

# Raziskave pretakanja padavin skozi vadozno cono Kraških vodonosnikov

Janja Kogovšek\*

## Povzetek

Kraški vodonosniki dajejo v Sloveniji velik del pitne vode. Zato je zelo pomembna kakovost njihove vode. Dolgoročno varovanje teh vodnih virov je možno le na osnovi dobrega poznavanja njihovega delovanja. Pogosto so kraški vodonosniki zelo kompleksni sistemi, ki se napajajo z infiltracijo padavin in s površinskimi vodnimi tokovi. Dinamika napajanja z vodnimi tokovi je že razmeroma dokaj dobro poznan proces, pretakanje infiltriranih padavin in z njimi prenos snovi neposredno s kraškega površja, pa je še slabo raziskano. Prispevek podaja raziskave pretakanja padavin skozi 100 m debelo vadozno cono Postojnske jame. Obsega rezultate zveznih meritev padavin na površju in pretokov curkov v jami v času štirih zaporednih hidroloških let, ki so pokazale dinamiko pretakanja padavin skozi vadozno cono ob različnih kombinacijah pogojev na površju in v vadozni coni. Ugotovljeno je bilo, da prihaja v deževnih obdobjih ob dobro namočeni prsti in relativno zapolnjeni vadozni coni do zveznega pretakanja po celotni hierarhiji razpok, medtem ko prihaja v sušnih obdobjih do pomembnih procesov shranjevanja vode v vadozni coni. Na dinamiko pretakanja vode pa je neposredno vezan tudi prenos kontaminantov.

## Uvod

Okoli 12 % kontinentalnega dela našega planeta gradijo karbonatne kamnine, v Evropi 35 % in v Sloveniji okoli 44 %, in kar četrtnina svetovnega oz. polovica slovenskega prebivalstva se oskrbuje z vodo iz kraških vodonosnikov. Ti so pogosto obsežni in zelo heterogeni vodni sistemi, saj se poleg napajanja z infiltracijo padavin napajajo tudi z rekami ponikalnicami, vanje pa lahko zatekajo tudi vode z nekraškega sveta. Vsi ti viri napajanja pa pomenijo tudi možnost vnosa onesnaženja v vodonosnik. Vodni tokovi pomenijo hiter prenos onesnaženja, pomemben pa je tudi neposreden prenos onesnaženja s površja skozi vadozno cono vodonosnika, ki je bil do sedaj podcenjen.

Raziskave vadozne cone v preteklosti so nakazovale, da se padavine, ki se sorazmerno hitro infiltrirajo v vadozno cono, lahko v tem delu vodonosnika zadržijo tudi daljši čas (Mangin, 1973, Bakalowicz et al., 1974, Kogovšek in Habič, 1981, Williams, 1983, Kogovšek, 1982, 1983, 1984, 1990, 1994b, 1994a, 2000, Pezdič et al., 1984, Smart in Friedrich 1986, Klimchouk 1995, Stichler et al., 1997, Jeannin in Grasso 1995, Maloszewski et al., 2002, Perrin et al., 2003a, Trček 2003). To znanje je bilo pridobljeno z opazovanjem izvirov, z opazovanji v vadozni coni le krajši čas, ali pa dolgotrajnejše raziskave niso zajele curkov z bistveno različno prepustnostjo zaledja, ki bi bili reprezentativni za celotno vadozno cono. Zato sem zasnovala lastne raziskave na območju Postojnske jame. V okviru večparametrskih raziskav, ki so temeljile na zveznih meritvah in analizah prek več zaporednih hidroloških let, sem spoznala tudi dinamiko pretakanja infiltriranih padavin in se posebej posvetila dogajanju v vodnih valovih po padavinskih dogodkih.

