnejše spiranje uranina je bilo po padavinah decembra ter januarja 1997 vse do konca februarja, ko je koncentracija uranina upadla na 0,04 ppb, ter ponovno ob majskih padavinah. Do novembrskih intenzivnih in izdatnih padavin (eno leto po injiciranju), ko je prišlo ponovno do intenzivnejšega spiranja uranina, je koncentracija upadla na 0,015 ppb. Novembra 1998 uranina ni bilo več.

Ker ne poznamo dolžine dejanske vodne poti, navajam navidezne hitrosti pretakanja, ki so izračunane glede na razdaljo daljice med injicirno točko in kapljanjem oz. curkom v jami. Navidezna hitrost pretakanja uranina v curek I je bila glede na njegov prvi pojav 0,14 cm/s oz. 4,9 m/h, glede na maksimalno koncentracijo pa 0,12 cm/s oz. 4,3 m/h (Tab. 3).

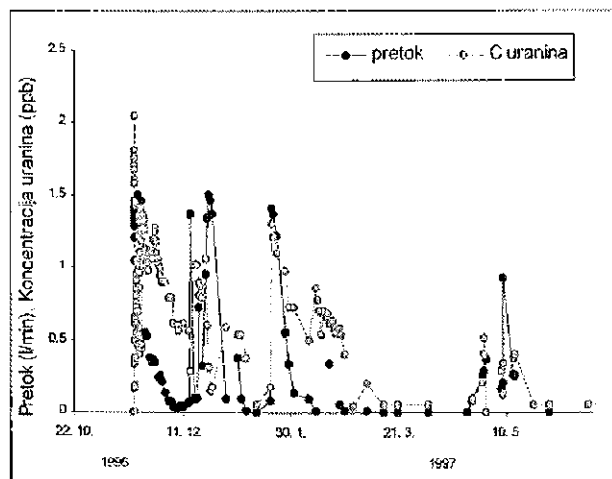
Tab. 3: Hitrosti pretakanja uranina glede na doseženo maksimalno koncentracijo za stalne curke I, J in L ter občasn timer curke K.

Tab. 3: Flow through-time of the uranin in view of the maximal concentration for constant trickles I, J and L and seasonal trickle K.

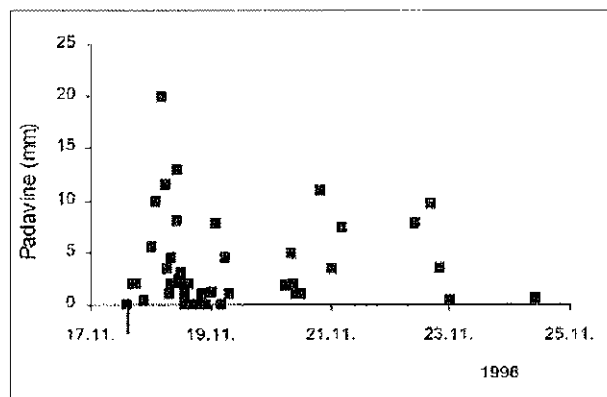
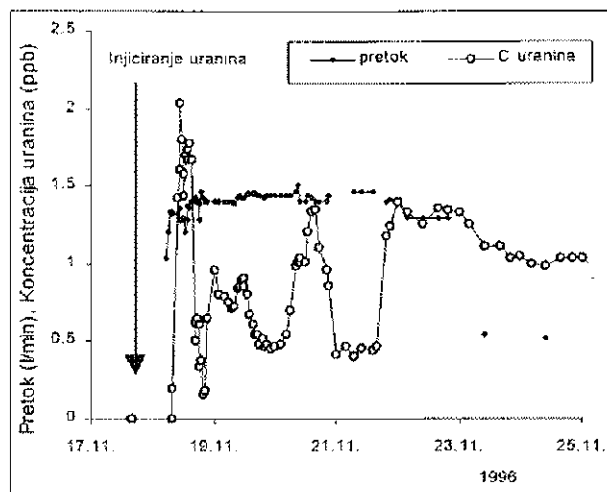
Curke - Trickle	I	J	L	K
Hitrost – Velocity (m/h)	4,3	0,67	1,02	2
Hitrost – Velocity (cm/s)	0,12	0,02	0,03	0,06

