

Drenažni sistem zgornje nezasičene cone kraškega vodonosnika – primer zaledja izvira Hubelj

Drainage system of the upper unsaturated zone of a karst aquifer – a case study of the Hubelj spring catchment

Branka TRČEK

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ul. 14, 1000 Ljubljana, Slovenija, e-mail:branka.trcek@geo-zs.si

Ključne besede: kraški vodonosnik, nezasičena cona, drenažni sistem, poskusno polje Sinji vrh (JZ Slovenija)

Key words: karst aquifer, unsaturated zone, drainage system, experimental field site Sinji vrh (SW Slovenia)

Kratka vsebina

Predmet raziskav je studij drenažnega sistema in prenosa snovi v kraškem vodonosniku, ki je temeljil na raziskovalni metodi s področja naravnih sledil. Poudarek je bil na preučevanju mehanizmov, ki povzročijo tok in prenos snovi iz zgornje nezasičene cone vodonosnika, ki se je opazovala na poskusnem polju Sinji vrh v zaledju izvira Hubelj. Rezultati so omogočili vpogled v starostno strukturo in hidrodinamiko vod v opazovanem kraškem sistemu, v procese napajanja, uskladiščenja in praznjenja kraškega vodonosnika ter v mehanizme, ki te procese povzročijo.

Abstract

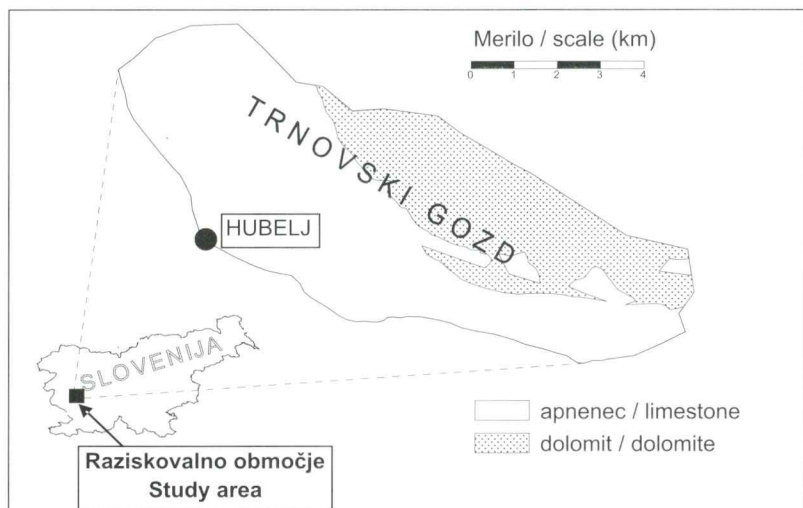
A drainage system and a solute transport of a karst aquifer were studied by using an indirect research method basing on natural tracers. The research of mechanisms that cause the flow and solute transport from an aquifer upper unsaturated zone was particularly stressed. This zone was observed in a catchment area of the Hubelj spring, at the experimental field site of Sinji vrh. The results provided an insight into the age structure and hydrodynamics of the karst system groundwater and produced information on the aquifer recharge, storage and discharge processes, as well as on mechanisms that affected them.

Uvod

V Sloveniji in drugje po svetu postaja podzemna voda kraških vodonosnikov vse pogostejši vir za vodooskrbo prebivalstva, industrije in kmetijstva. V kraških vodonosnikih so namreč uskladiščene ogromne zaloge podzemne vode, ki naj bi do leta 2025 pokrivale kar 80 % porabe.

Zaradi specifičnih lastnosti so kraški vodonosniki izredno občutljivi za onesnaženje, poleg tega pa je tudi njihova samočistilna

spособnost zelo omejena. Da bi zaščitili kraške vodonosnike pred onesnaženjem in zagotovili njihovo trajnostno gospodarjenje, je treba poznati dejavnike, ki nadzirajo hidroavlično obnašanje obravnavanega vodonosnika. To ni enostavna naloga, saj se spreminja ranljivost kraškega vodonosnika v odvisnosti od hidrodinamičnih pogojev v vodonosniku, infiltracijskih pogojev, prisotnosti oziroma debeline zaščitnega pokrova (tla, vegetacija) in razvitosti kraškega drenažnega sistema.



Slika 1: Raziskovalno območje

Figure 1: Study area

Študij drenážnega sistema in prenosa snovi v kraškem vodonosniku je bil tudi predmet mojih raziskav, ki sem jih opravila v zaledju izvira Hubelj (slika 1). Le-ta vsebuje še veliko nejasnosti. Nanje so opozorili rezultati predhodnih raziskav. Obširne geološke, hidrogeološke, hidrološke, speleološke in geokemične raziskave, ki so sicer prispevale pomembne informacije o proučevanju območju, so postavile v ospredje predvsem odprta vprašanja s področja hidrodinamike (npr. Čenčur Curk, 2002; Gospodarič & Habič, 1976; Habe, 1963, 1970; Habič, 1968, 1969, 1987, 1989; Janež in sod., 1997; Kogovšek, 1984, 1990, 1992; Pezdich in sod., 1983, 1984, 1985; Urbanc, 1993). V študiji sem posvetila pozornost tistim, ki so povezana z mehanizmi, ki povzročijo tok in prenos snovi iz zgornje nezasičene cone vodonosnika, ki sem jo opazovala na poskusnem polju Sinji vrh (slika 2), v umetnem rovu 5-25 m pod površjem.

Kot osnovno raziskovalno metodo sem uporabila tisto s področja naravnih sledil. Raziskovalno delo je bilo zasnovano na a) multiparametričnem pristopu - vodilna parametra sta bila izotopska sestava kisika in koncentracija raztopljenega organskega ogljika v vzorčenih vodah, ki je temeljil na b) dvostopenjskem vzorčenju - dveletnem mesečnem vzorčenju in podrobnem vzorčenju med nevihtnim obdobjem. Prva stopnja vzorčenja je dala predvsem osnovne hidrodinamične podatke, medtem ko je druga služila za proučevanje reakcije kraškega sistema na padavinski dogodek in s tem povezanih pro-

cesov napajanja, uskladiščenja in praznjenja vodonosnika.

