

Izotopske raziskave na območju vodnega telesa Pivovarne Union

Isotopic investigations in the area of the Union brewery water body

Branka TRČEK

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

Ključne besede: urbani vodonosnik, viri pitne vode, vodno telo Pivovarne Union, izotopske raziskave

Key words: urban aquifer, drinking-water resources, Union brewery water body, isotopic researches

Kratka vsebina

Na območju vodnega telesa Pivovarne Union se je začel izvajati leta 2003 obširen študij toka podzemne vode in prenosa snovi, katerega namen je, da se a) določi in napove širjenje podzemne vode in urbanega onesnaženja skozi pleistocenski aluvialni prodni vodonosnik ter b) analizira tveganje prenosa onesnaženja do vira pitne vode v spodnjem prodnem vodonosniku. Prvi dve raziskovalni fazi sta temeljili na izotopskih raziskavah. V 16 opazovalnih vrtinah se je vzpostavil monitoring sestave stabilnih izotopov $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ ter osnovnih fizikalno-kemičnih parametrov vode. Rezultati so omogočili vpogled v hidrodinamiko opazovanega vodonosnika, pa tudi v starostno strukturo vzorčenih vod. Identificirana je bil vertikalna komponenta toka, ki je glavni faktor za prenos in širjenje onesnaženja do podzemnega vira pitne vode.

Abstract

A study of groundwater flow and solute transport commenced in the area of the Union Brewery water body in 2003 with the intention of a) assessing and predicting the movement of groundwater and urban contaminants through the Pleistocene alluvial gravel aquifer and of b) analysing the risk of contaminant transport to drinking-water resources in the lower gravel aquifer. The first two research phases based on isotopic researches. The monitoring of groundwater composition of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ stable isotopes and basic physico-chemical parameters was established in 16 observation wells. The results have produced general information on the hydrodynamic functioning of the study area and they provided, an insight into age structure of sampled water. The vertical flow component was identified, which is the main influence on contaminant transport towards the drinking-water resource.

Uvod

Podzemna voda pleistocenskega aluvialnega prodnega vodonosnika je vse pomebnejši vir pitne vode za območje mesta Ljubljane. Ta vodni vir je neprecenljiv tudi za Pivovarno Union d.d., ki leži v urbanem in industrijskem okolju, v neposredni bližini centra Ljubljane. Pivovarna izkorišča s štiri-

rimi produkcijskimi vodnjaki kvalitetno podzemnov vodo spodnjega pleistocenkega prodnega vodonosnika in jo uporablja za proizvodnjo ustekleničene vode, brezalkoholnih pijač in piva. Omenjeni vodonosnik je ločen z neprepustno bariero od zgornjega prodnega vodonosnika, za katerega pa so dosedanje raziskave pokazale, da je onesnažen tako mikrobiološko kot kemično. Dose-

danje meritve hkrati kažejo, da onesnažena voda zgornjega vodonosnika ne vpliva na vodnjake pivovarne. Le-ti so bili uspešno obnovljeni tekom zadnje deкаде, tako da specifična geološka sestava njihovega vplivnega območja še vedno omogoča izkoriščanje zelo kakovostnega podzemnega vodnega vira spodnjega prodnega vodonosnika.

Da bi zaščitili vodno telo v urbanem okolju pred onesnaženjem in vzpostavili nadzor, ki bo omogočal zgodnje odkrivanje možnega onesnaženja podzemnega vodnega vira, se je začel izvajati leta 2003 na območju vodnega telesa Pivovarne Union obširen študij toka podzemne vode in prenosa snovi. Le-ta je tesno povezan z uporabo zanesljive in učinkovite raziskovalne metodologije, ki zagotavlja a) znanstveno razumevanja mehanizmov, ki nadzirajo tok in prenos snovi/onesnaženja v vodonosniku in b) monitoring teh procesov (Trček, 2001; 2003). Glede na to se združuje klasične neposredne geološke in hidrogeološke metode s posrednimi - analizo prevladujočih organskih, anorganskih in mikrobioloških substanc ter izotopske sestave vodika in kisika.