Curke J

Po injiciranju so se prve sledi uranina pojavile v curku J 19. novembra ob 11.00, kar je 24 ur za reakcijo pretoka, koncentracija pa je nato hitro naraščala in oblikoval se je izrazit sledilni val brez večjih nihanj koncentracije, kot smo to zabeležili v curku I (Sl. 9). Šele ko je pretok curka v posameznem vrhu dosegel maksimalno vrednost, je začela naraščati tudi koncentracija uranina, sam vrh sledilnega vala pa se je oblikoval v času upadanja pretoka. Najizraziteje se je oblikoval prvi vrh sledilnega vala, kasnejši vodni valovi pa so povzročili oblikovanje manjših vrhov ob siceršnjem trendu upadanja koncentracije uranina. Dne 20. januarja 1997 je bila koncentracija uranina 0,01 ppb, po padavinah je ponovno porasla, 21. februarja pa upadla pod mejo določljivosti. Po prvih intenzivnejših padavinah, ki so sledile maja, smo v curku spet odkrili sledi uranina, vendar pa je koncentracija ponovno hitro upadla pod mejo določljivosti. Ponovno smo sled uranina določili še novembra, eno leto po injiciranju uranina in po izdatnih in intenzivnih padavinah, vendar tedaj točke J nismo podrobneje vzorčevali.



Sl. 6: Curke I: krivulja pretoka in sledilna krivulja.
Fig. 6: Trickle I: discharge curve and a tracer recovery curve.



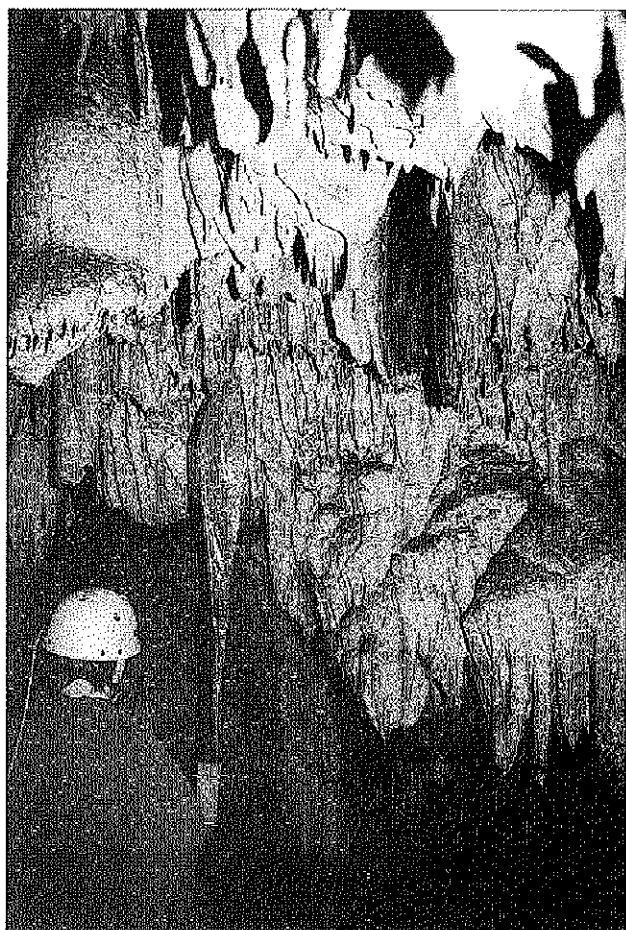
Sl. 7: Curke I: podroben potek pretoka, koncentracije uranina in padavin prvi teden po injiciranju.

Fig. 7: Trickle I: a detailed discharge curve and tracer recovery curve.

Navidezna hitrost pretakanja v curke J glede na prvi pojav uranina je bila 0,058 cm/s oz. 2,1 m/h, glede na doseženo maksimalno koncentracijo pa 0,019 cm/s oz. 0,67 m/h (Tab. 3).