---

\* Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Titov trg 2, 6230 Postojna

## Območje raziskav in metode dela

Raziskave pretakanja padavin skozi vadozno cono krasa so potekale v Postojnski jami z debelino vadozne cone 100 m. Debelina jamskega stropa oz. debelina vadozne cone je bila določena na osnovi stabiliziranega poligona v jami in prenosa poligonskih točk na površje. Izmera elementov poligona je bila napravljena z elektronskim razdaljemerom NIKON DTM-A10 LG (Drole, 1992). Na površju nad raziskovalnim poligonom v jami so potekale meritve padavin z dežemerom s shranjevalnikom podatkov HOBO Event Logger RG2-M, podjetja ONSET, ki zabeleži vsakih 0,2 mm padavin (slika 2). Podatki padavin so bili osnova za izračun efektivne infiltracije. Izračun je bil narejen po metodologiji, ki jo je opisala M. Petrič (2001, 2002). Sočasno so v jamskem rovu potekale meritve pretoka in fizikalnih parametrov več curkov. Za dolgotrajno zvezno spremljanje sem izbrala tri reprezentativne curke: večji nestalen curek I s pretokom do 4000 ml/min, stalni curek J s pretokom do 130 ml/min (Slika 3) in stalni curek L s pretokom do 10 ml/min.

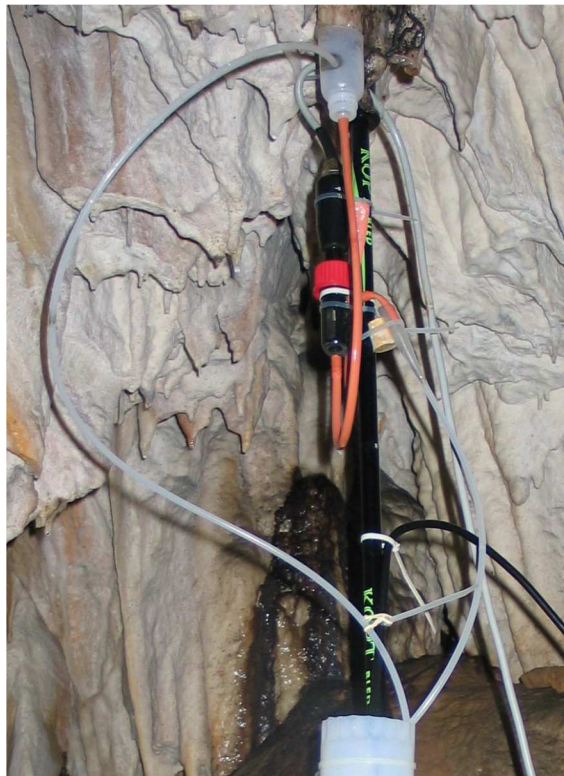
Curek I doteka vrh kope, kjer smo naredili manjšo zaježitev z vgrajenim prelivom. Ob njem smo pritrdili sondo za merjenje nivoja za izračun pretokov (Gealog S podjetja Logotronic). V neposredni bližini smo pritrdili še kombinirano sondo (YSI) za meritve temperature, specifične električne prevodnosti - EC. Vodo curka J smo speljali v posodo z majhnim iztokom, v kateri smo s sondo merili višino vode in EC vsakih 15 minut (Gealog S). Enako kot za curek I sem z občasnimi vzporednimi ročnimi meritvami pretoka izdelala umeritveno krivuljo in izračunala funkcijsko odvisnost pretoka od nivoja za izračun pretokov. Pretok curka L oz. kapljanja sem merila najprej s prirejenim evaporimetrom z mehansko uro, kasneje pa z dežemerom s shranjevalnikom podatkov HOBO Event Logger RG2-M.



Slika 1: Območje raziskav (bela polna puščica), padavinska postaja (črtkana bela puščica) in za orientacijo vhod v Postojnsko jamo (črtkana siva puščica)



Slika 2: Meritve padavin na površju nad raziskovalnim poligonom v Postojnski jami



Slika 3: Meritve pretoka, temperature in električne prevodnosti curka J v Postojnski jami, 100 m pod površjem