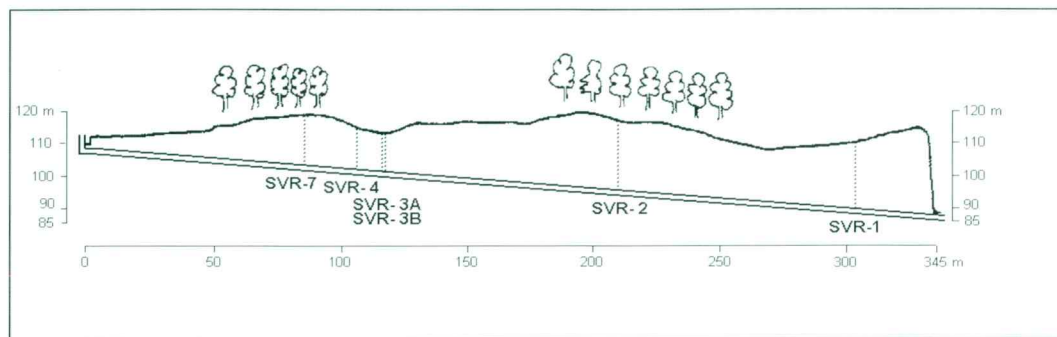
Raziskovalno območje

Raziskave so potekale na poskusnem polju Sinji vrh, ki je del kraškega vodonosnika v zaledju Hublja in leži okoli 600 m nad izvirom (slika 1). Vodonosnik, ki obsega 50-80 km² (Trišič, 1997), gradijo v glavnem globoko zakraseli apnenci jurske starosti (slika 1) (Janež in sod., 1997).

Na območju poskusnega polja Sinji vrh je površje zelo antropogeno - gradijo ga globeli, ki so porasle s travo, in kope, ki jih pokrivajo bukovimi gozdički (Šušteršič & Čenčur Curk, 2000). Kraskoslovno in strukturno kartiranje je pokazalo, da so nesimetrični skalni grebeni posledica položnega vpada plasti, medtem ko so jarkaste strukture nastale zaradi raztapljanja apnenca ob večjih vertikalnih razpokah (Čenčur Curk, 2002).

Za poskusno polje Sinji vrh so značilni prehodi rjavih pokarbonatnih tal in rendzine. Tla so globoka v povprečju 10-50 cm, maksimalno pa 1.5 m (Trček, 2001, 2003). Imajo nizko retencijsko kapaciteto za vodo in visoko stopnjo infiltracije (Matičič, 1997). Na tem območju zapade povprečno 2450 mm padavin na leto. Povprečna letna evapotranspiracija je 650 mm, povprečna letna temperatura zraka pa od 7 do 9 °C (Janež in sod., 1997).

Zgornjo nezasičeno cono raziskovanega območja sem proučevala v umetnem rovu



Slika 2. Vzdolžni prerez umetnega rova Sinji vrh z vzorčevalnimi mesti za izotopske in kemijske analize vode

Figure 2. Longitudinal section of the artificial tunnel Sinji vrh with sampling points for isotopic and chemical analyses

(slika 2), ki poteka v smeri N66°E in je dolg 340 m. Rov leži 5 do 25 m pod površjem na povprečni nadmorski višini 825 m. Tu nastopa intrabiopelmikritni, oolitni in biopelmikritni apnenec jurske starosti (lias-dogger) (Bole, 2000). Kamnina je zdrobljena in razpokana, saj je poskusno polje Sinji vrh del Avške prelomne cone, ki ima dinarsko smer (NW-SE). Na površini in v rovu je smer glavnih razpok in prelomov NNE-SSW; glavni smeri vpadov sta 295/80 in 115/85, podrejene pa 85/80-90, 185/85 in 140/80 (Čenčur Curk & Veselič, 1999; Veselič in sod., 2001).

Rov je predstavljal naravni laboratorij za študij drenažnega sistema in izotopsko-kemijskih lastnosti izcejujoče se vode. Ker sem v ta namen vzorčila vodo iz šestih vzorčnih mest (SVR-1, SVR-2, SVR-3A, SVR-3B, SVR-4 in SVR-7; slika 2), bom opisala še njihove mikrolokacije.

Oprema vzorčnega mesta SVR-1 je pritrjena na zelo drobno razpokano matično kamnino, ki je ujeta med gosto razpokano kamnino, v njegovi bližini pa ni večjih razpok. Podobne razmere kot v okolici vzorčnega mesta SVR-1 vladajo tudi v okolici vzorčnega mesta SVR-2, le da je tu še manj izrazitih razpok, obseg zelo drobno razpokanega apnenca pa večji. Oprema za vzorčenje je pritrjena na gosto razpokan apnenec, v neposredni bližini stika z relativno kompaktno kamnino.

Opremi vzorčnih mest SVR-3A in SVR-3B sta pritrjeni na precej zakraselo plast apnenca na razdalji 1 m. Tu je močno razpokano in zakraselo območje; prisotne so več-

je razpoke, v bližini pa je tudi izrazita porušena cona.

Oprema vzorčnega mesta SVR-4 je pritrjena na gosto razpokan apnenec, ki ga sekajo kar precej številne, skoraj vertikalne, razpoke.

Oprema vzorčnega mesta SVR-7 je pritrjena na plast apnenca - njegovo okolico namreč gradi plastovit in razpokan apnenec, ki je najverjetneje povezan z zakraselim območjem.

Metode in tehnike

Raziskovalna metodologija je bila zasnovana na

1) multiparametričnem pristopu, vključujoč monitoring

- a) stabilnih izotopov (kisik ^{18}O , vodik ^2H in ogljik ^{13}C),
- b) kemijskih parametrov (raztopljen organski ogljik - DOC in alkalnost),
- c) fizikalno-kemijskih parametrov (elektroprevodnost, temperatura in pH), in,
- d) hidrometeoroloških parametrov (pretok in količina padavin)

v podzemni vodi, vzorčeni v rovu, ter v padavinah, vzorčevanih v njihovem zaledju, ki je temeljil na

2) dvostopenjskem vzorčenju -

- a) mesečnem vzorčenju v obdobju med 1999 in 2000, ter,
- b) podrobnem vzorčenju med nevihtnim obdobjem julija 2000.

Podatke druge stopnje vzorčenja sem uporabila za analizo nevihtnih hidrogramov. Hidrograme vzorčevanih vod sem razdelila s

pomočjo dvokomponentne tehnike, kar je omogočilo določitev deležev posameznih komponent nevihtnega pretoka in študij vloge zgornje nezasičene cone v hidravličnem obnašanju kraškega vodonosnika.

Za dvokomponentno razdelitev hidrogrmov vzorčenih vod sem uporabila podatke o izotopski sestavi kisika. S pomočjo enačb masne bilance, (1) in (2), sem razdelila hidrograme na komponenti a) nove vode in b) stare vode (Sklash in Farvolden, 1979; Stichler in sod., 1997):

$$Q_t = Q_p + Q_e \quad (1)$$

$$Q_t C_t = Q_p C_p + Q_e C_e \quad (2)$$

Q - pretok,

C - izotopska sestava koncentracija konzervativnega naravnega sledila,

t - označuje izvir,

p - označuje komponento stare vode (podzemne vode, baznega toka),

e - označuje komponento nove vode (zadnjih padavin).