Kapljanje L

Prvi pojav uranina v kapljanju L smo zabeležili hkrati s povečanjem pretoka 18. novembra ob 18.00 (Sl. 10). Koncentracija uranina je v 13 urah porasla na 0,045 ppb. Povečanje pretoka do maksimalne vrednosti 12 ml/min je povzročilo upad koncentracije uranina, ki je ponovno porasla do maksimalne vrednosti 0,05 ppb ob upadu pretoka do 4,5 ml/min. Ob upadanju pretoka do 3 ml/min je upadala tudi koncentracija uranina, ki pa je ponovno porasla že ob povečanju pretoka na 4 ali 5 ml/min v decembru. Ob koncu decembra, ko smo končali z zajemanjem vzorcev, je bila koncentracija v upadanju in je dosegala vrednost 0,01 ppb.



Sl. 8: Ročno zajemanje vzorcev in meritve pretoka na točki J (Foto: J. Kogovšek).

Fig. 8: Manual sampling and discharge measurements at point J (Photo: J. Kogovšek).

Navidezna hitrost pretakanja v kapljanje L je bila glede na prvi pojav uranina 0,09 cm/s oz. 3,3 m/h, glede na pojav maksimalne koncentracije pa 0,028 cm/s oz. 1,02 m/h (Tab. 3).

Curek K

Curek K je občasen in je bil v času injiciranja uranina suh. Prvi vzorec, voda, ki je skozi curek pritekla do 18. novembra ob 14.30, ni vseboval uranina. Prvo sled uranina smo določili že čez 1 uro, čez 3 ure pa je ob najvišjem pretoku dosegel že koncentracijo 0,075 ppb. Ob upadanju pretoka je koncentracija uranina nekoliko zanihala in dosegla pri pretoku 44 ml/min maksimalno vrednost 0,1 ppb, nato pa upadala do 22. novembra, ko je pri pretoku 6 ml/min dosegla vrednost 0,035 ppb. Naslednjega dne je curek presahnil.

V začetku decembra je bil curek zopet aktiven, koncentracija uranina pa je bila pod mejo določljivosti.

Dne 16. in 17. decembra pa smo ob porastu pretoka zopet izmerili sledi uranina. Nato pa je bila koncentracija uranina do konca januarja, ko je curek presahnil, pod mejo detekcije.

Navidezna hitrost pretakanja v curek K je bila glede na prvi pojav uranina 0,1 cm/s oz. 3,6 m/h ter glede na maksimalno koncentracijo uranina 0,06 cm/s oz. 2 m/h (Tab. 3).

RAZPRAVA IN ZAKLJUČKI

Primerjava (vodnih valov) reagiranja pretokov curkov I, J, K in L

Kar 89 mm dežja, ki je padel 18. novembra, glavčina kot intenziven dež nekaj ur po polnoči, je bil razlog za reakcijo opazovanih curkov in kapljanj v Postojnski jami. Najprej je reagiral curek I, curek J je zaostajal za njim 6 ur, kapljanje L in občasn curek K pa za 14 ur. Najhitreje je naraščal pretok curka I, nekoliko počasneje in stopničasto pa pretok curka J in kapljanja L (Sl. 4).

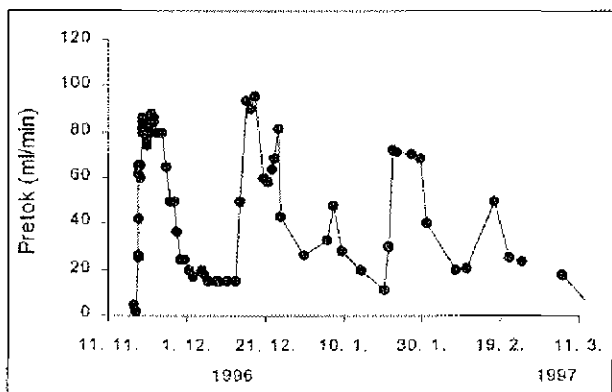
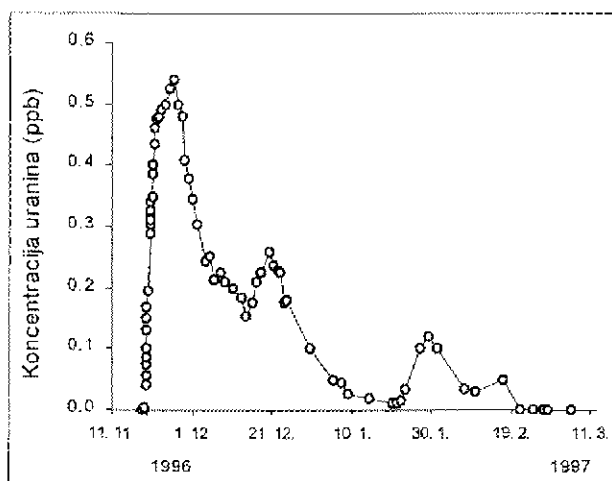
Po doseženih maksimalnih pretokih curkov I in J kljub kasnejšim ponovnim intenzivnejšim padavinam ni prišlo do nadaljnega naraščanja pretokov, ampak do daljšega vztrajanja na maksimiranih pretokih. Curek I je vztrajal na pretoku nekoliko nad 1,4 l/min dobre 3 dni, curek J pa na pretoku nekoliko nad 80 ml/min 5 dni. Curek I reagira na padavine najhitreje in najizraziteje in začne kasneje tudi hitreje in močneje upadati kot curka J in L. Tak način pretakanja je posledica močnejšega dušenja padavin pri pretakanju padavin v curek J in se izraziteje v kapljanje L kot v curek I.

