

Vloga nezasičene cone v procesu napajanja kraškega vodonosnika

The role of the epikarst zone in karst aquifer recharge processes

Branka TRČEK¹ & Noel C. KROTHER²

¹Geološki zavod Slovenije, Dimičeva 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenia

²Indiana University, Department of Geological Sciences, 1001 East Tenth Street, IN 47405
Bloomington, USA

Ključne besede: kraški vodonosnik, naravna sledila, nevihtni hidrografi, epikraška cone, hidravlično obnašanje

Key words: karst aquifer, natural tracers, storm hydrographs, epikarst zone, hydraulic behaviour

Kratka vsebina

Predmet raziskave je študij nevihtnih hidrogramov dveh kraških izvirov, Orangeville Rise-a (USA, Indiana) in Hublja (SW Slovenija). Uporabili smo tri in štiri komponentni tehniki razdelitve hidrogramov, ki sta temeljili na naravnih sledilih. Na obeh raziskovalnih območjih so rezultati podobni in v skladu z aktualno raziskovalno hipotezo, ki predpostavlja, da pomemben del napajanja kraškega vodonosnika izvira hitro in v koncentrirani obliki iz epikraške cone. Sinteza podatkov kaže, da lahko kraški izvir vsebuje med padavinskim dogodkom tudi do 50 % vode epikraške cone, česar ne smemo zanemariti pri zaščiti kraških podzemnih vodnih virov.

Abstract

The study of Orangeville Rise (USA, Indiana) and Hubelj (SW Slovenia) karst springs' storm hydrographs was the principal theme of our research. We used three and four component hydrograph separation techniques that were based on natural tracers. The results are similar in both study areas. They are in agreement with actual research hypothesis where it is supposed that an important part of the karst aquifer's recharge arrives, rapidly and in concentrated form, from the epikarst zone. The synthesis of data demonstrates that epikarst water could occupy up to 50 % of the karst spring discharge during the precipitation event that should not be neglected in karst aquifer's protection strategies.

UVOD

Kraški vodonosniki so pomemben vir kakovostne podzemne vode tako v Indiji kot v Sloveniji. Da bi zagotovili trajnostno gospodarjenje s kraškimi vodnimi viri, je treba proučiti dejavnike, ki nadzirajo obnašanje

vodonosnika. Od tu izhaja raziskovalna problematika, ki se nanaša na študij toka in prenosa snovi (polutantov) v kraškem vodonosniku.

Proučevali smo obnašanje močno zakrsljenih kraških vodonosnikov v zaledju izvirov Hubelj (JZ Slovenija) in Orangeville Rise (J

Indiana, ZDA). V preteklosti sta bili območji predmet obširnih geoloških, hidrogeoloških, hidroloških in geokemijskih raziskav, ki so dale pomembne podatke, opozorile pa so tudi na več odprtih vprašanj, predvsem tista, ki se nanašajo na hidrodinamiko (Basset, 1976; Čenčur Curk, 2002; Duwelius in sod., 1995; Habe, 1963; Habič, 1968; Habič, 1987; Iqbal in Krothe, 1995; Janež in sod., 1997; Kranjc, 1997; Krothe in Libra, 1983; Krothe, 1998; Lakey in Krothe, 1996; Lee in Krothe, 2001; Pezdič in sod., 1983-1985; Placer in Čar, 1974; Stichler in sod., 1997; Sundermann, 1968; Trček in sod. 1998-2001; Urbanc, 1993; Wells in Krothe, 1989).

Proučevanje odziva izvirov in kraških vodonosnikov na poletne nevihte je glavna tema študije. Uporabili smo posredno raziskovalno metodo – razdelitev nevihtnih hidrogramov, ki je temeljila na naravnih sledilih v vzorčevanih vodah. Ker so predhodne raziskave pokazale, da je dvo-komponentna tehnika razdelitve hidrogramov neučinkovita za kraške izvire (Trček in sod., 2001, Lakey in Krothe, 1996; Trček in sod., 2002), je uporabljena v študiji tri in štiri komponentna tehnika. Hidrogrami izvirov so razdeljeni na komponente 1) nove vode, 2) vode zgornje nezasičene cone ter 3) vode baznega toka.