Študij toka in prenosa snovi zahteva zadovoljivo število fizikalno-kemijskih podatkov, ki omogočajo statistično obdelavo, pa tudi numerično modeliranje. Projekt se zato obravnava dolgoročno. Izvaja se po raziskovalnih fazah, ki druga drugo dopolnjujejo in nadgrajujejo. Tema tega članka so izotopske raziskave $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$, ki so se izvajale v okviru prvih dveh letnih faz: julij 2003- junij 2004 in julij 2004-junij 2005.

Raziskovalno območje

Raziskovalno območje obsega napajalno zaledje podzemnih vodnih virov, ki jih izkorišča Pivovarna Union d.d. (slika 1). Že v uvodu je bilo omenjeno, da je tu območje pleistocenskega aluvialni prodnega vodonosnika, ki ga bariere, sestavljene iz leč neprepustnih sedimentov, ločujejo v zgornji in spodnji prodni vodonosnik. Hidrogeološke in geološke lastnosti raziskovalnega območja so opisane podrobno v poročilih Inštituta za rudarstvo, geotehnologijo in okolje (Veselič, 2000) ter GeoSi Inštituta za zemljeljslovje d.o.o (Juren, 2004).

Raziskovalni poligon (slika 1) je razdeljen na 3 cone: območje pivovarne (cona I), bliž-

nja okolica pivovarne (cona II) in širša okolica pivovarne, ki obsega celotno napajalno zaledje obravnavanih vodnih virov (cona III). V okviru I. in II. raziskovalne faze se je proučeval tok in prenos snovi s pomočjo monitoringa, ki se je vzpostavil v 16 opazovalnih vrtinah (piezometrih), predstavljenih na sliki 2. Piezometri zajemajo a) podzemno vodo spodnjega prodnega vodonosnika, b) podzemno vodo zgornjega prodnega vodonosnika ali pa c) podzemno vodo obeh vodonosnikov.

V coni I je sedem piezometrov:

- PU- vr1, PU-vr2, PU-vr3, PU-vr4, PU-vr9, PU-vr10 in PU-vr11 (slika 1).

V coni II so trije piezometri:

- PU-vr5, PU-vr6 in PU-vr7 (slika 1).

V coni III pa je šest piezometrov:

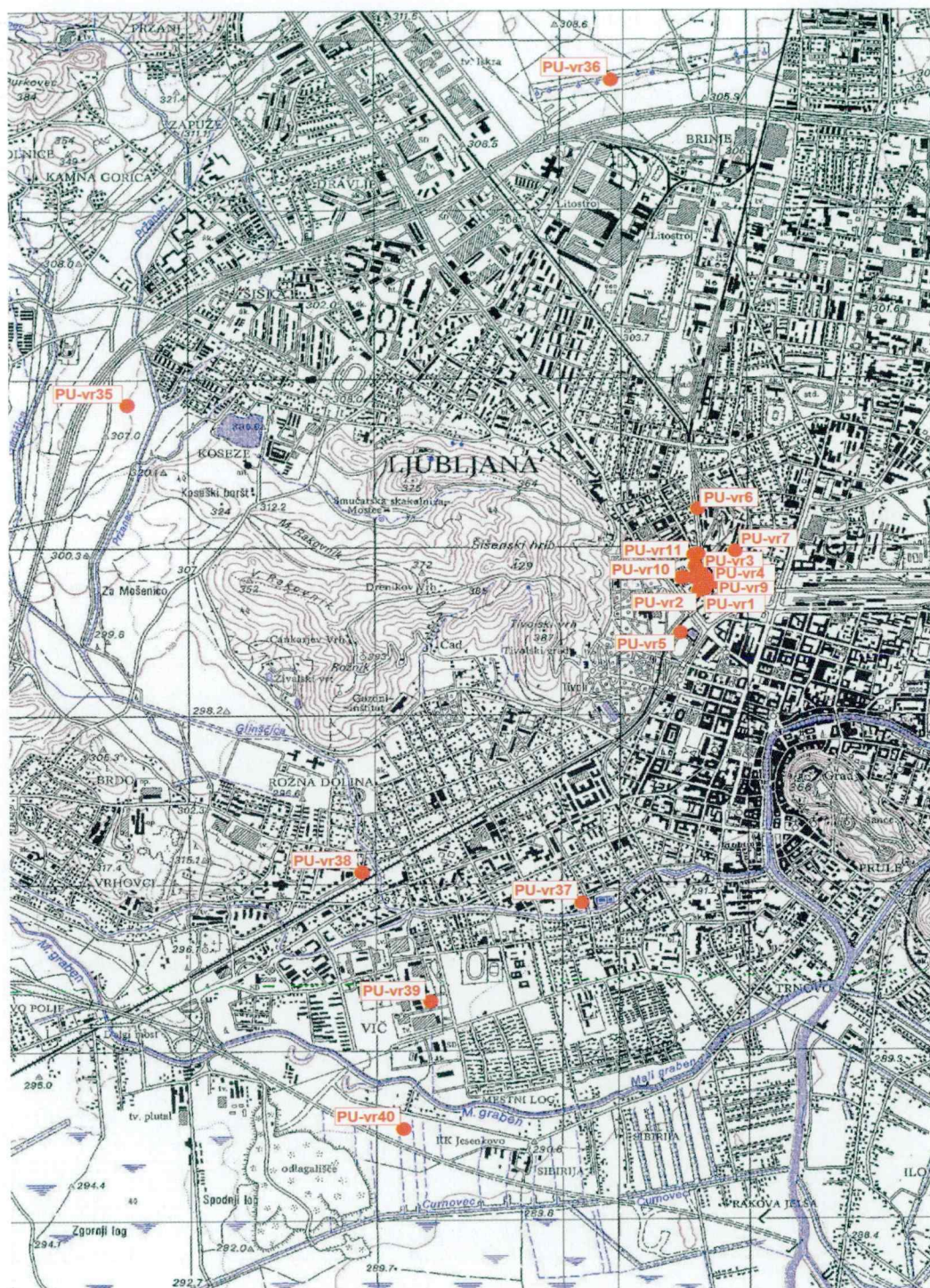
- PU-vr35, PU-vr36, PU-vr37, PU-vr38, PU-vr39 in PU-vr40.