Pri tem moramo upoštevati naslednje danosti:

- izotopska sestava končnih členov se značilno razlikuje;

- naravno sledilo je konzervativno - njegova sestava se spreminja le zaradi mešanja;

- stara voda ima stabilno izotopsko sestavo, enako, kot jo je imel bazni tok pred obravnavanim hidrološkim dogodkom,

- izotopska sestava padavine se ne spreminja med padavinskim dogodkom.

Ker za območje raziskav časovno nihanje izotopske sestave kisika v padavinah ni za-

nemarljivo, sem za izpolnitev zadnjega kriterija enačb (1) in (2) uporabila metodo naraščajočega tehtanega povprečja, opisano z enačbo (3) (McDonnell in sod., 1990):

$$\delta^{18}O = (\sum_{i=1}^n P_i \delta_i^{18}O) / (\sum_{i=1}^n P_i) \quad (3)$$

$\delta^{18}O$ - tehtano povprečje izotopske sestave kisika v padavinah za časovno obdobje vzorčenja, ki ga določa točka hidrograma;

P_i - količina padavin, ki je padla med vzorcema (i-1) in (i);

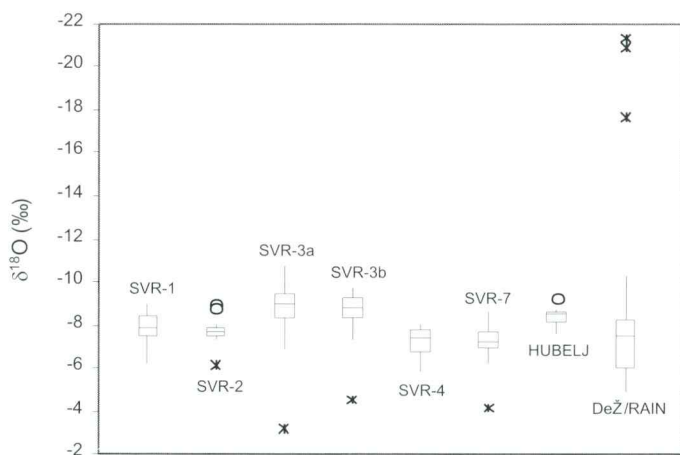
$\delta^{18}O$ - izotopska sestava kisika padavin v vzorcu (i).

S to metodo upoštevamo pri izračunu izotopske sestave komponente nove vode v določeni točki hidrograma le podatke tistih padavin, ki so padle do tistega časa, ki ga določa ta točka. Iz tega sledi, da na analizo določenega časovnega obdobja nevihtnega hidrograma ne vplivajo padavine, ki so padle kasneje.

Rezultati

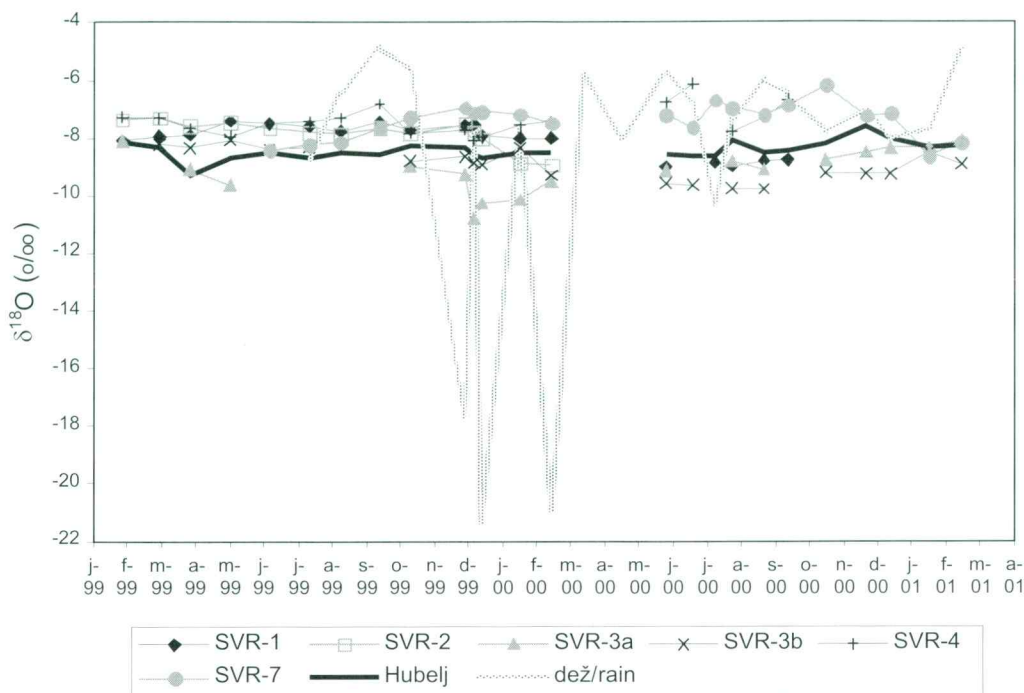
Predstavila bom najpomembnejše rezultate posameznih stopenj vzorčenja, ki temeljijo na podatkih vodilnih parametrov - izotopski sestavi kisika ($\delta^{18}O$) in koncentraciji raztopljenega organskega ogljika (DOC) v padavinah in podzemni vodi.

Lastnosti $\delta^{18}O$ mesečno vzorčenih vod so prikazane na slikah 3 in 4. Razlike med amplitudami sezonskega nihanja $\delta^{18}O$ v a) padavinah in b) podzemni vodi so omogočile oceniti povprečne zadrževalne čase vzorčenih vod (Trček, 2001, 2003):



Slika 3. Škatlasti diagrami izotopske sestave kisika v mesečnih vzorcih vode

Figure 3. Boxplots of the oxygen isotopic composition of monthly water samples



Slika 4. Časovni prikaz izotopske sestave kisika v mesečnih vzorcih vode
Figure 4. Time-trend of the oxygen isotopic composition of monthly water samples

- okoli 3 mesece za vodo SVR-7,
- okoli 9 mesecev za vodo SVR-4,
- 4-5 let za vodo SVR-3A,
- 5-6 let za vodo SVR-3B,
- najmanj 10 let, lahko pa tudi za eno ali več dekad več, za vodo SVR-1 in SVR-2.