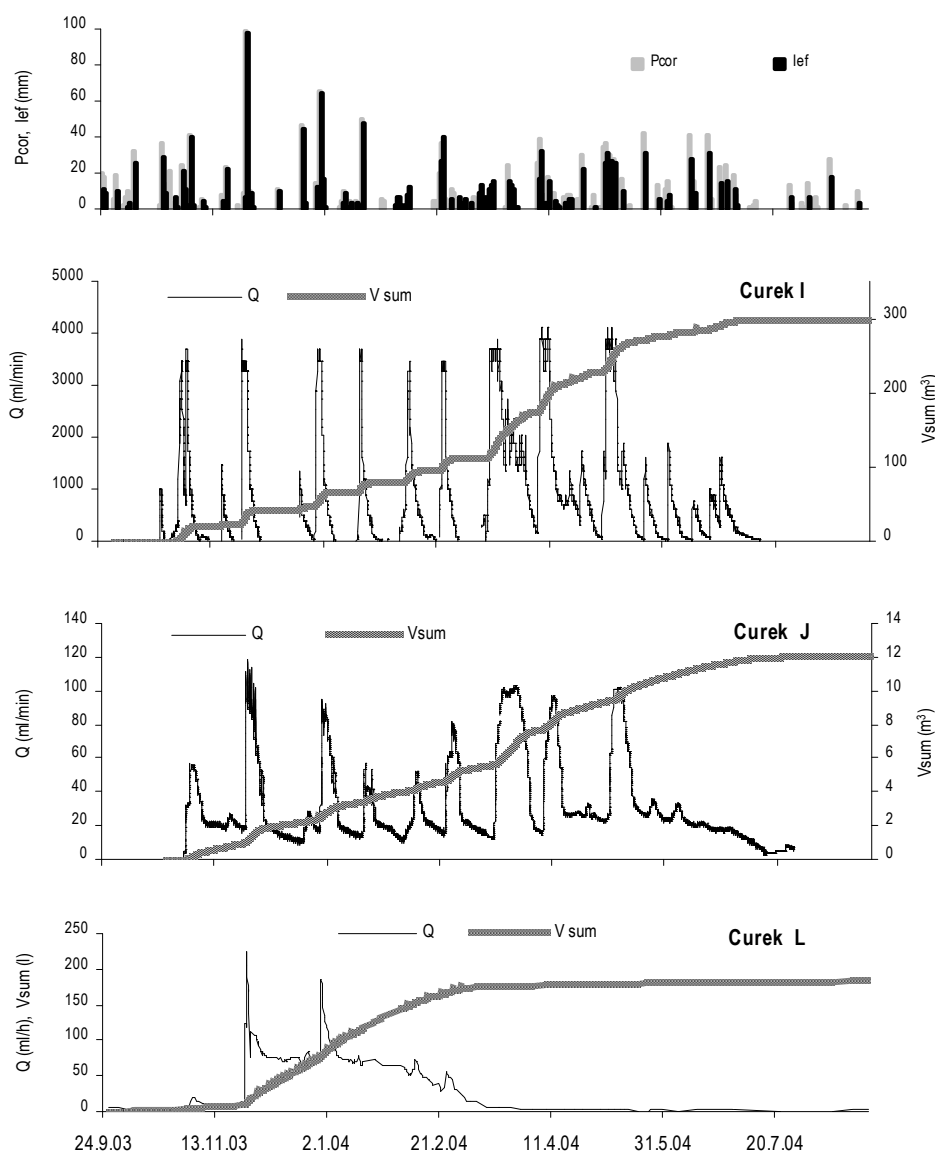
## Rezultati

Letna količina padavin v hidrološkem letu 2003-04 je bila 1618,3 mm, letna količina efektivno infiltriranih padavin pa 1225,9 mm (75,8 %). Pozno jesenske in zgodnje zimske padavine dokaj dobro sovpadajo s količino efektivno infiltriranih padavin ( $I_{ef}$ ). Večja

odstopanja nastopajo v času snežnih padavin in nizkih temperatur, spomladi v času prebujajoče se vegetacije s povečano transpiracijo in v toplih poletnih mesecih s povečano evapotranspiracijo (Slika 4).

Občasni curek I s pretokom do 4000 ml/min na dovolj izdatne padavine reagira najhitreje. V namočenih obdobjih oblikuje vodne valove s hitrim naraščanjem pretoka, ko doseže pretok maksimalno vrednost v 6 do 60 urah, ob izostanku padavin pa hitro presahne. V jesensko-zimskem obdobju hidrološkega leta 2003-04 je 5-krat presahnil za 3 do 15 dni (Slika 4).