Uporabljena metoda je učinkovita tehnika za proučevanje hidravličnih lastnosti kra-

ških vodonosnikov. Dala je značilne rezultate, ki omogočajo vpogled v procese napa-
janja, uskladiščenja in praznjenja kraškega vodonosnika.

RAZISKOVALNO OBMOČJE

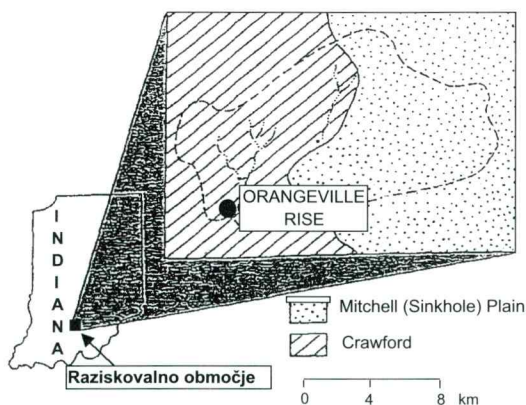
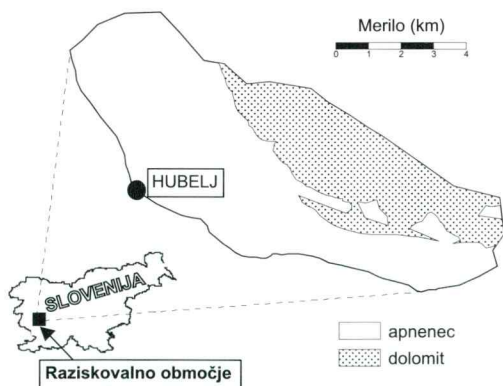
Kraška izvira

a) Orangeville Rise, na jugu osrednje Indiane in

b) Hubelj, v jugo-zahodni Sloveniji, predstavljata glavna iztoka iz dveh močno zakraselih kraških vodonosnikov (sl.1.).

Pretok Orangeville Rise-a niha med 0.06 do 5.1 m³/s. Izvir napaja območje, ki obsega 125 km², na njem pa pade letno povprečno 1140 mm padavin. Vodonosnik gradita dve enoti, Mitchell Plain in Crawford Upplad (sl. 1.). Mitchell Plain v glavnem sestavlja apnenec srednje Missisipijske starosti, medtem ko se izmenjujejo v Crawford Uppladu peščenjak, skrilavci in apnenec, ki pripadajo skupinama West Baden in Stephenson (Krothe, 1998).

Pretok Hublja niha od 0.2 do 59 m³/s, medtem ko je njegov srednji pretok 3 m³/s. V zaledju izvira je visoka kraška planota Trnovski gozd, katere povprečna nadmorska višina je 900 m. Na tem območju pade povprečno 2450 mm padavin na leto. Napajalno območje izvira, ki ga gradi v glavnem jurski apnenec (sl.1.), obsega 50-80 km² (Trišič, 1997).



Sl. 1. Lega raziskovalnega območja a) v Sloveniji in b) v Indiani (ZDA)

Fig. 1. Location of the study area a) in Slovenia and b) in Indiana (USA)

METODE IN TEHNIKE

Odziv obravnavanih kraških vodonosnikov na poletne nevihte je bil proučen s pomočjo tri in štiri komponentne tehnike razdelitve hidrogramov Hublja in Orangeville Rise-a (Kendall in McDonell, 1998; Lee in Krothe, 2001; Lee in Krothe, 2002; Talarovich in Krothe, 1998; Trček, 2001; Trček in sod. 2002). Hidrograma izvirov sta bila razdeljena na naslednje komponente:

a) novo vodo (padavine obravnavanih neviht),

b) vodo zgornje nezasičene cone, ki se je s štiri-komponentno tehniko nadalje razdelila na

b1) talno vodo in

b2) vodo epikraške cone,

c) vodo baznega toka (vključuje vodo uskaldisčeno v zasičeni in spodnji nezasičeni coni).