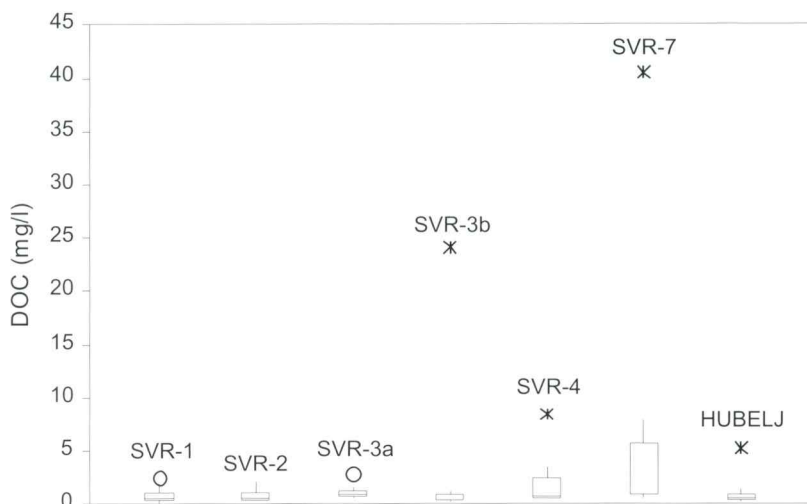
Sliki 5 in 6 prikazujeta glavne lastnosti DOC mesečno vzorčenih vodah. Na prvi sliki opazimo, da imajo vode SVR-1, SVR-2, SVR-3A in SVR-3B (starejše vode) podoben razpon vrednosti. Tudi njihove srednje vrednosti so podobne; nekoliko višjo ima le voda SVR-3A, kar verjetno odseva hitrejšo dinamiko podzemne vode. Po drugi strani sta razpona vrednosti parametra mlajših vod SVR-7 in SVR-4 precej širša, zlasti prve, kar odseva intenzivno dinamiko podzemne vode. Glede na druge, sta tudi srednji vrednosti teh vod ustrezno višji, vendar podobni, kot je tista vode SVR-3A.

Nastopanje oddaljenih in zelo oddaljenih vrednosti je značilno za vse vzorčene vode, razen za vodo SVR-2 (slika 5). To bi bilo lahko posledica prednostnega toka, katerega vplive lahko zasledimo na sliki 6. Očitni so poleti in jeseni 1999, če smo pozorni, pa

tudi julija 2000 (opazovano nevihtno obdobje). V teh obdobjih so morale padavine sprati večje količine organskih snovi iz tal, kar je povzročilo povišanje koncentracije DOC v podzemni vodi. Najvišje koncentracije so bile izmerjene v vodi SVR-7. Glede na to mora biti napajanje tega vzorčnega mesta vezano na najhitrejše drenažne poti izmed vse, kar je v skladu z oceno najkrajšega zadrževalnega časa vode SVR-7.

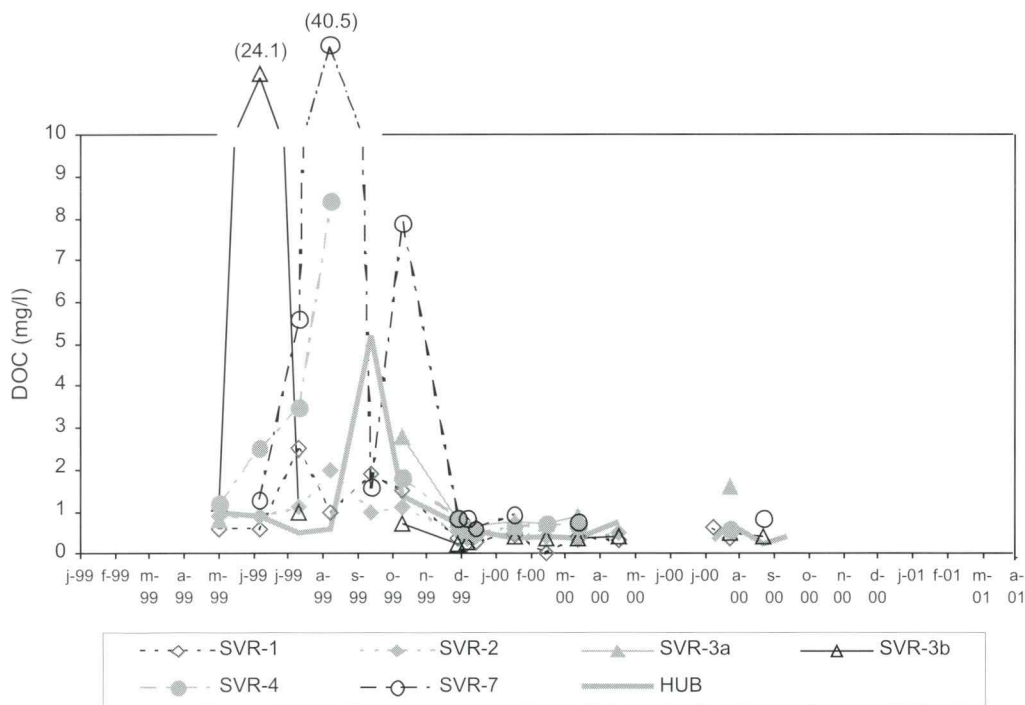
Namenimo pozornost še paroma vod s podobnimi zadrževalnimi časi: vodam a) SVR-7 in SVR-4 ter b) SVR-3A in SVR-3B. Glede na interpretacijo vodilnih parametrov predvidevam, da imajo vzorčevalna mesta vsakega posameznega para isto napajalno zaledje, razlikujejo pa se po dinamiki procesa napajanja, kar vodi do zamikov povprečnih zadrževalnih časov vod.

Da bi pridobila dodatne informacije o hidravličnih procesih v zgornji nezasičeni coni kraškega vodonosnika, sem spremljala reakcijo kraškega sistema na nevihtno obdobje, ki ga je povzročil obsežen hladni frontalni val. Nevihtno obdobje obsega čas od 9. do 25. julija 2000. Razdelila sem ga na dva dela:



Slika 5. Škatlasti diagrami koncentracije raztopljenega organskega ogljika v mesečnih vzorcih vode

Figure 5. Boxplots of the dissolved organic carbon concentration of monthly water samples



Slika 6. Časovni prikaz koncentracije raztopljenega organskega ogljika v mesečnih vzorcih vode