V manjšem stalnem curku J s pretokom do 130 ml/min, kjer je letna iztekla količina več kot 20-krat manjša od curka I, prihaja do močnega dušenja infiltriranih padavin. Curek prek leta nikoli ne presahne, na padavine pa reagira z večjimi časovnimi zamiki v primerjavi s curkom I. Za njegove vodne valove je značilno počasno naraščanje in upadanje pretoka.

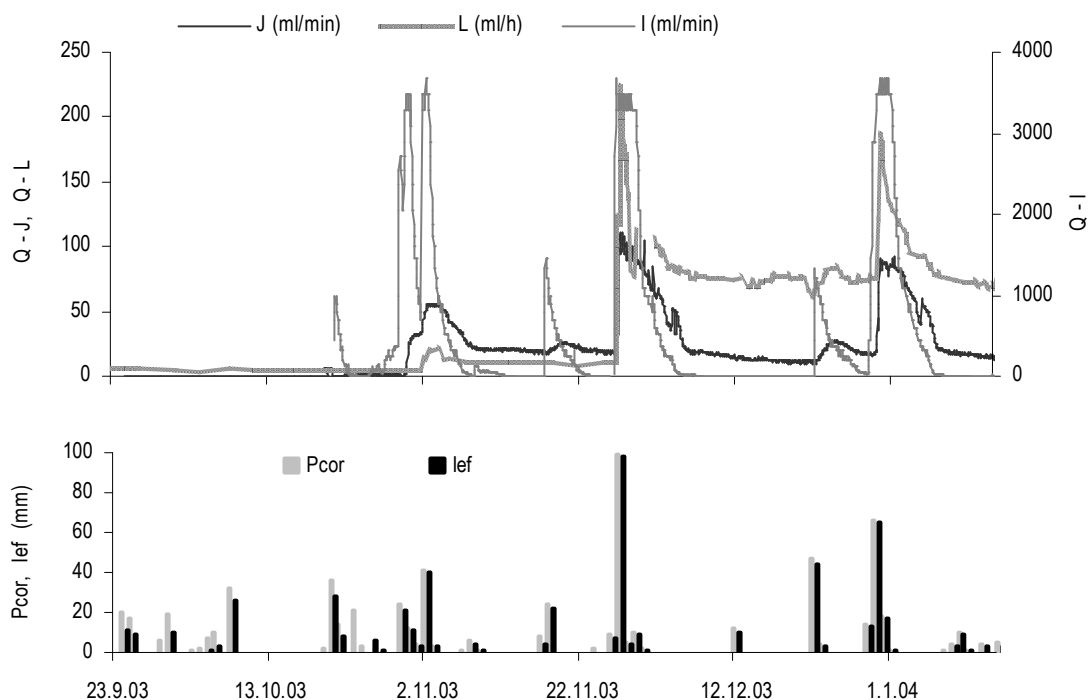


Slika 4: Padavine ( $P_{cor}$ ), efektivna infiltracija ( $I_{ef}$ ) ter hidrogrami s kumulativno krivuljo ( $V_{sum}$ ) opazovanih curkov I, J in L za hidrološko leto 2003-04

Po daljšem poletnem sušnem obdobju je konec oktobra 2003 na padavine reagiral 2,5 dni za curkom I (slika 5), v dobro namočenih obdobjih pa je ta časovni zamik opazno manjši. Hidrograma curkov I in J sta si v pojavljanju zaporednih vodnih valov dokaj podobna. Le ko curek I presahne za krajša obdobja, je pretok curka J v počasnem upadanju in ne upade pod 10 ml/min, razen konec hidrološkega leta, ko dosega minimalne vrednosti.

Največji vodni valovi SO nastopaLI pri curkih I in J v spomladanskem obdobju od srede marca dalje, čeprav je bila tedaj povprečna dnevna efektivna infiltracija celo nekoliko manjša (4,3 mm/dan) kot v jesensko-zimskem obdobju (4,5 mm/dan). V spomladanskem obdobju je izteklo skozi curek I 1,6-krat več, skozi curek J pa 1,1-krat več vode kot v jesensko-zimskem obdobju, kar se vidi tudi iz kumulativnih krivulj iztekle prenikle vode. Primerjava kumulativnih krivulj obeh curkov nakazuje bolj enakomerno iztekanja infiltriranih padavin skozi curek J, kar pomeni večjo homogenizacijo v vadozni coni. To so potrdile tudi meritve drugih parametrov.