Pretok občasnega curka K je reagiral skoraj sočasno s kapljanjem L, vendar zelo izrazito. Pretok pa je nato hitro upadal, in ko je začel pretok curka L upadati, je curek K že presahnil. Očitno ta curek odvaja le visoke vode, ki se odtekajo v tej smeri. Skozi kapljanje L je odtekalo le do 12 ml/min vode, medtem ko je večji del visoke vode (do 128 ml/min) odtekal skozi občasn curek K.

Primerjava sledilnih krivulj uranina opazovanih curkov

Iz slike 5 je razviden potek uranina v vseh curkih oz. kapljanjih, kjer se je pojavil I, J, K in L. Najizraziteje, v največjih koncentracijah in z največjimi nihanjem se je pojavil v curku I, ki je očitno najprej nastal prevodnik s površja v 100 m globlje podzemlje. Uranin smo v tem curku ugotavljali več kot eno leto.

Opazno dušen, zvezen pojav uranina smo ugotavljali v curkih J in L, vendar izraziteje v 10-krat višjih koncentracijah v curku J. Padavine so nekaj uranina potisnile tudi v občasn curek K, vendar je njegova koncentracija sočasno s pretokom upadala in ni oblikovala sledilne krivulje z več vrhovi kot pri curkih J in L (Sl. 9, 10, 11).



Sl. 9: Curek J: krivulja pretoka in sledilna krivulja.
Fig. 9: Trickle J: discharge curve and tracer recovery curve.

Ugotovljene hitrosti pretakanja glede na pojav sledila in količina povrnjenega uranina

Iz sledilnih krivulj smo lahko izračunali hitrosti pretakanja v posamezne curke. Ugotovili smo, da se je v danih razmerah voda s sledilom kar 4-krat hitreje pretakala skozi curek I kot skozi curka J in L (Tab. 3) in da so te hitrosti opazno manjše kot v primeru sledilnega poskusa 1993 (Knez et al., 1995), ko smo sledilo zalili s cisterno vode in simulirali razlitje topne snovi ob nesreči.

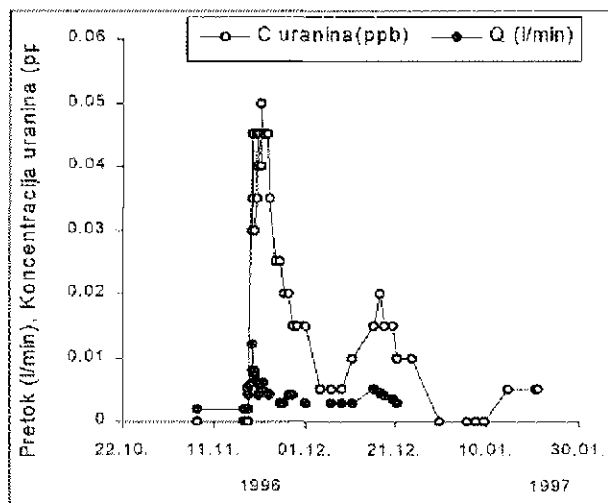
Sledilne krivulje curkov in meritve pretokov kažejo, da je bil količinsko najpomembnejši prenos sledila po prevodniku curka I, sledi curek J, najslabši pa po kapljanju L. Vendar pa je v enem mesecu po injiciranju skozi curek I izteklo le 0,1 % injiciranega sledila, kar v takih razmerah pomeni dolgotrajen prenos snovi v manjših količinah.