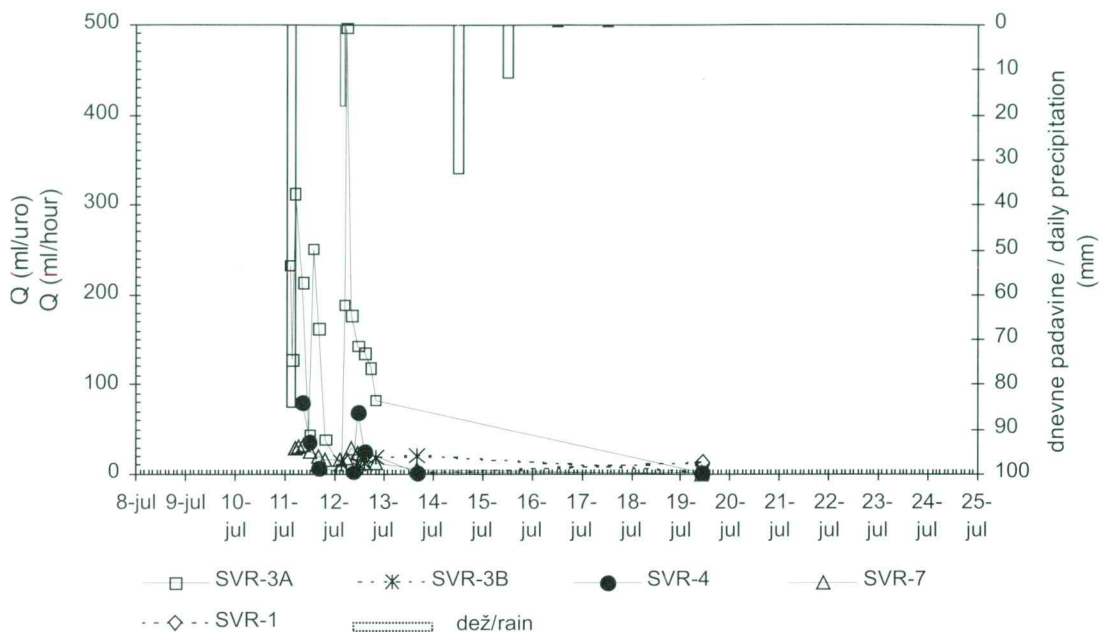
Figure 6. Time-trend of the dissolved organic carbon concentration of monthly water samples

a) obdobje predhodnih padavin (9.-11.7.) in
b) opazovano nevihtno obdobje (11.-25.7.),
ki vsebuje štiri ločene nevihtne cikle (prvi
cikel 11.-12.7., drugi cikel 12.-14.7., tretji
cikel 14.-18.7. in četrti cikel 18.-25.7.)

Najpomembnejši je bil prvi nevihtni
cikel, ko je v šestih urah padlo na Sinjem

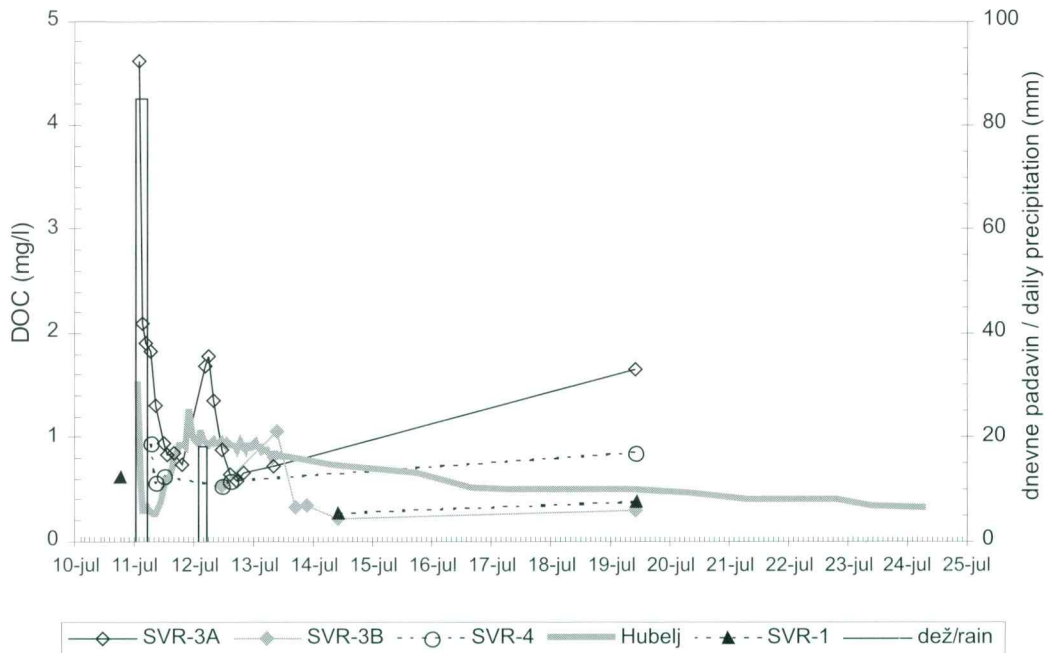
Vrhu 85 mm dežja. Zgornja nezasičena co-
na je maksimalno reagirala na ta cikel tri
ure po začetku padavin. Maksimalni odziv
je trajal eno uro, potem pa so se razmere
umirile.

Na sliki 7 lahko spremljamo reakcije po-
sameznih vzorčnih mest v rovu. Najzanimi-



Slika 7. Dnevne padavine in pretoki vzorčnih mest v rovu med nevihtnim obdobjem julija 2000

Figure 7. Daily precipitation and discharge of tunnel sampling points during the storm event in July 2000



Slika 8: Dnevne padavine in koncentracija raztopljenega organskega ogljika v vodah, vzorčenih med nevihtnim obdobjem

Figure 8. Daily precipitation and the dissolved organic carbon concentration of groundwater sampled during the storm event

vejše so vezane na 1m oddaljeni vzorčni mesti SVR-3A in SVR-3B. Ko je pretok prvega že skoraj usahnil, se je počasi začela izcejati voda v drugega. To kaže na odvisnost dveh vrst tokov: a) hitrejšega toka skozi kraške razpoke in/ali kanale, povezanega s SVR-3A, ter b) počasnega laminarnega toka iz drobno razpokane matične kamnine, povezanega s SVR-3B. Sklepam, da napaja počasen laminaren tok tudi vzorčevalni mesti SVR-1 in SVR-2, saj je prvo reagiralo na nevihtno obdobje šele dne 13.7., drugo pa sploh ni reagiralo.

K razumevanju hidravličnega obnašanja opazovanega kraškega sistema med nevihtnim obdobjem pripomorejo tudi informacije iz obdobja predhodnih padavin (9.7.). Takrat je padlo kar 64 mm padavin, vendar v rovu ni bilo opaziti večjih reakcij nanje; nekoliko sta reagirali le vzorčni mesti SVR-1 in SVR-7. Ti podatki kažejo, da so predhodne padavine zasičile tla in tako imenovane rezervoarje zgornje nezasičene cone.

Kakšna pa je bila izotopsko-kemijska sestava vzorčenih vod?

