

Skladiščenje vode v vadozni coni kraških vodonosnikov - primer izvira Malenščica

Janja Kogovšek*

Povzetek

Pogosto so kraški vodonosniki zelo kompleksni sistemi, ki se napajajo tako z infiltracijo padavin in s površinskimi vodnimi tokovi. Pri pretakanju infiltriranih padavin skozi vadozno cono vodonosnika prihaja tudi do pomembnega skladiščenja vode in iztekanja z večjimi zakasnitvami. Prav ti procesi omogočajo, da imajo kraški izviri vodo tudi v daljših sušnih obdobjih z minimalnimi padavinami. Prispevek podaja dinamiko pretakanja in skladiščenja padavin v 100 m debeli vadozni coni Postojnske jame na osnovi večletnih zveznih meritev pretokov. Te procese primerja z dinamiko iztekanja vode skozi kraški izvir Malenščice, ki se napaja z infiltracijo padavin in s površinskimi tokovi. Poudarek je na sušnih obdobjih, ko reke ponikalnice presušijo ali pa imajo minimalen pretok in se izvir Malenščice napaja predvsem z infiltrirano, uskladiščeno vodo.

Ključne besede: Kras, vodonosnik, vadozna cona, dinamika pretakanja, skladiščenje

Key words: Karst, aquifer, vadose zone, hydrodynamics, storage

Uvod

V Evropi 35 % in v Sloveniji okoli 44 % površja gradijo karbonatne kamnine. Ocenjujejo, da 20 do 25 % svetovne populacije pije vodo iz kraških vodonosnikov (Ford in Williams 2007) in za prihodnost napovedujejo, da se bo ta delež še povečeval (Forti 2007).

Kraški vodonosniki so pogosto obsežni in zelo heterogeni, kompleksni vodni sistemi, ki se napajajo ne le z infiltracijo padavin, ampak tudi z rekami ponikalnicami in vodnimi tokovi, ki vanje zatekajo tudi 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 vezan na dinamiko pretakanja.

Kraški vodonosniki so v Sloveniji pomemben vir pitne vode. Zato je zelo pomembna kakovost njihove vode. V sušnih obdobjih, posebno ko prihaja do dalj časa trajajočih suš v zaporednih letih, pa se na določenih območjih postavlja tudi vprašanje zadostnih količin. Le dobro poznavanje dinamike pretakanja v kraških vodonosnikih je dobra osnova za njihovo načrtno izrabo.

Raziskave vadozne cone v preteklosti so nakazovale, da se padavine lahko v vadozni coni vodonosnikov zadržijo tudi daljši čas (Mangin, 1973, Bakalowicz in ostali, 1974, Kogovšek in Habič, 1981, Williams, 1983, Kogovšek, 1982, 1983, 2000, 2010, Pezdič et al., 1984, Smart in Friedrich 1986, Klimchouk 1995, Stichler in ostali, 1997, Jeannin in Grasso 1995, Maloszewski in ostali, 2002, Perrin in ostali, 2003a, Trček, 2003).

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

Zvezne in sočasne raziskave kraškega izvira Malenščica in curkov prenikle vode z bistveno različno prepustnostjo zaledja v vadozni coni Postojnske jame, 100 m pod površjem, so podale dinamiko pretakanja vode skozi vadozno cono in skozi kraški izvir.

Območje raziskav in metode dela

Malenščica je kraški izvir na Planinskem polju, ki mu je pretok v obdobju 1981-2011 nihal med 1,1 in 11,2 m³/s (Pretoki Malenščice. Medmrežje: <http://vode.arso.gov.si>), in je zajet za oskrbo prebivalstva s pitno vodo. Raziskave pretakanja padavin skozi kraško vadozno cono so potekale na območju Postojnske jame z debelino vadozne cone 100, kjer smo merili curke prenikle vode I, J in L. Curek I v Postojnski jami doteka vrh kope, kjer smo naredili manjšo zajezitev z vgrajenim prelivom. Ob njem smo pritrdili sondo za merjenje nivoja (časovni interval 30 minut) za izračun pretokov ter sondo za meritve temperature in specifične električne prevodnosti (EC). Vodo curka J smo speljali v posodo z majhnim iztokom, v kateri smo s sondo merili višino vode in EC. Z občasnimi vzporednimi ročnimi meritvami pretokov smo izdelali umeritveni krivulji za izračun pretokov obeh curkov. Na površju nad raziskovalnim poligonom v Postojnski jami smo zvezno merili količino padavin.