ZAKLJUČEK

Rezultati opisanega sledenja v naravnih razmerah so pokazali način pretakanja vode in prenos topne snovi, v našem primeru uranina, skozi 100 m debel apnenec. Tako se prenašajo v notranjost krasa, kjer so zaloge vode, razpoložljive topne snovi s kraškega površja, npr. topne komponente iz najrazličnejših odlagališč (Kogovšek, 1996), gnojila in zaščitna sredstva, ki se uporabljajo v kmetijstvu, onesnaženje s cestnih in parkirnih površin in drugo. Čeprav je najhitrejši prenos po najbolj prepustnih prevodnikih, pa tudi v takih primerih traja izpiranje snovi do vzpostavitve osnovnega stanja zelo dolgo. V primeru onesnaženja nad Kristalnim rovom Postojnske jame še 8 let po odstranitvi vira onesnaženja ni vzpostavljeno izhodno stanje. V takih primerih onesnaževanja ni hitrih, katastrofalnih posledic. Ker pa se onesnaženje dalj časa zadržuje v kraškem masivu, pomeni akumulacijo onesnaženja v krasu in njegovo dolgotrajno spiranje.

Sledenje, kjer smo sledilo v času pol ure zalili z večjo količino vode, je pravzaprav simulacija razlitja topne snovi ob raznih nesrečah, pogosto v prometnih nesrečah, in je podalo bistveno drugačen prenos onesnaženja kot ob spiranju onesnaženja s padavinami. Izsledki so tako praktično uporabni v primerih, ko pride do večjih razlitij na kraškem površju (Kogovšek, 1995b). V takih primerih gre za hitrejši prenos onesnaženja, posebno po bolj prepustnih prevodnikih.

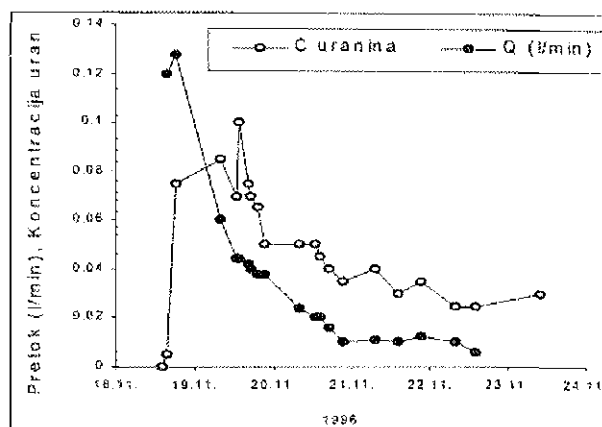
Lahko zaključim, da se oba načina izvedbe sledenja, ko injiciramo sledilo na kraškem površju brez aktivnega vodnega toka, dopolnjujeta in nam dajeta zelo uporabne informacije o pretakanju topnih snovi skozi vadozno cono krasa v različnih razmerah.



Sl. 10: Kapljanje L: nihanje pretoka in sledilna krivulja.
Fig. 10: Drip L: discharge oscillations and tracer recovery curve.

Sl. 11: Občasni curek K: ob pojavu vode v curku K po padavinah, smo zabeležili tudi pojav uranina.

Fig. 11: Seasonal trickle K: when water appeared in trickle K after rainfall the uranin also appeared.



HOW TO DETERMINE THE WAY OF PERCOLATION AND TRANSPORT OF SUBSTANCES BY WATER TRACING TEST IN NATURAL CONDITIONS

Janja KOGOVSĚK

Karst Research Institute of the ZRC SAZU, SI-6230 Postojna, Titov trg 2

SUMMARY

The water tracing test carried out in June 1993 indicated connection of surface with trickles and drippings 100 m deeper in Postojnska jama and also pattern of water and tracer flow when a greater amount of water is added. Such circumstances occur during spill of greater quantities of substances in event of traffic or other accidents. Water tracing on November 17, 1996 was carried out in natural conditions; 15 g of uranin were dissolved in a small amount of water and injected into a sinking stream at the surface. We waited until the tracer was washed out by precipitations as this simulates pattern of flow when rainfall washes soluble substances from various dumping places. The samples were taken at nine different sites named G, H, I, J, K, L, M, N, and O and tracer reappeared in trickles I, J, K and L (Fig. 1).