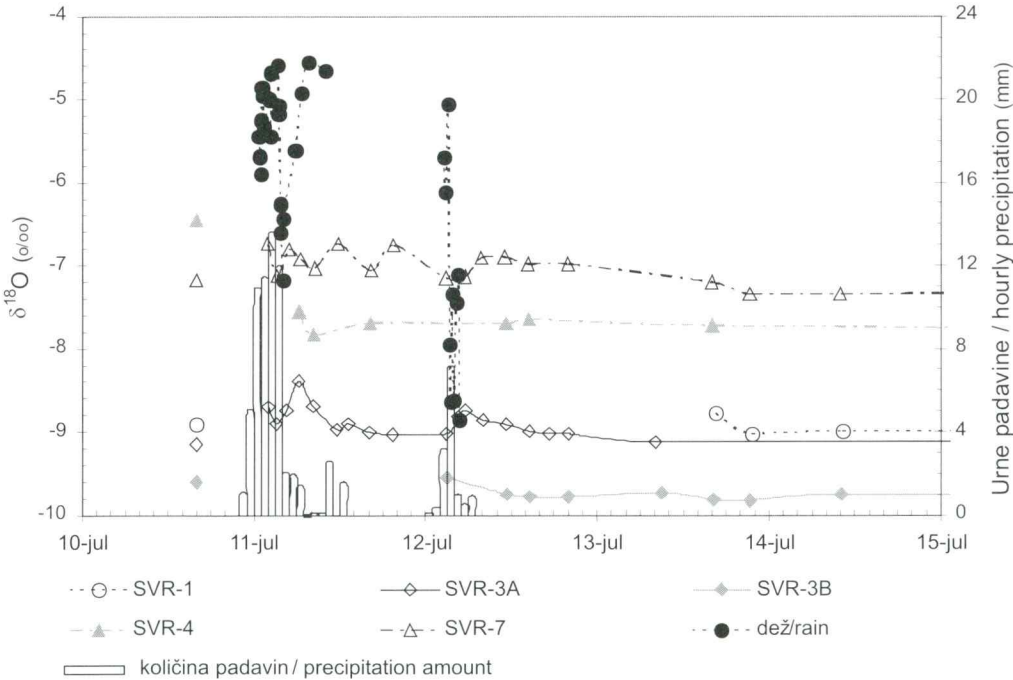
Tabela 1. Deleži komponente nove vode v nevihtnem hidrogramu SVR-1 (dvokomponentna metoda razdelitve)

Table 1. Portions of the event water component in the storm hydrograph of SVR-1 (two-component separation technique)

datum / date		Q-nova voda Q-event water (%)
13.7.00	16:25	2.30
13.7.00	21:30	0
14.7.00	10:12	0
25.7.00	10:40	0

Lastnosti DOC vzorčenih vod so predstavljene na sliki 8. Na sliki opazimo, da je bila na vseh vzorčnih mestih prva pulzna reakcija na nevihtni cikel povezana s povišanjem koncentracije parametra, kar odseva preboj prednostnega toka, ki je moral izriniti v vzorčna mesta tudi vodo iz tal. Povišanje parametra je veliko bolj izrazito v vodah s hitrejšo dinamiko.

Lastnosti $\delta^{18}\text{O}$ vzorčenih vod so prikazane na sliki 9. Primerjava med sestavo padavin in podzemne vode kaže, da je morala priteči



Slika 9. Urne padavine in izotopska sestava kisika v vodah, vzorčenih med nevihtnim obdobjem
Figure 9. Hourly precipitation and the oxygen isotopic composition of groundwater sampled during the storm event

Tabela 2. Deleži komponente nove vode v nevihtnem hidrogramu SVR-3B (dvokomponentna metoda razdelitve)

Table 2. Portions of the event water component in the storm hydrograph of SVR-3B (two-component separation technique)

datum / date		Q-nova voda Q-event water (%)
12.7.00	2:55	2.16
12.7.00	11:20	0
12.7.00	14:30	0
12.7.00	20:00	0
13.7.00	8:05	0
13.7.00	16:25	0
13.7.00	21:30	0
14.7.00	10:12	0
25.7.00	10:40	0

Tabela 3. Deleži komponente nove vode v nevihtnem hidrogramu SVR-3A (dvokomponentna metoda razdelitve)

Table 3. Portions of the event water component in the storm hydrograph of SVR-3A (two-component separation technique)

datum / date		Q-nova voda Q-event water (%)
11.7.00	2:00	11.83
11.7.00	3:10	6.32
11.7.00	4:35	11.09
11.7.00	6:15	20.60
11.7.00	8:15	12.45
11.7.00	11:35	4.87
11.7.00	13:10	6.76
11.7.00	16:05	4.06
11.7.00	19:20	3.25
12.7.00	2:55	3.53
12.7.00	4:30	9.67
12.7.00	5:35	12.15
12.7.00	8:05	8.60
12.7.00	11:20	7.11
12.7.00	14:30	4.74
12.7.00	17:20	3.85
12.7.00	20:00	3.85
13.7.00	8:05	0.90
25.7.00	10:40	7.94

značilna količina nove vode le v SVR-3A, medtem ko je v druga vzorčna mesta nova voda v glavnem izpodrinila staro predhodno uskladiščeno vodo, kar odseva tako imenovan batni efekt.

Razlike v $\delta^{18}\text{O}$ vzorčenih vod so omogočile uporabo dvokomponentne tehnike razdelitve nevihtnih hidrogramov vzorčenih vod. V hidrogramih sem ugotavljala deleže nove in

stare vode. Rezultati so zbrani v tabelah 1-3. Nanašajo se le na SVR-1, SVR-3A in SVR-3B, ker med opazovanim nevihtnim obdobjem nova voda ni napajala drugih vzorčnih mest.

Iz tabel 1-3 razberemo, da je prišlo na SVR-1 in SVR-3B prav na začetku do enkratnega preboja prednostnega toka, ki je vseboval tudi določen delež nove vode (2.3 %, oziroma 2.2 %). Prav ta preboj je povzročil, da sta se omenjeni vzorčni mesti začeli napajati. Enako velja za SVR-3A, le da je določen delež komponente nove vode napajal to vzorčno mesto tudi kasneje. Maksimalen delež, 21%, je dosegla obravnavana komponenta vode šest ur po začetku prvega nevihtnega cikla, zatem pa se je v glavnem zniževala. V obdobju prvih dveh nevihtnih ciklov je bil povprečen delež nove vode v SVR-3A 7.5 %, v celotnem opazovanem nevihtnem obdobju pa 7.6 %.

Razprava in sklepi

Rezultati mesečnega vzorčenja so omogočili vpogled v starostno strukturo in hidrodinamiko vzorčenih vod - najhitrejšo odsevajo vode SVR-7 in SVR-3A, predvsem slednje, čeprav je njihov povprečen zadrževalni čas ocenjen na okoli 5 let, najpočasnejšo pa odsevajo vode SVR-1 in SVR-2, kar je povezano z najdaljšim povprečnim zadrževalnim časom teh vod. Podatki te stopnje vzorčenja so opozorili tudi na vplive prednostnega toka in dvojnost procesov napajanja kraškega vodonosnika.