Metode in tehnike

Izotopske raziskave temeljijo na stabilnih izotopih kisika in devterija ($\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$), ki sta idealni konzervativni sledili, posebej primerni za spremljanje prenosa infiltrirane padavinske vode v vodonosniku, saj se po vstopu v nizko temperaturni vodonosnik večinoma ne spreminjata (Clark & Fritz, 1997; Kendall & McDonell, 1998). Enačba globalne meteorne premice (GMWL - Global Meteoric Water Line) opisuje njun linearni odnos v padavinah (Craig, 1961; Rozanski et al., 1993):

$$\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10 \quad (1)$$

Za posamezne regije pa so značilne lokalne meteorne premice (LMWL - Local Meteoric Water Line), ki se od globalne lahko razlikujejo tako po odseku kot koeficientu nagiba premice. Odsek na osi y (10 ± 5) in koeficient nagiba premice (8 ± 0.5) se spreminjata v odvisnosti od podnebnih lastnosti - procesov evaporacije in kondenzacije (Clark & Fritz, 1997). Odvisnost izotopske sestave kisika in vodika ($\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$) od temperature ima za posledico efekte izotopske frakcionacije: podnebni, sezonski in višinski efekt (Hoefs, 1997; Clark & Fritz, 1997; Pezdič, 1999). Izotopske raziskave slonijo prav na analizi omenjenih izotopskih efektov. Višinski efekt se uporablja za določevanje območja napajanja podzemnih vod (nižje vrednosti odsevajo območje z višjo nadmorsko višino), sezonsko nihanja



Slika 1. Raziskovalno območje

Figure 1. Study site

$\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$ v padavinah pa predstavlja vhodni signal, ki se lahko uporablja za datiranje podzemnih vod. Padavine, ki napajajo vodonosnik, se namreč v njem mešajo s predhodno uskladiščeno podzemno vodo, kar je funkcija fizikalno-kemičnih in hidravličnih lastnosti vodonosnika. V vodonosniku se prične amplituda vhodnega signala zmanjševati. Različne stopnje mešanja in homogenizacije povzročajo razlike v $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$ podzemnih vod vodonosnika oziroma razlike v amplitudah njenega sezonskega nihanja. Te razlike omogočajo ločevanje vod z različnimi zadrževalnimi časi. Daljši je zadrževalni čas podzemne vode v vodonosniku, manjša je amplituda sezonskega nihanja $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$ v njej. Na podlagi primerjave med izotopsko sestavo padavin (vhodni podatek) ter vod vodonosnika je torej mogoče dobiti informacije o dinamiki vod v opazovanem sistemu, pa tudi o starostni strukturi (Trček et al., 2001; 2006).