On November 18, there was 89 mm of rain, most of it as an intensive shower some hours after midnight; this rain affected the reaction of observed trickles and drippings in Postojnska jama. The first to react was trickle I, after 6 hours trickle J, while drippings L and seasonal trickle K were delayed for 14 hours. The fastest to increase was trickle I, and slightly slower trickle J and dripping L (Fig. 4). When trickles I and J reached their maximum discharge, there was no further increase in spite of heavy rain that followed and they remained for some time at the same maximum. Trickle I persisted with the discharge slightly above 1400 ml/min for more than 3 days, and trickle J at more than 80 ml/min for 5 days. As trickle I is the first to react in a most distinctive way to rainfall it also decreases faster and stronger than trickles J and L. The pattern of flow into trickle J and even more into dripping L shows strongly suffocated rainfall.

The seasonal trickle K reacted almost at the same time as dripping L. When the discharge through L started to decrease, trickle K was already almost dry. Obviously this trickle conveys only high waters flowing in this direction. Through dripping L only up to 12 ml/min of water was drained, while larger amount of high waters (up to 128 ml/min) flowed through the seasonal dripping K.

Figure 5 shows the uranin drainage through all the trickles and drippings where the tracer occurred. Most distinctly, in highest concentrations and with greatest variations, the uranin appeared in trickle I, which is obviously the most permeable conduit from the surface underground, 100 m deeper. The uranin was being detected in this trickle for more than one year. Visibly suffocated yet continuous appearance of the uranin was detected in trickles J and L, yet concentrations in trickle J were 10 times higher. The rainfall pushed some of the uranin into the seasonal trickle K, but its concentration decreased together with discharge decrease and did not shape the tracer recovery curve with many peaks as it happened at trickles J and L (Figs. 9, 10, 11).

The dye recovery curve allowed to calculate the velocity of drainage in single trickles. We stated that at given circumstances the water with tracer flowed through trickle I 4 times faster than through trickles J and L (Tab. 3) and that these velocities are considerably smaller than those in 1993, when tracer was watered by a road tanker thus simulating the flow pattern of soluble substance during an accident. Regarding the quantity, most of the tracer flowed through the conduit of trickle I, followed by trickle J and the least through dripping L. But after one month only 0.1% of the injected tracer reappeared through trickle I.

Key words: karstology, karst water, water tracing, Postojnska jama cave, Slovenia

LITERATURA

- Knez, M., J. Kogovšek, A. Kranjc, A. Mihevc, S. Šebela, & N. Zupan Hajna (1995):** National Report for Slovenia.- COST Action 65, Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas. Final Report, European Commission, 247-260, Luxembourg.
- Kogovšek, J. (1995a):** The Surface Above Postojnska jama and its Relation with the Cave. The Case of Kristalni rov. Bossea MCMXCV, Atti del simp. internationale grotte turistiche e monitoraggio ambientale. Cigna, A. A. (ed.), 29-39, Frabosa Soprana.
- Kogovšek, J. (1995b):** Izlitija nevarnih snovi ogrožajo kraško vodo. Annales, 7, 141-148.
- Kogovšek, J. (1995c):** Podrobno spremljanje kvalitete vode, odtekajoče z avtoceste in njen vpliv na kraško vodo. Annales, 7, 149-154.
- Kogovšek, J. (1996):** Kako smetišča ogrožajo kakovost kraške vode. Annales, 9, 111-114.
- Kogovšek, J. (1997a):** Pollution transport in the vadose zone: An example from Postojnska jama - Slovenia. Karst Waters & Environmental Impacts, Proceedings of 5th International Symposium and Field Seminar on Waters and Environmental Impacts, Antalya, Turkey, 10-20 September 1995. Gunay, C. & A. I. Johnson (eds.), 161-165, Balkema, Rotterdam.
- Kogovšek, J. (1997b):** Water tracing tests in vadose zone. Tracer Hydrology 97, Proceedings of the 7th International Symposium on Water Tracing, Portorož, Slovenia, 26-31 May 1997. Kranjc, A. (ed.), 167-172, Balkema, Rotterdam.
- Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (1992):** 18th Edition, Washington.