Rezultati podrobnega vzorčevanja med nevihtnim obdobjem so opisali tok in prenos snovi v vodonosniku med opazovanim obdobjem ter omogočili vpogled v procese napajanja, uskladiščenja in praznjenja vodonosnika. Slednji odsevajo a) dvojnost hidravličnih procesov, ki jo pojasnita hiter koncentriran tok in razpršen tok, ter b) mehanizme toka in prenosa snovi, ki jih pojasniyo batni efekt in preboji prednostnega toka.

Na podlagi sinteze rezultatov obeh stopenj vzorčenja in rezultatov predhodnih raziskav domnevam, da umetni rov poskusnega polja Sinji vrh predira na začetku epikraško cono (Trček, 2002), na koncu spodnjo nezasičeno cono, vmes pa tako imenovano prehodno območje.

Lastnosti vod SVR-7 in SVR-4 odsevajo epikraško cono. Kot posledica batnega efekta, naj bi se drenirala voda v vzorčevalni mesti prek hitrih drenažnih poti. Predvidevam, da je napajanje SVR-7 vezano na nezveznosti med plastmi, ki so v ozadju povezane z zakraselimi območji, napajanje SVR-4 pa na številne vertikalne razpoke.

Lastnosti vod SVR-1 in SVR-2 odsevajo spodnjo nezasičeno cono vodonosnika. Vzorčni mesti najverjetneje napaja razpršen laminaren tok iz drobno razpokanih blokov kamnin.

Lastnosti vod SVR-3A in SVR-3B odsevajo prehodno območje. Vzorčni mesti naj bi imeli enako napajalno območje, le da je napajanje SVR-3A v glavnem vezano na hiter koncentriran tok, napajanje SVR-3B pa na razpršen laminarni tok iz epikraške cone. Domnevam, da hiter tok priteče po večjih tektonskih razpokah, ki so lahko povezane s kaminom.

Sinteza vseh podatkov torej kaže na možnost obstoja epikraške cone (Trček, 2002) v kraškem vodonosniku zaledja Hublja. Na podlagi številnih argumentov predpostavljam, da je mehanizem toka in prenosa snovi v kraškem vodonosniku odvisen od obnašanja epikraške cone. Kot posledica batnega efekta, se po hidrološkem dogodku skoncentrirajo v bazi epikraške cone a) predhodno uskladiščene vode v zgornji nezasičeni coni in b) nova voda. Epikraška cona drenira to vodo v nižja območja vodonosnika v odvisnosti od volumna uskladiščene vode.

Rezultati kažejo, da je obnašanje epikraške cone popolnoma odvisno od trenutnih razmer in se s časom bistveno spreminja. Pri tem ima najpomembnejšo vlogo volumen uskladiščene vode v epikraški coni.

Zahvala

Za strokovne nasvete in pomoč pri raziskovalnem delu se zahvaljujem prof.dr. Jožetu Pezdihu in prof.dr. Miranu Veseliču.

Drainage system of the upper unsaturated zone of a karst aquifer – a case study of the Hubelj spring catchment

The groundwater of karst aquifers is becoming an increasingly important source of

water supply in many countries, Slovenia included. In order to protect the karst water from pollution it is necessary to investigate the behaviour of contaminants and thus to understand better the natural factors that control its behaviour. Consequently, the study of flow and solute transport mechanisms in a karst aquifer is becoming more and more important. This study was also the principal topic of my research work referring to a karst aquifer in the catchment area of the Hubelj spring (Figure 1). The research of mechanisms that cause the flow and solute transport from an upper unsaturated zone was particularly stressed. Therefore, the research was directed to the Experimental field site of Sinji vrh (Figure 1), where the upper unsaturated zone was investigated 10 to 20 m below the surface, in an artificial tunnel, which represented a natural laboratory for studies of the tunnel cover drainage system (Figure 2).

The indirect research method based on application of the natural tracers was used as the basic one. The resulting data were used also for hydrograph analyses of sampled water.

The research methodology was designed as a multi-parametric approach (principal parameters were the oxygen isotopic ($\delta^{18}\text{O}$) and dissolved organic carbon (DOC) composition of sampled precipitation and karst system waters), based on a sampling performed in two stages: a long-term sampling in monthly intervals (1999, 2000) and a short-term sampling during the storm event (July 2000).

The most important results of the long-term sampling are the age estimations of the sampled groundwater. Differences between the seasonal variation of $\delta^{18}\text{O}$ in the precipitation and tunnel seepage waters (Figures 3 and 4) provided the estimations of the sampled water average residence time (Trček, 2001, 2003): 3 months for the SVR-7 groundwater, 9 months for the SVR-4 groundwater, 4-5 years for the SVR-3A groundwater, 5-6 years for the SVR-3B groundwater and at least 10 years for the SVR-1 and SVR-2 groundwater (or possibly one or more decades longer).

On the other hand the comparison between $\delta^{18}\text{O}$ and DOC composition in Figures 3-6 points out the hydrodynamic properties of the study area. The values of the yo-

ungest groundwater of SVR-7 and SVR-4 reflect the intensive groundwater dynamics. However, the fastest dynamics should refer to the SVR-3A water, although the estimation of its average residence time is much longer.

The occurrence of the outlying and far-outlying DOC values (Figures 5 and 6) is distinctive almost for all sampled waters. These values might result from the fast preferential flow that washed out of the soil increased amounts of organic carbon compounds. The highest concentrations were measured in the SVR-7 water. This indicates that the SVR-7 recharge should be linked with the fastest drainage paths of all, which is in accordance with the shortest residence time of its water.

The short-term sampling was performed to obtain the additional information about the drainage system of the upper unsaturated zone. During the summer storm event in July 2000 the discharge response of the tunnel cover was studied.

The discharge responses of single tunnel sampling points could be found in Figure 7. A comparison between the recharge mechanisms of two adjoining sampling points, namely SVR-3A and SVR-3B, is the most interesting. When the SVR-3A discharge had almost stopped, the one of SVR-3B began. This is an indication of interdependence between two kinds of flow – the fast flow through the karst fractures and/or conduits relating to SVR-3A and the slow laminar flow from the thinly fractured rock relating to SVR-3B.

Figure 8 presents the DOC composition of sampled water. At all sampling points the first pulsed responses to the storm cycles resulted in an increase of the DOC values, which reflects a breakthrough of the preferential flow. The increases were much more distinctive in the sampling points with higher dynamics.

The $\delta^{18}\text{O}$ composition of sampled groundwater is illustrated in Figure 9. The comparison between the precipitation and groundwater values points out that a significant amount of the event water had to be discharged only to SVR-3A, while the old pre-stored water mostly recharged the other sampling points. All that reflects the piston effect – the event water displaced the pre-event water in the aquifer.