Razdelitev hidrograma na n komponent zahteva uporabo $(n-1)$ sledil. V študiji so uporabljeni podatke o izotopski sestavi kisika ($d^{18}O$), vodika (d^2H), ogljika ($d^{13}C$) in žvepla ($d^{34}S$) ter koncentracijah raztopljenega organskega in anorganskega ogljika (DOC in DIC) v vzorcih 1) padavin in 2) vode kraškega sistema, ki se je vzorčevala a) v zgornji nezasičeni coni oziroma v tleh in epikraški coni ter b) na izviru. Časovnemu nihanju sestave naravnih sledil v padavinah je zadoščeno z uporabo metode naraščajočega tehtanega povprečja (McDonell in sod., 1990).

Vzorčevanje je vključevalo dva dela:

1) dolgotrajno vzorčevanje v mesečnih oziroma tedenskih presledkih, za ugotavljanje osnovnih lastnosti vzorčevanih vod in

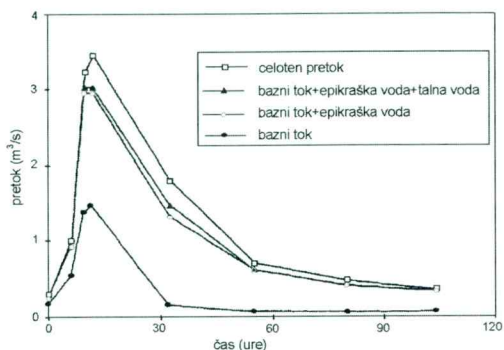
2) kratkotrajno podrobno vzorčevanje med padavinskim dogodkom, za proučevanje hidravličnih procesov v kraškem vodonosniku.

REZULTATI

Reakcija izvira Orangeville Rise na nevihtno obdobje je bila podrobno opazovana 104 ure po nevihti, ki se je začela 4.10.1990. Takrat je v 40 minutah padlo 53 mm dežja, ki je povzročil, da je narasel pretok izvira v 11 urah iz $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ (bazni tok) na $3.4 \text{ m}^3/\text{s}$ (sl. 2.). Štiri-komponentna razdelitev nevihtnega hidrograma, ki je predstavljena na sliki

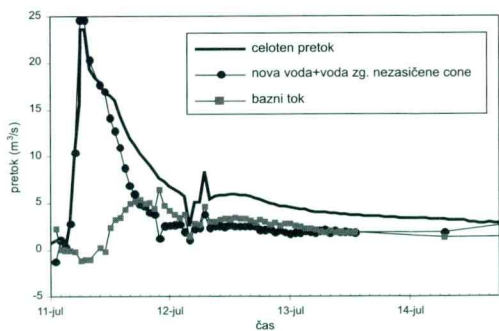
2 (Lee in Krothe, 2001), kaže, da je v času koncentracije hidrograma prevladovala v glavnem komponenta baznega toka. Maksimalna deleža nove vode in vode zgornje nezasičene cone sta se pojavila v izviru v času recesije hidrograma. V opazovanem obdobju je izvir vseboval povprečno 34 % vode baznega toka, 55.4 % vode zgornje nezasičene cone (oziroma 52.3 % vode epikraške cone in 3.1 % talne vode) ter 10.6 % nove vode.