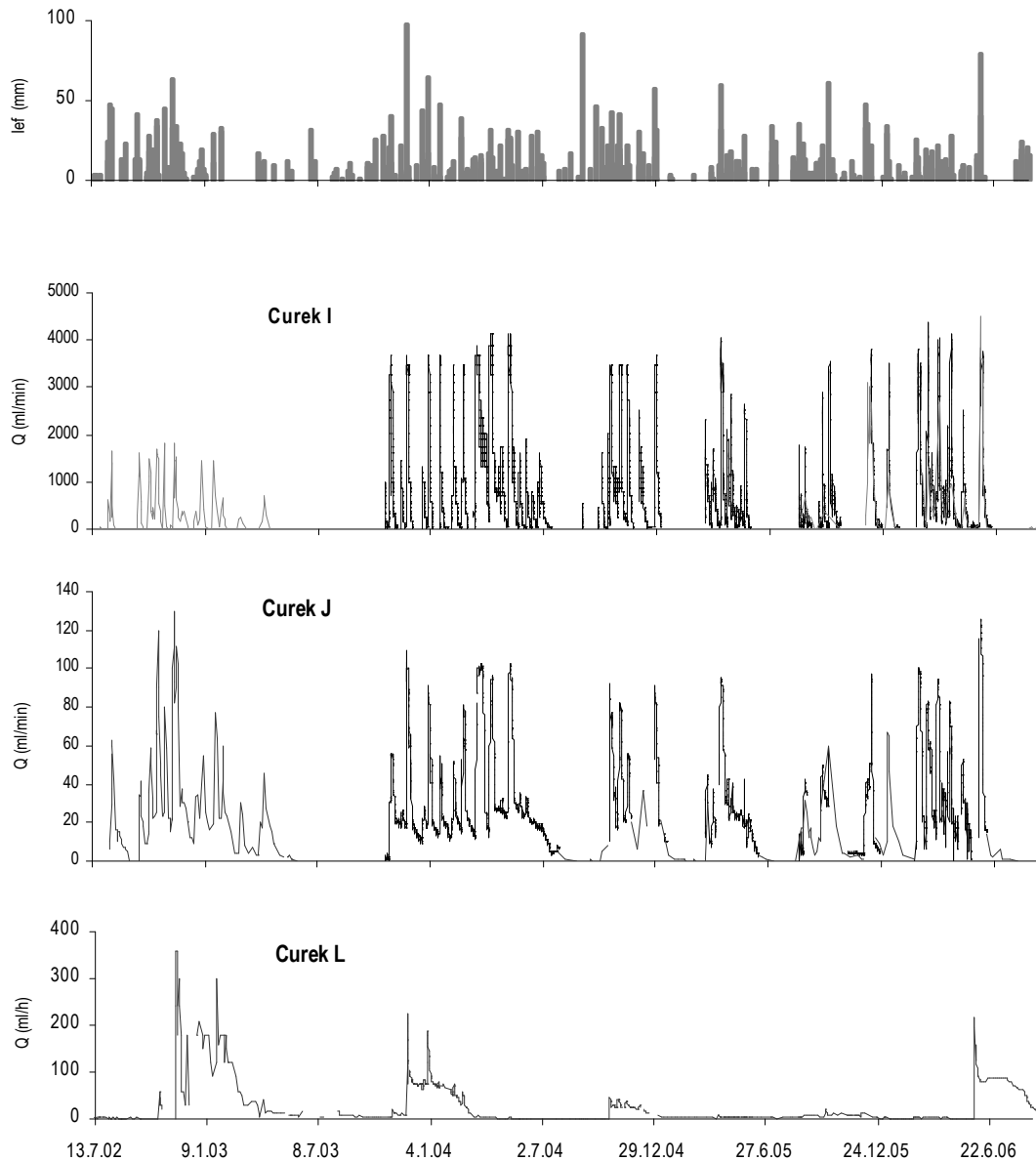
Bistveno drugačen je hidrogram curka L (Slika 4). Na padavine po poletnem sušnem obdobju oktobra 2003 je minimalno reagiral, skoraj 3 dni za curkom J in 5 dni za curkom I. Izrazita reakcija je sledila šele konec novembra po naknadnih izdatnih padavinah (slika 5). V obdobju treh in pol mesecev je nato prišlo do povečanega zveznega iztekanja vode z dvema izrazitima viškoma po najizdatnejših padavinah. Kasnejše večje padavine so se le minimalno odrazile v pretoku, ki je stalno počasi upadal. To nakazuje, da je v danih razmerah prihajalo predvsem do shranjevanja vode v dokaj spraznjenem zaledju curka L. Le-to se zaradi slabe prepustnosti počasneje zapolnjuje kot zaledje curkov z bolj prepustnimi prevodniki, ki se hitreje zapolni in tudi hitreje sprazni.