The variations of $\delta^{18}\text{O}$ in sampled water enabled the application of the two-component separation technique (Sklash and Farvolden, 1979). The hydrographs of the tunnel sampling points were separated into the event and pre-event water components. The relative parts of the event water component of SVR-3A, SVR-3B and SVR-1 are presented in Tables 1-3. There are no data for SVR-4 and SVR-7, because during the observed storm period only the pre-event water recharged these two sampling points.

At the very beginning of the observed storm period a breakthrough of the flow containing some portion of the event water occurred at SVR-3B and SVR-1 (2.2 and 2.3 % respectively). Right these breakthroughs were the cause for the recharge beginning at the sampling points. The same holds for SVR-3A, although some portions of the event water component recharged this sampling point also later on (Table 3) – during the observed storm period the average part of the event water component was 7.6 %.

It could be concluded that the data of the short-term sampling provided an insight into the recharge, storage and discharge processes of the study area. The latter processes reflected the duality of the recharge and discharge processes (demonstrated by a fast preferential flow and a slow diffuse flow), as well as the flow and solute transport mechanisms (the piston effect and the breakthrough of the preferential flow).

On the other hand the results of the long-term sampling provided an insight into the basic flow characteristics of the study area (mostly the age structure and hydrodynamics of the upper unsaturated groundwater zone) and pointed out the significance of effects of the fast preferential flow and of the duality of recharge processes.

The synthesis of the data of both sampling stages indicated the possibility of the epikarst zone existence in the catchment area of the Hubelj spring (Trček, 2002). The results demonstrated that the flow mechanism of the karst aquifer depends on the epikarst zone behaviour. Hence, the so-called epikarst hypothesis was verified, which presumes that an important part of the karst aquifer recharge arrives rapidly into the karst aquifer conduit network from the epikarst zone.

Literatura

- Bole, B. 2000: Poročilo o petrografski preiskavi vzorcev s Sinjega vrha. Delavno poročilo. - Geološki zavod Slovenije, 5 pp., Ljubljana.
- Čenčur Curk, B. & Veselič, M. 1999: Laboratory and Experimental Study of Contaminant Transport in Fractured and Karstified Rock. - Rudarsko-metalurški zbornik, 46/3, 425-442, Ljubljana.
- Čenčur Curk, B. 2002: Tok in prenos snovi v kamnini s kraško in razpoklinsko poroznostjo. Doktorska disertacija. - Univerza v Ljubljani, 253 pp., Ljubljana.
- Gospodarič, R. & Habič, P. (eds.) 1976: Underground Water tracing Investigations in Slovenia, 1972-1975. - Slovene academy of sciences and arts, Karst research institute, 312 pp., Ljubljana.
- Habe, F. 1963: Hydrological problems of the northern border of the Pivka basin. In: Proceedings of the 3rd speleological congress. - Savez speleologa Jugoslavije, 77-84, Sarajevo.
- Habe, F. 1970: Underworld of Predjama. - Acta Carsologica, 5, 5-94, Ljubljana.
- Habič, P. 1968: Karst territory between Idrija and Vipava. Contribution to the karst relief knowledge. - Slovene academy of sciences and arts, 243 pp., Ljubljana.
- Habič, P. 1969: Hydrographic delimitation of the Slovene Karst. - Krš Jugoslavije, 6, 79-91.
- Habič, P. 1987: Tracing tests in the watershed between Ljubljana, Idrija and Vipava. - Acta Carsologica, 16, 105-118, Ljubljana.
- Habič, P. 1989: Bifurcation of the karst river Pivka in the Black sea-Adriatic sea watershed. - Acta Carsologica, 18, 233-264 Ljubljana.
- 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 pp., Idrija.
- Kogovšek, J. 1984: Comparison between the vertical percolation of water in Classical Karst and in Planinska jama. In: Proceedings of the 9th Yugoslav speleologic congress. - Savez speleologa Jugoslavije i Speleološko društvo Hrvatske, 323-328, Zagreb.
- Kogovšek, J. 1990: Vertical percolation as a tool for the karst permeability determination. - Naš krš, 16/28-29, 99-104.
- Kogovšek, J. & Zupan, N. 1992: Transport of solid particles during the vertical percolation in karst. - Naše jame, 34, 13-19.
- Matičič, B. 1997: Agricultural threats to pollution of water of Trnovsko-Banjska Planota. In: A. Kranjc (ed.), Karst hydrogeological investigations in south-western Slovenia. - Acta carsologica, 26/1, 102-113 Ljubljana.
- 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., Dolenc, T., Kramer, V. & Weiss, S. 1983: Basic hydrogeological investigations. Report of the isotopic study of karst waters in 1983. - Jožef Stefan Institute, 49 pp., Ljubljana.
- Pezdič, J., Leskovšek-Šefman, H., Dolenc, T. & Urbanc, J. 1984: Isotopic study of karst waters. Final report on research contract No. 2845/RB. - Jožef Stefan Institute, 47 pp., Ljubljana.
- Pezdič, J., Dolenc, T., Kramer, V. & Urbanc, J. 1985: Basic hydrogeological investigations. Final report of the isotopic study of karst waters. - Jožef Stefan institute, 41 pp., Ljubljana.
- Sklash, M.G. & Farvolden, R.N. 1979: The role of groundwater in storm runoff. - Journal of Hydrology, 43, 45-65.
- Stichler, W., Trimborn, P., Maloszewski, P., Rank, D., Papesch, W. & Reichert, B. 1997: Environmental isotope investigations. In: A. Kranjc (ed.), Karst hydrogeological investigations in south-western Slovenia. - Acta carsologica, 26/1, 213-236, Ljubljana.
- Suštersič, F. & Čenčur Curk, B. 2000: Krasoslovna in strukturna karta poskusnega polja Sinji vrh.
- Trček, B. 2001: Spremljanje prenosa snovi v nezasičeni coni kraškega vodonosnika z naravnimi sledili. Doktorska disertacija. - Univerza v Ljubljani, 125 str., Ljubljana.
- Trček, B. 2002: Epikarst zone of a karst aquifer - its characteristics and importance in karst hydrogeology. - Geologija, 45/2, 573-578, Ljubljana.
- Trček, B. 2003: Epikarst zone and the karst aquifer behaviour, a case study of the Hubelj catchment, Slovenia. - Geological Survey of Slovenia, 100pp., Ljubljana.
- Trišič, N. 1997: Hydrology. In: A. Kranjc (ed.), Karst hydrogeological investigations in south-western Slovenia. - Acta carsologica, 26/1, 19-30 Ljubljana.
- Veselič, M., Čenčur Curk, B. & Čenčur Curk, B. 2001: Experimental Field site Sinji vrh. In: Tracers studies in the Unsaturated Zone and Groundwater (Investigations 1996-2001). - Beitrage zur Hydrogeologie, 45-60.