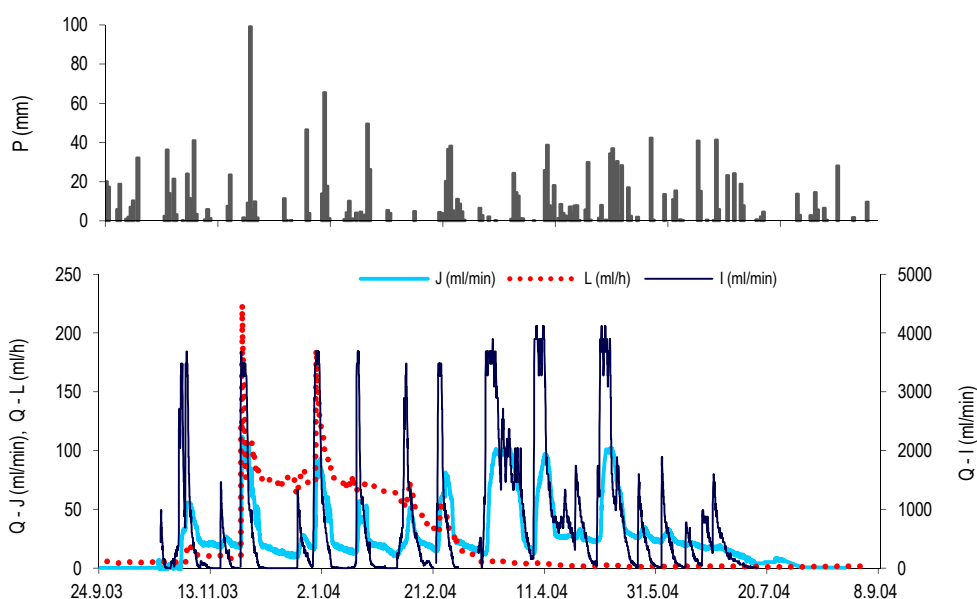
Slika 1: Območje raziskav je bil kraški izvir Malenščica na Planinskem polju in pretakanje padavin na raziskovalnem poligonu v Postojnski jami.

Meritve nivoja, temperature in električne prevodnosti Malenščice so potekale na črpališču s kombinirano sondo YSI in pretoka z 750 Area-Velocity Module v povezavi z

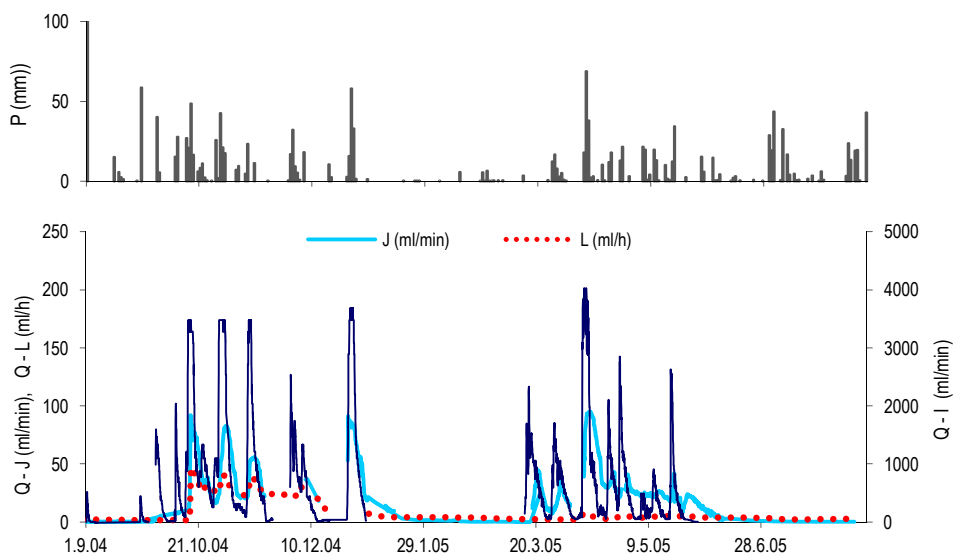
avtomatskim zajemalnikom ISCO 6700. Meritve padavin smo opravljali z dežemerom s shranjevalnikom podatkov HOBO Event Logger RG2-M, podjetja ONSET, ki zabeleži vsakih 0,2 mm padavin. Sočasno so v jamskem rovu potekale zvezne meritve pretoka, temperature in električne prevodnosti (Gealog S podjetja Logotronic) treh reprezentativnih curkov: večjega nestalnega curka I s pretokom do 4000 ml/min, stalnega curka J s pretokom do 130 ml/min in stalnega curka L s pretokom do 10 ml/min. Pretok curka L so potekale najprej s prirejenim evaporimetrom z mehansko uro, kasneje pa z dežemerom s shranjevalnikom podatkov HOBO Event Logger RG2-M.