V okviru I. in II. raziskovalne faze se je izvajalo mesečno vzorčenje podzemne vode za izotopske analize $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$. Vzorec je potekalo na 16 pizometrih, opisanih v prejšnjem poglavju. Sočasno so se vzorčile padavine na postaji, ki je bila narejene v neposredni bližini Pivovarne Union, pri vodu v lizimeter (slika 1), potekale pa so tudi "in situ" meritve osnovnih fizikalno-kemijskih parametrov: pH, temperatura in elektroprevodnost (v članku je obravnavan le slednji parameter, ki opozarja na onesnaženje). Pri vzorčenju vode so se upoštevala navodila, ki sta jih zbrala Clark in Fritz (1997).

Izotopske analize je opravil laboratorij GSF - Institute of Groundwater Ecology, Neuherberg, Nemčija. Vrednosti izotopske

sestave ^{18}O in ^2H so podane z relativno vrednostjo δ ,

$$\delta_x (\text{‰}) = (R_x / R_{\text{St}} - 1) \cdot 1000 \quad (2)$$

kjer je R_x izotopsko razmerje med težjim in lažjim izotopom elementa v snovi (na primer $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$), R_{St} pa izotopsko razmerje v ustreznem mednarodno sprejetem standardnem vzorcu. Standardna napaka meritev je $\pm 0.05\text{‰}$ za kisik in $\pm 0.5\text{‰}$ za vodik.

Podatki so statistično obdelani s pomočjo škatlastih diagramov (Helsel & Hirsch, 1992), ki nazorno prikazujejo razpon ter porazdelitev podatkov, omogočajo pa tudi vizualno primerjavo in ločevanje posameznih vzorčnih mest. Škatlasti diagram ponazarja srednjo vrednost (srednja črta škatle), razpršenost (višina škatle, ki predstavlja 50% podatkov), asimetričnost (z razmerjem višin posameznih polovic škatle) in prisotnost skrajnih vrednosti (oddaljene in zelo oddaljene vrednosti).

Rezultati in razprava

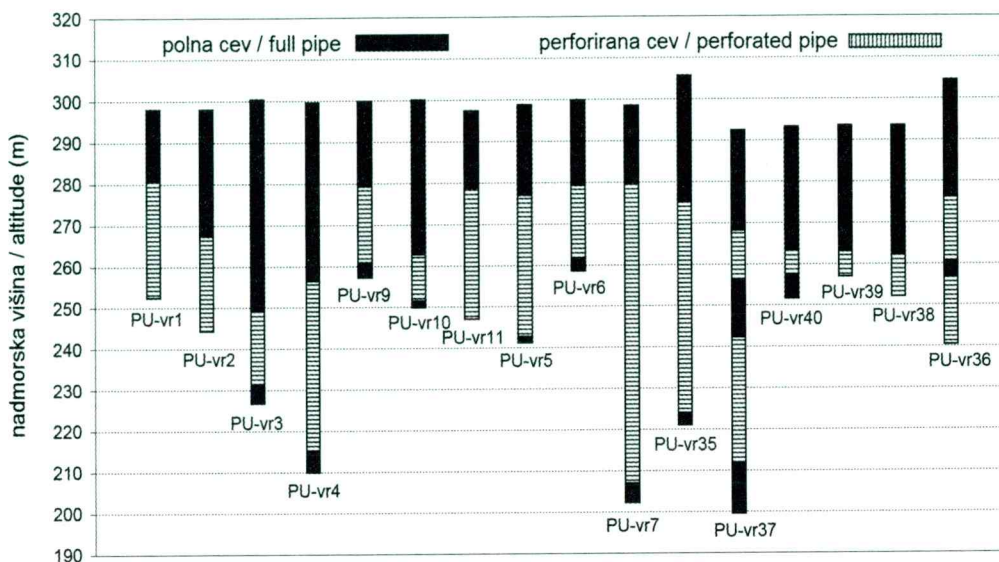
Rezultati meritev $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ ter elektroprevodnosti v mesečno vzorčenih vodah so prikazani v tabeli 1 ter na slikah 3-7. Za obe raziskovalni fazi predstavlja tabela 1 srednje vrednosti obravnavanih parametrov, medtem ko so prikazane njihove statistične lastnosti bolj detajlno s škatlastimi diagrami na slikah 3 in 4. Ker sta $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ linearno odvisni [enačba (1)], interpretacija izotopskih podatkov sloni le na izotopski sestavi kisika, ki se obravnava kot vodilni parameter. Sama linearna odvisnost med $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ se ni proučevala v okviru II. raziskovalne faze, ker je število opazovanj premajhno za podrobnejšo statistično obdelavo