Slika 5: Reakcija pretokov značilnih curkov I, J in L na padavine po daljšem sušnem poletnem obdobju.

V sledečih dveh hidroloških letih so upadali letna količina padavin, količina efektivno infiltriranih padavin in delež infiltracije. V hidrološkem letu 2004-05 in v začetku

hidrološkega leta 2005-06 smo tako beležili skromnejše vodne valove pri curkih v jami, šele nato pa so se zopet oblikovali izdatnejši (Slika 6). Tudi potek EC je bil vzporedno bistveno drugačen. Vse to nakazuje drugačen način infiltracije, pomembne procese shranjevanja in posledično drugačno iztekanje vode iz zaledja.



Slika 6: Dnevna efektivna infiltracija in hidrogrami opazovanih curkov 100 m pod površjem v obdobju štirih zaporednih hidroloških let

Posamezni tipi curkov v vadozni coni so prispevali v globlje dele kraškega vodonosnika v zaporednih hidroloških letih različne količine vode. Po letni količinski izdatnosti, ob upoštevanju treh hidroloških let, so curki, kot je curek I, v povprečju 23-krat izdatnejši od curkov, kot je curek J, in curki, kot je curek J, kar 80-krat izdatnejši, kot so curki, ki jih predstavlja curek L. Pri tem je potrebno upoštevati tudi pogostost posameznih tipov pretakanja. Če so curki tipa L 80-krat pogostejši kot curki tipa J, bi pomenilo, da v sušnih obdobjih, ko so curki, kot je curek I, običajno suhi, prispevajo v kraški vodonosnik vsaj

enako pomemben del vode kot curki tipa J, občasno pa je prispevek curka L lahko večji, kot je bilo poleti 2006 (Slika 6).

Razmerje med količino vode, ki sta jo v zaporednih hidroloških letih prispevala curka I in J, kaže na vse večji delež stalnega, manjšega curka J. To pomeni, da v bolj sušnih letih z manj padavinami, ko je posledično tudi količina infiltriranih padavin vse manjša, pomembnejši prispevek vode v vodonosnike dajejo manjši stalni curki (kot je curek J) oz. se vodonosniki napajajo predvsem z dotokom vode po mreži manj prepustnih razpok.

## Sklepi

Na osnovi rezultatov zveznih meritev padavin na površju ter pretokov v jami smo prišli do pomembnih spoznanj.

Dinamika iztekanja vode iz vadozne cone krasa je neposredno vezana na dotok sveže vode, a ni odvisna le od intenzivnosti in količine učinkovito infiltriranih padavin, temveč tudi od vsakokratne namočenosti prsti ter zapolnjenosti vadozne cone. Le ob dobri namočenosti prsti in ustrezni zapolnjenosti vadozne cone prihaja do zveznega iztekanja po celotni hierarhiji različno prepustnih razpok v vadozni coni. Ob slabi namočenosti prsti, predvsem v sušnih obdobjih, se padavine infiltrirajo le po bolj prepustnih prevodnikih skozi prst in vstopajo po prepustnejših razpokah v vadozno cono, kjer se pretežno shranjujejo.