Rezultati

Meritve padavin na površju nad Postojnsko jamo in pretokov izbranih curkov I, J in L 100 m pod površjem so v hidrološkem letu 2003-04 (1618,3 mm) z zvezno razporeditvijo padavin pokazale oblikovanje zaporednih poplavnih valov v curkih I in J (slika 2).



Slika 2: Padavine na površju in hidrogrami curkov I, J in L v hidrološkem letu 2003-04.

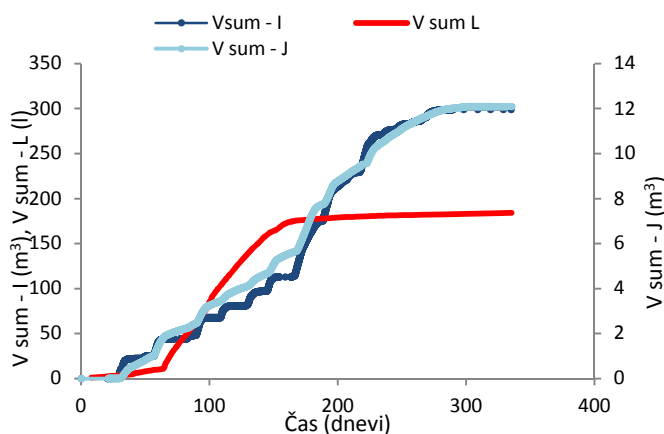


Slika 3: Padavine na površju in hidrogrami curkov I, J in L v hidrološkem letu 2004-05.

Pretok najmanjšega curka L pa je nihal bistveno drugače. Hidrološko leto omejujeta letna minimalna pretoka curka I v dveh zaporednih letih.

V hidrološkem letu 2004-05, ki je sledilo, je bila količina padavin manjša (1560,7 mm), bistveno drugačna pa je bila njihova razporeditev. Od Januarja do marca 2005 so padle le minimalne padavine, še te kot sneg ob nizkih temperaturah, zato je curek I tedaj presušil, curka J in L pa sta dosegala minimalne pretoke (slika 3).

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 izrazitejšega dušenja infiltriranih padavin in curek prek leta nikoli ne presahne (tabela 1). Stalen je tudi najmanjši opazovani curek L, a je dinamika iztekanja vode skozi ta curek bistveno drugačna kot skozi curka J in I, kar je razvidno tudi iz slike 4. Ko se njegovo zaledje napolni do določene mere, prihaja do povečanega iztoka, ko pa se sprazni do neke mere, se začne stalno skromno iztekanje (sliki 2 in 3). Tedaj minimalni pretoki curkov J in L dosegajo vrednosti pod 1 ml/min. Oba tipa curkov v vadozni coni (J in L) sta zelo pogosta in se kažeta kot pomembna v napajanju kraških izvirov v daljših sušnih obdobjih, ko pretakanje po prepustnejših razpokah izostane.