I. faza/faze	PU-vr1	PU-vr2	PU-vr3	PU-vr4	PU-vr9	PU-vr10	PU-vr11	PU-vr5	PU-vr6	PU-vr7	PU-vr35	PU-vr37	PU-vr40	PU-vr39	PU-vr38	PU-vr36	pad./precip.
$\delta^{18}\text{O}$ (o/oo)	-9,05	-9,08	-9,02	-9,02	-8,70	-9,21	-8,90	-9,13	-8,84	-8,72	-8,95	-8,92	-9,03	-9,03	-8,76	-8,95	-9,07
$\delta^2\text{H}$ (o/oo)	-60,15	-60,08	-59,88	-59,70	-58,35	-61,68	-59,40	-60,73	-59,25	-58,30	-59,85	-59,63	-60,40	-60,28	-58,23	-59,65	-67,00
D	12,22	12,58	12,39	12,57	10,98	12,03	11,87	12,40	11,43	11,20	11,60	11,75	11,80	11,97	11,91	11,94	10,45
EP/EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	463,5	468,5	422,5	424,5	895	334,5	876,5	386	622	858,5	454	693	370	436,5	420	449,5	

II. faza/faze	PU-vr1	PU-vr2	PU-vr3	PU-vr4	PU-vr9	PU-vr10	PU-vr11	PU-vr5	PU-vr6	PU-vr7	PU-vr35	PU-vr37	PU-vr40	PU-vr39	PU-vr38	PU-vr36	pad./precip.
$\delta^{18}\text{O}$ (o/oo)	-8,94	-9,02	-8,94	-8,87	-8,80	-9,17	-8,87	-9,02	-8,78	-8,73	-8,86	-8,83	-9,00	-8,97	-8,77	-8,84	-8,12
$\delta^2\text{H}$ (o/oo)	-60,3	-60,85	-59,85	-59	-59,5	-61,25	-59,7	-60,5	-60	-59,25	-59,45	-59,1	-60,3	-60	-58,45	-59,2	-56,95
D (o/oo)	11,44	11,14	11,82	11,97	10,65	11,83	11,26	11,51	10,56	10,67	11,16	11,31	11,77	11,8	11,66	12	11,72
EP/EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	504	470	432	438	902	351	862	390	639	894	442	705	367	441	430	443	

Tabela 1. Srednje vrednosti $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, ^2H odseka ($D = \delta^2\text{H} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$) ter elektroprevodnosti vzorčenih vod

Table 1. Mean values of δ^{18} , $\delta^2\text{H}$, ^2H intercept ($D = \delta^2\text{H} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$) and electroconductivity of sampled waters



Slika 2. Opazovalne vrtime, na katerih je potekal monitoring $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ ter osnovnih fizikalno-kemijskih parametrov vode

Figure 2. Observation well for monitoring of groundwater composition of $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ and basic physico-chemical parameters

in jo bo bolj smiselno obravnavati ob koncu III. raziskovalne faze. V tej fazi se je pričelo tudi vzorčenje najpomembnejših površinskih vodotokov, ki lahko vplivajo na izotopsko sestavo obravnavanega vodonosnika.