Tri-komponentna razdelitev hidrograma Hublja na sliki 3 predstavlja odziv izvira na dva nevihtna cikla, 11.7.2000 in 12.7.2000. V prvem nevihtnem ciklu je padlo 63 mm padavin, v drugem pa 13 mm. Pomemben je



Sl. 2. Štiri-komponentna razdelitev hidrograma izvira Orangeville Rise na osnovi naravnih sledil δ^2H , $d^{13}C$, $\delta^{34}S$ in DIC (po Lee in Krothe, 2001)

Fig. 2. Four-component hydrograph separation of the Orangeville Rise spring using δ^2H , $d^{13}C$, $\delta^{34}S$ and DIC as tracers (after Lee and Krothe, 2001)



Sl. 3. Tri-komponentna razdelitev hidrograma izvira Hubelj na osnovi naravnih sledil $\delta^{20}O$ in DOC

Fig. 3. Three-component hydrograph separation of the Hubelj spring using $\delta^{20}O$ and DOC as tracers

predvsem prvi cikel, ki je povzročil, da je pretok izvira narasel iz 0.6 na 24 m³/s. Mak-simalen pretok je bil izmerjen 7 ur po začetku nevihte. Do takrat je tekla v izvir le stara voda, zatem pa tudi nova voda in voda zgornje nezasičene cone. V opazovanem obdobju so bili povprečni deleži komponent nove vode, vode zgornje nezasičene cone in baznega toka 15 %, 33 % in 52 %.

Sinteza hidrogramov obeh izvirov kaže, da je napajala izvira v času koncentracije hidrograma voda uskladiščena v kraških kanalih zasičene in spodnje nezasičene cone. V končni fazi koncentracije in v začetni fazi recesije hidrograma pa je napajal izvira preko omrežja kraških kanalov tudi hiter koncentriran tok, ki je vseboval komponenti nove vode in voda zgornje nezasičene cone. Ta tok smo poimenovali epitok. Zadnja faza recesije hidrograma je vezana na razpršeno napajanje; izvira je napajala voda, ki je bila uskladiščena v slabo prepustnih blokih kamnin nezasičene in zasičene cone vodonosnika.

RAZPRAVA IN SKLEPI

Rezultati bilateralne študije opozarjajo na 1) batni efekt (nova voda je izpodrinila predhodno uskladiščeno vodo iz vodonosnika) in 2) dvojnost procesov napajanja in praznjenja

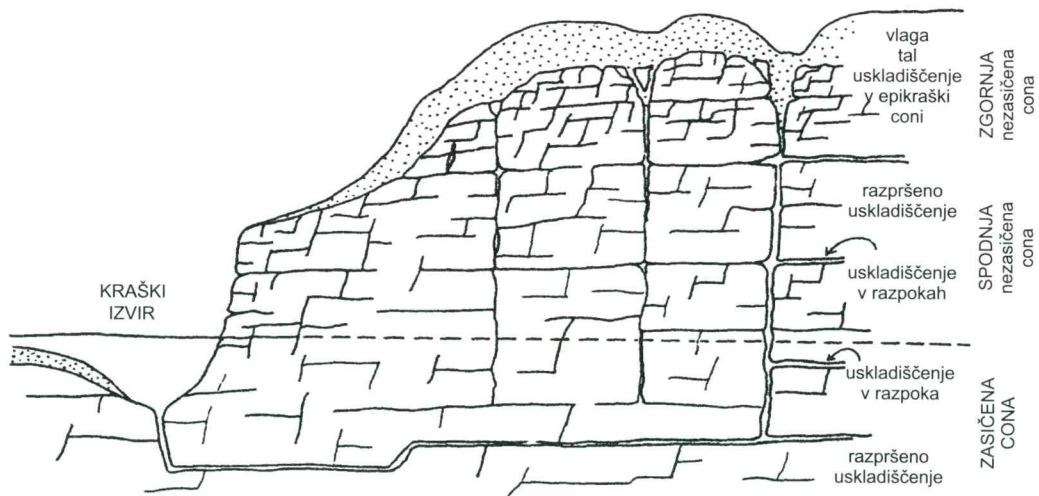
vodonosnikov, ki jo odsevata a) hiter koncentriran tok po omrežju kraških kanalov v času koncentracije hidrograma in v začetni fazi recesije hidrograma ter b) relativno počasen razpršen bazni tok v zadnji fazi recesije hidrograma. Podatki so združeni v konceptualnem modelu kraškega vodonosnika, ki ga predstavlja slika 4.