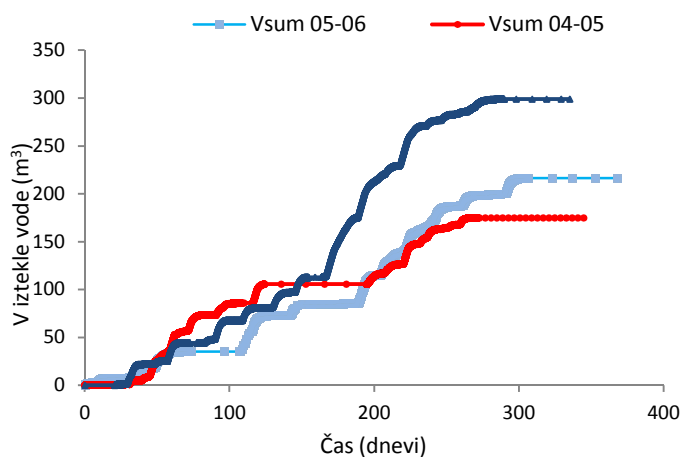


Slika 4: Dinamika iztekanja vode skozi curke I, J in L (kumulativno - V sum) v hidrološkem letu 2003-04.

Dinamika in izdatnost iztekanja vode skozi curek I v treh zaporednih hidroloških letih, ko je postopno upadala količina letnih padavin, je razvidna iz slike 5. Na iztekanje vplivata količina in razporeditev padavin, vendar po sušnih obdobjih prihaja do skromnejšega iztekanja oz. do povečanega skladiščenja infiltriranih padavin v vadozni coni. V hidrološkem letu 2003-04 je bilo iztekanje dokaj zvezno in le s krajšimi presušitvami curka. Do sredine marca 2004 je padlo 53 % padavin v hidrološkem letu 2003-04, skozi curek I pa je izteklo le 39 % letne količine vode (tabela 1), kar pripisujemo povečanemu skladiščenju infiltriranih padavin. V nadaljnjih mesecih do konca hidrološkega leta je bilo iztekanje izdatnejše kot v prvem obdobju (47 % padavin in 61 % iztekle vode v hidrološkem letu). Na padavine julija in avgusta (okoli 140 mm) Curek I ni reagiral, ker so se infiltrirale in shranile v zaledju (slika 2). Ta vzorec skladiščenja ob koncu hidrološkega leta se ponavlja tudi v sledečih hidroloških letih (Kogovšek 2010), in se odvisno od razmer in padavin lahko pričena že maja.

V naslednjem hidrološkem letu 2004-05 je iztekla v prvih mesecih enaka količina vode in s približno enako dinamiko kot v predhodnem letu (slika 5). V daljšem zimskem sušnem obdobju (od januarja do sredine marca) s snežnimi padavinami in nizkimi temperaturami na površju (konec februarja in v začetku marca) curek I skoraj tri mesece ni bil aktiven. V

obdobju od marca 2005 do konca hidrološkega leta je nato padla približno polovica letnih padavin, prišteti pa bi morali še del snega, ki se je talil s časovnim zamikom, je bila iztekla količina vode le 40 % letne količine (tabela 1). To nakazuje pomembne procese s vode v vadozni coni po daljših sušnih obdobjih. Kar izdatne padavine julija in avgusta (270 mm, $I_{ef}=170$ mm) niso aktivirale curka I in so se shranile v zaledju (slika 3), podobno kot predhodno hidrološko leto.



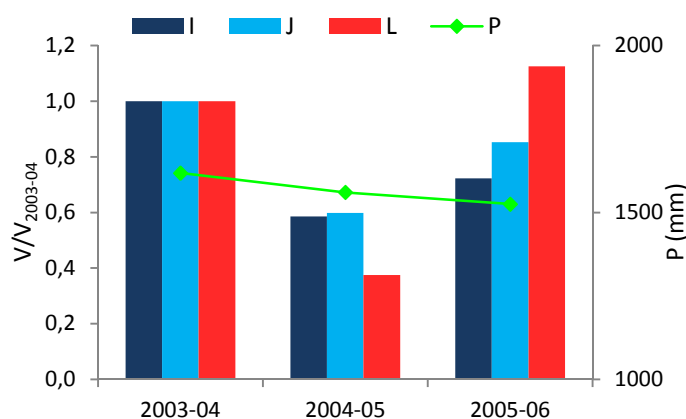
Slika 5: Dinamika iztekanja vode skozi curek I v treh zaporednih letih.

Tabela 1: Iztekanje infiltriranih padavin skozi curke I, J in L v zaporednih hidroloških letih: količina celoletnih padavin, količina in delež padavin ter delež iztekle vode v prvi polovici hidrološkega leta.