Primerjava dnevne učinkovite infiltracije na obravnavanem poligonu in hidrogramov opazovanih curkov v štirih zaporednih hidroloških letih je pokazala na bistveno različno pretakanje po različno prepustnih razpokah v vadozni coni (Slika 6). Največji, nestalni curek I (maksimalni pretok okoli 4 l/min) po padavinah hitro odvajava v zaledju shranjeno vodo, s katero se v začetnem delu vodnih valov ob največjih pretokih mešajo tudi sveže infiltrirane padavine. Vendar pa je delež teh v vodnih valovih dosegal le do največ 18 % (meritve električne prevodnosti). Manj izdatni curki, ki so stalni, kot je curek J (maksimalni pretok 130 ml/min), reagirajo na padavine z določenim časovnim zamikom za večjim curkom I (od 1/2 do 2 dni). Njihova zgradba zaledja omogoča dobro homogenizacijo infiltriranih padavin, kar se je odrazilo tako v pretoku kot v drugih merjenih parametrih. Izotopske analize baznega toka curka J so pokazale, da je povprečni zadrževalni čas več kot eno leto, medtem ko je za curek I le 2,5 meseca. Stalno kapljanje L, z maksimalnim pretokom le nekaj ml/min, ima popolnoma svoj vzorec iztekanja. Do zveznega izdatnega praznjenja njegovega pretežno slabo prepustnega zaledja in oblikovanja obsežnega vodnega vala, ki traja do več mesecev, prihaja občasno (ne vsako leto), šele ko je njegovo zaledje dovolj zapolnjeno in prst namočena, da izdatne in intenzivne padavine potisnejo shranjeno vodo iz njegovega zaledja. Tudi ta tip prevodnikov, čeprav je količinsko zelo skromen, je pa pogost, lahko poleg curkov, kot jih predstavlja curek J, pomembno prispeva vodo v kraške izvire v sušnih obdobjih, ko so bolj prepustni prevodniki suhi (kot je curek I). Vendar pa taki dobro prepustni prevodniki v deževnih obdobjih hitro odvajajo velike količine vode, ko prihaja do učinkovitega spiranja širših zaledij kraških izvirov, saj omogočajo tudi hiter prenos morebitnih kontaminantov ob večjih razredčitvah.

V poletnih sušnih obdobjih, ki trajajo od 2,5 do 6 mesecev, se tudi večja količina manj intenzivnih padavin (do 390 mm padavin oz. do 180 mm učinkovito infiltriranih padavin) pretežno shranjuje v zaledje curkov in prihaja le do minimalnega iztoka iz vadozne cone ali pa ta celo izostane. Tako iz vadozne cone minimalno izteka le že predhodno shranjena voda.



Na osnovi izračunov celoletnih količin infiltriranih padavin in iztekle vode skozi opazovane curke v vadozni coni v treh zaporednih hidroloških letih sledi, da prihaja zaradi razlik v infiltraciji (različna razporeditev, intenzivnost in količina padavin) ter zaradi različnih razmer na površju, v prsti in v vadozni coni, do bistveno različnega razmerja med letno količino vode, ki se infiltrira v zaledje, in tisto, ki izteka skozi vadozno cono in napaja globlje dele vodonosnika. Zvezne in intenzivnejše padavine v času hidrološkega leta pogojujejo dobro namočeno prst in dobro zapolnjenost vadozne cone ter zvezno iztekanje vode iz celotne hierarhije povezanih razpok. Pri tem prihaja do iztekanja tudi iz najslabše prepustnih delov vadozne cone, ki se sicer prazni le občasno ob ustreznih pogojih (hidrološko leto 2003-04). Zato pa se padavine, ki sledijo takemu obdobju, v večji meri porabljajo za zapolnjevanje dokaj spraznjenega zaledja in je posledično iztok predhodno shranjene vode iz vadozne cone šibkejši (celo hidrološko leto 2004-05 in vse do februarja 2006). To potrjujejo tudi meritve EC z bistveno drugačnim potekom, ki nakazuje iztekanje pretežno shranjene vode.

### Zahvala

Raziskave so potekale v okviru programa Raziskovanje krasa (ARRS) in ob podpori Slovenske nacionalne komisije za UNESCO - IHP program.