Rezultati so v skladu z aktualno raziskovalno hipotezo, ki predpostavlja, da pomemben delje napajanja kraškega vodonosnika izvira hitro in v koncentrirani obliki iz epikraške cone (Mangin, 1975; Williams, 1983). Ta fenomen ima lahko pomembne posledice na tok in prenos snovi v kraškem vodonosniku, kar moramo upoštevati pri načrtovanju strategije monitoringa.

The role of the epikarst zone in karst aquifer recharge processes

SUMMARY

In Slovenia and Indiana we have been working in same research problems referring to flow and solute (pollutant) transport mechanisms in a karst aquifer. The hydraulic behaviour of two highly karstified aquifers (Fig. 1.), a) in the catchment area of Hubelj spring in SW Slovenia and b) Oran-



Sl. 4. Konceptualni model kraškega vodonosnika s conami, v katerih je uskladiščena podzemna voda (prirejeno po Lakey in Krothe, 1996)

Fig. 4. Conceptual model of a karst aquifer with storage zones of groundwater (modified after Lakey and Krothe, 1996)

geville Rise spring in south central Indiana (USA) was studied.

The discharge of Orangeville Rise ranges from 0.06 to 5.1 m³/s. Its catchment area, with the average annual precipitation of 1140 mm, has an areal extend of 125 km². The catchment area of Hubelj spring occupies 50–80 km². The average annual precipitation is 2450 mm in this region, while the Hubelj's discharge varies from 0.2 to 59 m³/s. Its mean discharge is 3 m³/s.

The principal theme of the bilateral research was the analyses of Hubelj's and Orangeville Rise's storm hydrographs. Three and four component hydrograph separation techniques (Kendall in McDonnell, 1998; Lee in Krothe, 2001; Lee in Krothe, 2002; Talarovich in Krothe, 1998; Trček, 2001; Trček in sod. 2002) were applied. They based on natural tracers in sampled 1) precipitation and 2) karst system's water (soil, epikarst and base flow water). The variations of oxygen ($\delta^{18}\text{O}$), hydrogen ($\delta^2\text{H}$), carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and sulfur ($\delta^{34}\text{S}$) isotope composition and concentration of dissolved organic and anorganic carbon (DOC in DIC) enabled the separation of hydrographs into following components:

- a) new water (precipitation of the storm event),
- b) upper unsaturated zone water that was further divided into
 - b1) soil water and
 - b2) epikarst water with the four-component technique,
- c) base flow water (water that is stored in saturated and lower unsaturated zone).

Figure 2 illustrates the four-component separation of the Orangeville Rise's hydrograph over the period of 104 hours after the storm event on 4th of October 1990 when 53 mm of precipitation fell in 40 minutes. The proportions of new water, upper unsaturated water and base flow water were calculated as 10.6 %, 55.4 % and 34 %, respectively.

The three-component separation of the Hubelj's storm hydrograph over the period of 90 hours is presented in Figure 3. The event consisted of two storm cycles on 11th and 12th of July 2000 with a total precipitation amount of 76 mm. The most important cycle was the first one when 63 mm of precipitation fell in few hours. Over the observed period the average contributions of

new water, upper unsaturated water and base flow water were 15 %, 33 % and 52 %, respectively. However, the first two components were combined into one component (48 %) that represents the fast flow through the conduit network that arrives from the epikarst zone.

The results pointed out 1) the piston effect (new water displaced pre-stored water in the karst aquifer) and 2) duality of karst aquifer's recharge and discharge processes that is reflected by a) the fast concentrated flow during the hydrograph concentration and initial recession and b) the relatively slow diffuse flow during hydrograph recession.