Hidrološko leto	Obdobje	P (mm)	P (%)	V iztekle vode (%)		
				Curek I	Curek J	Curek L
2003-04	celo leto	1618,3	100	100	100	100
	do 15.3.2004	857	53	39	47	97
2004-05	celo leto	1560,7	100	100	100	100
	do 15.3.2005	797	51	60	47	96
2005-06	celo leto	1525,5	100	100	100	100
	do 15.2.2006	706,6	43	39	45	13

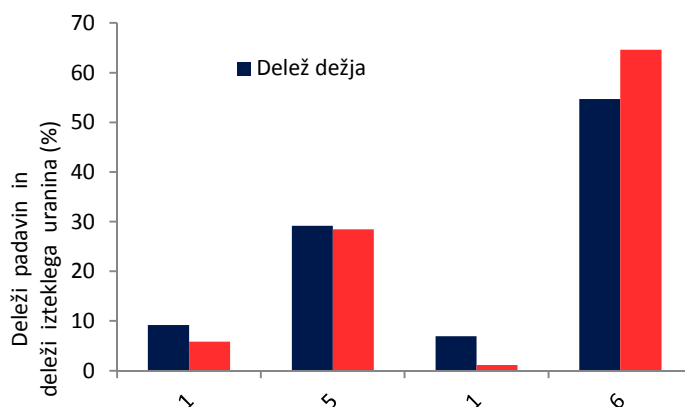
Sledilo je hidrološko leto 2005-06, s še nekoliko manjšo količino padavin (tabela 1), ki so bile razporejene prek celega leta, podobno kot v hidrološkem letu 2003-04, kar se je odrazilo tudi v iztekanju iz vadozne cone (slika 5). V prvih mesecih, ko je padlo 43 % letnih padavin (tabela 1) je iztekel nekoliko manjši del vode (39 %) v primerjavi s preostalimi meseci v letu (tabela 1), vendar pa je bila količina iztekle vode v hidrološkem letu 2005-06 kar za četrtno manjša kot v hidrološkem letu 2003-04, medtem ko je bila količina padavin le dobrih 5 % manjša.

Dogajanje v zaledju curka J je bolj dušeno in delež iztekle vode v hidroloških letih 2004-05 in 2005-06 je bil v primerjavi s curkom I vse večji (slika 6, tabela 1). Sklepamo, da je iztekanje iz vadozne cone po različno prepustnih razpokah odvisno od razmer na površju in v vadozni coni prek hidrološkega leta (daljša sušna obdobja) in ne le od količine padavin. V hidrološkem letu 2004-05 se je večji del infiltriranih padavin shranil v vadozni coni v primerjavi s sledečim hidrološkim letom, ko je sledilo sorazmerno večje iztekanje predvsem iz slabo prepustnega dela (curka J in L).



Slika 6: Deleži iztekle vode skozi curke I, J in L v zaporednih hidroloških letih glede na hidrološko leto 2003-04 ter količina padavin.

Izvir Malenščice na Planinskem polju se napaja z infiltracijo padavin na širšem območju Javornikov in s površinskimi vodami s Cerniškega polja. V dalj časa trajajočih sušnih obdobjih, poleti in jeseni, dotok s Cerkniškega polja celo presuši. Z izračunom povrnjenega sledila v Malenščici (sledenje z injiciranjem na površju na območju Javornikov) v posameznih časovnih obdobjih in količino padavin v istih obdobjih, smo ugotavljali dinamiko pretakanja oz. skladiščenja padavin in sledila v vadozni coni (Kogovšek 1999). Intenzivnejšemu prenosu uranina od 5.7. do 12.9.1997 je sledilo sušno obdobje s skladiščenjem padavin in minimalnim iztekanjem iz vadozne cone (slika 7). Glede na to, da se je tedaj napajal izvir pretežno iz vadozne cone, sklepamo na veliko zaledje na območju Javornikov, ki še ni v celoti raziskano.