### Literatura

- Bakalowicz, M., Blavoux, B., Mangin, A. 1974. Apport du traçage isotopique naturel à la connaissance du fonctionnement d'un système karstique – teneurs en oxygène-18 de trois systèmes des Pyrénées, France. *Journal of Hydrology*, 23, 1-2: 141-158.
- Drole, F. 1992: Poročilo o prenosu koordinat jamskega poligona Pisanega rova Postojnske jame na površje.- Arhiv IZRK, 2 str. + 3 priloge, Postojna.
- Jeannin, P.-Y., Grasso, A.D. 1995. Recharge respective des volumes de roche peu perméable et des conduits karstiques, rôle de l'épikarst. *Bulletin d'Hydrologie*, 14, 95-111.
- Klimchouk, A. 1995. Karst Morphogenesis in the epikarstic zone. *Inter. Symp. on changing karst environments, Oxford and Huddersfield. Cave and karst science*, 21, 2: 45-50.
- Kogovšek, J., Habič, P. 1981. Preučevanje vertikalnega prenikanja vode na primerih Planinske in Postojnske jame. *Acta carsologica*. 9: 129-148.
- Williams, P.W. 1983: The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. *Journal of Hydrology*, 61: 45-67.
- Kogovšek, J. 1982. Vertikalno prenikanje v Planinski jami v obdobju 1980/81. *Acta carsologica*, 10: 110-125.
- Kogovšek, J. 1983. Prenikanje vode in izločanje sige v Pisanem rovu Postojnske jame. *Acta carsologica*, 11: 63-76.
- Kogovšek, J. 1984. Vertikalno prenikanje v Škocjanskih jamah in Dimnicah. *Acta carsologica*.12: 49-65.
- Kogovšek, J. 1990. Značilnosti pretakanja padavin skozi strop Taborske jame. *Acta carsologica*, 19: 139-156.
- Kogovšek, J. 1994a. Kombinirano sledenje skozi strop Pivke jame. *Naše jame*, 36: 58-66.
- Kogovšek, J. 1994b. Prenikajoča voda v jamah primorskega krasa. *Annales*, 4, 4: 149-154.
- Kogovšek, J. 2000. Ugotavljanje načina pretakanja in prenosa snovi s sledilnim poskusom v naravnih razmerah. *Annales*, 10, 1=19: 133-142.
- Mangin, A., 1973: Sur la dynamique des transferts en aquifère karstique. *Proc. of the 6th Inter. Cong. of Speleology, Olomuc*, 4: 157-162.
- Perrin, J, Jeannin, P.-Y., Zwahlen, F. 2003a: Epikarst storage in a karst aquifer: a conceptual model based on isotopic data, Milandre test site, Switzerland. *Journal of Hydrology*, 279, 1: 106-124.



- Pezdič, J., Leskovšek-Šefman, H., Dolenc, T., Urbanc, J. 1984. Isotopic study of karst water. Final Report on IAEA Research Contract No.2845/RB. J.Stefan Institute, 47p, Ljubljana.
- Petrič, M. 2001. The role of accurate recharge estimation in the hydrodynamic analysis of karst aquifers. *Acta carsologica*, 30, 1:69-84.
- Petrič, M. 2002. Characteristics of recharge-discharge relations in Karst aquifer. (Zbirka *Carsologica*). Založba ZRC SAZU, 154 p, Postojna-Ljubljana,
- Smart, P.L., Friedrich, H. 1986: Water movement and storage in the unsaturated zone of a maturely karstified carbonate aquifer, Mendip Hills, England, In: Proceedings of the Conference on environmental problems of karst terranes and their solutions, National Water Well Association, 59-87, Dublin.
- Stichler, W., Trimborn, P., Maloszewski, P., Rank, D., Papesch, W., Reichert, B. 1997. Isotopic investigations. *Acta carsologica* 26,1. In: Kranjc A.(Ed) *Karst Hydrogeological Investigations in South-Western Slovenia*, 213-235, Ljubljana.
- Trček, B. 2003. Epikarst zone and the karst aquifer behaviour. A case study of the Hubelj catchment, Slovenia. *Geološki zavod Slovenije*, 100 p, Ljubljana.