The results are synthesized in a conceptual model of the karst aquifer in Figure 4. They are in agreement with actual research hypothesis supposing that an important part of the karst aquifer's recharge arrives, rapidly and in concentrated form, from the epikarst zone. The data demonstrate that epikarst water could occupy up to 50 % of the karst spring discharge during the precipitation event that should not be neglected in karst aquifer's protection strategies.

LITERATURA

- Basset, J.L. 1976: Hydrogeology and geochemistry of the upper Losr river drainage basin, Indiana. – *Nat. Speil. Soc. Bull.*, 38, 79–87.
- Čenčur Curk, B. 2002: Tok in prenos snovi v kamnini s kraško in razpoklinsko poroznostjo. Doktorska disertacija. – Univerza v Ljubljani, 253 str., Ljubljana.
- Duwellius, J.A., Bassett, J.L. & Keith, J.H. 1995: Application of fluorescent dye tracing techniques for delineating sinkhole drainage routes, Highway 37 improvement project Lawrence County, Indiana. – In: Beck, B.F. (Ed.), *Karst GeoHazards*, 227–233.
- Habe, F. 1963: Hidrološki problemi severnega roba Pivške kotline. – V zborniku predavanj tretjega jugoslovanskega speleološkega kongresa, 77–84, Sarajevo.
- Habič, P. 1968: Kraški svet med Idrijo in Vipavo. Prispevek k poznavanju kraškega reliefa. – SAZU, 243 str., Ljubljana.
- Habič, P. 1987: Sledilni poskusi na razvodju med Ljublanico, Idrijo in Vipavo. – *Acta Carsologica*, 16, 105–118, Ljubljana.
- Iqbal, M.Z. & Krothe, N.C. 1995: Infiltration mechanisms related to agricultural waste transport through the soil mantle to karst aquifers of southern Indiana, USA. – *J. Hydrol.*, 164, 171–192.
- Janež, J., Čar, J., Habič, P. & Podobnik, R. 1997: Vodno bogastvo Visokega krasa. Ranljivost kraške podzemne vode Banjšic, Trnovskega

gozda, Nanosa in Hrušice. – Geologija d.o.o, 167 str., Idrija.

Kendall, C. & McDonnell, J.J. 1998: Isotope tracers in catchment hydrology. – Elsevier, 722 str., Amsterdam.

Kranjc, A. 1997: 7th International Symposium on Water Tracing. Field guide of karst in Slovenia. – Acta Carsologica, 26/1, 1–98, Ljubljana.

Krothe, N.C. & Libra, R.D. 1983: Sulfur isotopes and hydrochemical variations of spring waters of southern Indiana, USA. – J. Hydrol., 81, 267–283.

Krothe, N.C. 1998: Comparison of oxygen and hydrogen isotope hydrograph separations from two perennial karst springs, Mitchell Plain-Crawford Upland, Indiana, USA. In: Proc. 9th Internat. Symp. Water Rock Interactions. – Balkema, 247–250, Rotterdam.

Lahey, B. L. & Krothe, N.C. 1996: Stable isotope variations of storm discharge from a perennial karst spring, Indiana. – Water Resour. Res., 32, 721–731.

Lee, E.S. & Krothe, N.C. 2001: A four-component mixing model for water in a karst terrain in south-central Indiana, USA. Using solute concentration and stable isotopes as tracers. – Chem. Geol. 179, 129–143.

Mangin, A. 1975: Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. DES thesis. – Ann. Speleol., 29/3, 282–332, Paris.

McDonnell, J.J., Bonell, M., Stewart, M.K. & Pearce, A.J. 1990: Deuterium variations in storm rainfall: Implications for stream hydrograph separation. – Water Resources Research, 26/3, 455–458.