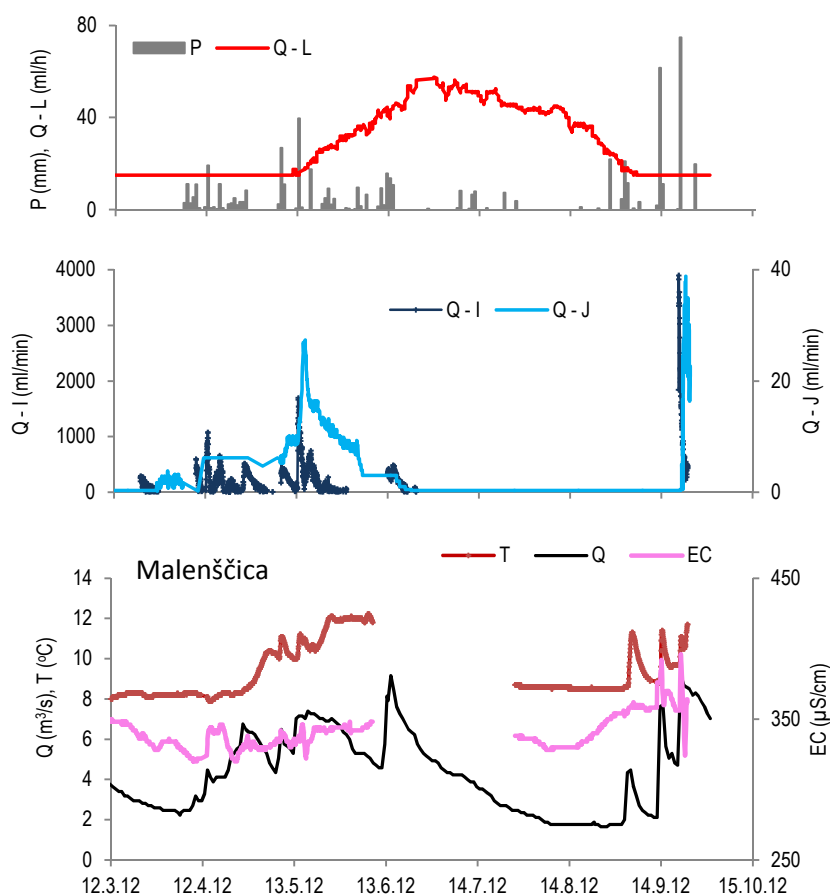


Slika 7: Deleži padavin in deleži povrnjenega sledila glede na vse padavine v opazovanem obdobju od 10.6.1997 do 18.2.1998 oz. na glede na celotno povrnjeno sledilo.

V s padavinami zelo skromnem letu 2012 smo v spomladanskem in poletnem obdobju vzporedno spremljali pretakanje vode skozi vadozno cono in iztekanje skozi izvir (slika 8). Konec julija 2012, ko je pretok Malenščice upadel pod $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$, je njena temperatura dosegla vrednost $8,6 \text{ }^\circ\text{C}$, od 13. avgusta do konca meseca pa vrednost $8,5 \text{ }^\circ\text{C}$ pri pretoku $1,76 \text{ m}^3/\text{s}$. Sklepamo, da se je v tem obdobju Malenščica napajala predvsem s shranjeno vodo z območja Javornikov, saj je bil Rak v Rakovem Škocjanu na izviro suh, Kotličiči pa

so imeli komaj zaznaven pretok. V omenjenem obdobju je padlo le 28,2 mm dežja, skoraj ves v zadnjih dneh avgusta. Sočasne meritve v vadozni coni so pokazale, da so bili tedaj v vadozni coni aktivni le curki oz. kapljanja kot sta bila opazovana curka J in L s pretokom pod 1 ml/min. V takih obdobjih je kakovost Malenščice glede na kemijske parametre sorazmerno dobra, podobno smo ugotavljali tudi glede bakteriološkega stanja (skupne koliformne bakterije in *E. Coli*) (Kogovšek, 2013).

Padavine v začetku septembra so pogojevale oblikovanje manjšega poplavnega vala s povišanjem temperature do 11,3 °C, kar je pokazalo na dotok vode tudi iz smeri Cerkniškega polja (Kogovšek in Petrič, 2010). Vendar je sprememba temperature zaostajala za porastom pretoka kar za 32 ur, kar nakazuje najprej iztekanje shranjene vode s temperaturo 8,6 °C. Nadaljnje padavine so čez 10 dni oblikovale večji poplavni val, s časovnim zamikom je sledilo povečanje temperature, zanihala pa je tudi električna prevodnost (EC). Na osnovi tega sklepamo na dotok vode s Cerkniškega polja, predvsem Cerkniščice. Šele ob nadaljnjih padavinah se je povečal prispevek iz vadozne cone (slika 8), najprej po prepustnejših razpokah (kot je curek I), z dve-dnevnim zamikom pa še po slabše prepustnih razpokah (curek J).



Slika 8: Sočasne meritve pretakanja vode skozi vadozno cono (curki I, J in L) in skozi izvir Malenščice.

Sklepi

Večletno zvezno opazovanje pretakanja padavin skozi 100 m debelo vadozno cono je pokazalo na pomembno skladiščenje infiltriranih padavin v daljših sušnih obdobjih. Tudi večja količina manj intenzivnih padavin v poletno-jesenskem obdobju (do 390 mm padavin

oz. 180 mm infiltriranih padavin) se pretežno shranjuje in prihaja le do minimalnega iztoka iz vadozne cone ali pa ta celo izostane (Kogovšek, 2010). Večji nestalni curki, kot je opazovani curek I, po padavinah hitro odvajajo shranjeno vodo globlje v vodonosnik, ki se meša s sveže infiltriranimi padavinami. Manjši stalni curki in kapljanja (kot sta opazovana curka J in L), ki so vezani na slabše prepustne razpoke, kar omogoča dobro homogenizacijo infiltriranih padavin, pa reagirajo na padavine z določenim časovnim zamikom. Ti curki pomembno napajajo kraške izvire v sušnih obdobjih, ko curki kot je curek I, niso aktivni in ko izostane tudi napajanje prek rek ponikalnic. Vzporedno spremljanje kraškega izvira Malenščica nakazuje v sušnih obdobjih ob minimalnih pretokih napajanje izvira s shranjeno vodo iz vadozne cone. Prve izdatnejše padavine (kot je bilo septembra 2012), ki sprožijo povečanje njenega pretoka, potiskajo skozi izvir najprej shranjeno vodo. Nadaljnje padavine, ki povečajo pretok Cerkniščice na Cerkniskem polju, sprožijo dotok njene vode, šele dodatne, dovolj izdatne padavine pa aktivirajo intenzivno iztekanje iz vadozne cone po hierarhiji različno prepustnih razpok. Na dinamiko pretakanja pa je vezan prenos onesnaženja iz različnih delov vodonosnika.

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.
- Forti, P. 2002. Speleology in the Third Millennium: Achievements and Challenges. *Theoretical and Applied Karstology*, 15: 7-26.
- Ford, D., Williams, P. 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons: 562 p, Chichester.
- 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. 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. 1999. Nova spoznanja o podzemnem pretakanju vode v severnem delu Javornikov (Visoki kras). *Acta carsol.* 28, 1: 161-200.
- Kogovšek, J. 2000. Ugotavljanje načina pretakanja in prenosa snovi s sledilnim poskusom v naravnih razmerah. *Annales*, 10, 1=19: 133-142.
- Kogovšek, J. 2010. *Characteristics of percolation through the karst vadose zone*, (Carsologica, 10). Ljubljana: Založba ZRC. 168 str.
- Kogovšek, J. 2013. Vpliv sušnih razmer na kakovost kraških vodnih virov (primer izvira Malenščice). *Raziskave s področja geodezije in geofizike 2012*. Ljubljana, 111-120.
- Kogovšek, J., Habič, P. 1981. Preučevanje vertikalnega prenikanja vode na primerih Planinske in Postojnske jame. *Acta carsologica*. 9: 129-148.
- Kogovšek, J., Petrič, M. 2010. Water temperature as a natural tracer - a case study of the Malenščica karst spring (SW Slovenia). *Geologia Croatica*, 63, 2: 171-177.

- Maloszewski, P., Stichler, W., Zuber, A., Rank, D. 2002. Identifying the flow systems in a karstic-fissured-porous aquifer, Schneetalpe, Austria, by modelling of environmental ^{18}O and ^3H isotopes. *Journal of Hydrology*, 256, 1-2: 48-59.
- 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.
- Pretoki Malenščice. Medmrežje: <http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/> (5.11.2013).
- 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.
- Williams, P.W. 1983: The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. *Journal of Hydrology*, 61: 45-67.