Pezdič, J., Dolenec, T., Kramer, V. & Weiss, S. 1983: Temeljne hidrogeološke raziskave: Poročilo o delu za leto 1983 v raziskovalnem projektu Studij izotopske sestave kraških vod. – Inštitut Jožef Stefan, 49 str., Ljubljana.

Pezdič, J., Dolenec, T., Kramer, V. & Urbanc, J. 1984a: Temeljne hidrogeološke raziskave: Poročilo o delu za leto 1984 v raziskovalnem projektu Studij izotopske sestave kraških vod. – Inštitut Jožef Stefan, 50 str., Ljubljana.

Pezdič, J., Leskovšek-Šefman, H., Dolenec, T. & Urbanc, J. 1984b: Isotopic study of karst water: Final report on research contract No. 2845/RB. – Inštitut Jožef Stefan, 47 str., Ljubljana.

Pezdič, J., Dolenec, T., Kramer, V. & Urbanc, J. 1985: Temeljne hidrogeološke raziskave: Poročilo programskega sklopa za raziskovalni projekt Studij izotopske sestave kraških vod. – Inštitut Jožef Stefan, 41 str., Ljubljana.

Pezdič, J., Lojen, S., Barbina, V., Quarin, L. & Urbanc, J. 1996: Isotopic research on

groundwater in the basin of Natisone river (NE Italy). In: Proceedings of the symposium on isotopes in water resources management. – IAEA, 209–214, Vienna.

Placer, L. & Čar, J. 1974: Problem podzemlske razvodnice Trnovskega gozda, Križne gore in Črnovrške planote. – Acta Carsologica, 6, 79–93, Ljubljana.

Stichler, W., Trimborn, P., Maloszewski, P., Rank, D., Papesch, W. & Reichert, B. 1997: Environmental isotope investigations. In: Karst hydrogeological investigations in south-western Slovenia. – Acta carsologica, 26/1, 213–236, Ljubljana.

Sundermann, J.A. 1968: Geology and mineral resources of Washington County, Indiana. – Indiana Geol. Surv. Bull. 39.

Trček, B. & Urbanc, J. 1998: An example of application of carbon isotope composition as natural tracer in karst aquifer investigations. In: IV Isotope Workshop of the European Society for Isotope Research, Portorož, July 1–4. – Rudarsko-metalurški zbornik, 45/1–2, 183–186, Ljubljana.

Trček, B., Veselič, M. & Urbanc, J. 1999: The suitability of carbon isotope composition as natural tracer in karst aquifer investigations. In: Papers Presented at International Workshop on Groundwater Pollution in Karst: Preserving Water Quality in Karst Systems. – Acta Carsologica, 153–161, Ljubljana.

Trček, B., Car, M. & Veselič, M. 2000: The use of isotopic, hydrogeochemical and ground-penetrating radar investigations in the study of the unsaturated zone of the karst aquifer. – Rudarsko-metalurški zbornik, 47/3–4, 335–344, Ljubljana.

Trček, B., Pezdič, J., Veselič, M. & Stichler, W. 2001: Changes in $\delta^{18}\text{O}$ composition of the Hubelj spring under different hydrogeological conditions. In: Proceedings of the Conference on New Approaches Characterizing Groundwater Flow. – Balkema Publishers, 207–211, Lisse.

Trček, B. 2001: Spremljanje prenosa snovi v nezasičeni coni kraškega vodonosnika z naravnimi sledili. Doktorska disertacija. – Univerza v Ljubljani, 125 str., Ljubljana.

Trček, B., Krothe, N.C., Veselič, M. & Pezdič, J. 2002: Comparison of $\delta^{18}\text{O}$ variation of storm discharge from Slovene and American karst springs. – Rudarsko-metalurški zbornik, 49/1, 131–140, Ljubljana.

Trišič, N. 1997: Hydrology. In: Karst hydrogeological investigations in south-western Slovenia. – Acta Carsologica, 26/1, 19–30, Ljubljana.

Williams, P.W. 1983: The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. – Journal of Hydrology, 61, 45–67.