Primerjava srednjih vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ in elektroprevodnosti I. in II. raziskovalne faze v tabeli 1 kaže, da so vrednosti obeh parametrov na splošno višje v obdobju II. faze, kar je razvidno tudi iz škafastih diagramov na slikah 3 in 4. V II. fazi raziskav je nihala $\delta^{18}\text{O}$ padavin med $-3,91$ in $-16,10$ ‰, srednja vrednost pa je bila $-8,12$ ‰. V podzemnih vodah so se gibale vrednosti parametra med $-8,55$ in $-9,26$ ‰, medtem ko so bile srednje vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ od $-8,73$ do $-9,17$ ‰.

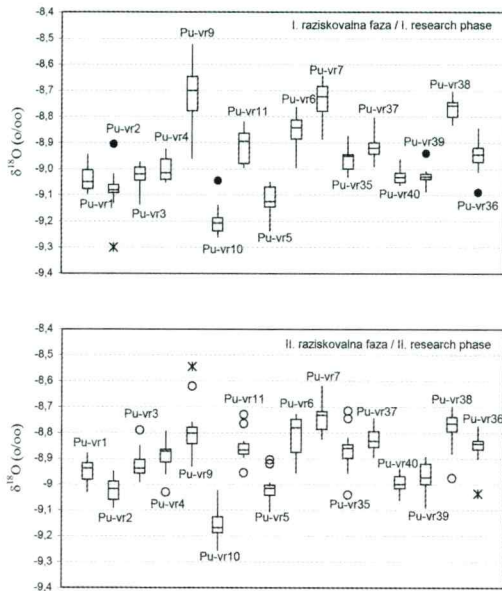
V obeh raziskovalnih fazah je razpon vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ v padavinah veliko večji kot v podzemnih vodah (tabela 1), kar odseva daljši zadrževalni čas vod v vodonosniku. Vrednosti podzemnih vod na sliki 5 se precej razlikujejo med seboj, kar je lahko posledica dveh faktorjev - različnega zadrževalnega časa vzorčenih vod in različne nadmorske višine območja, s katerega se te vode napajajo.

Na podlagi podatkov, prikazanih na sliki 3, so bile razdeljene vzorčene podzemne vode v štiri skupine:

- skupina A – vode vzorčnih mest PU-vr9, PU-vr7 in PU-vr38 (vode z najvišjimi vrednostmi $\delta^{18}\text{O}$);
- skupina B – vode vzorčnih mest PU-vr11, PU-vr6, PU-vr35, PU-vr37 in PU-vr36;
- skupina C – vode vzorčnih mest PU-vr1, PU-vr2, PU-vr3, PU-vr4, PU-vr40 in PU-vr39;
- skupina D – vode vzorčnih mest PU-vr10 in PU-vr5 (vode z najnižjimi vrednostmi $\delta^{18}\text{O}$).

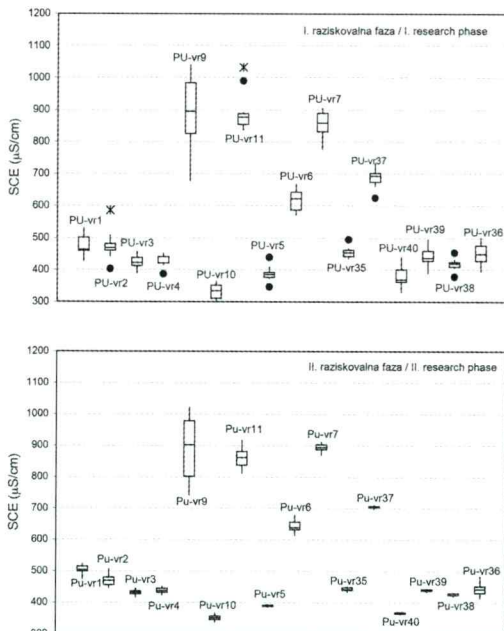
Pri tem je treba opozoriti na določene spremembe, ki jih je najverjetneje povzročilo različno hidrodinamično obnašanje vodnega telesa med I. in II. raziskovalno fazo. Padavine – njihova razporeditev, količina in intenziteta, so glavni faktorji, ki nadzirajo hidrodinamično obnašanje raziskovanega območja. Za obe raziskovalni fazi so prikazane dnevne padavine na slikah 6 a-d. Le-ta hkrati ilustrirata časovno nihanje $\delta^{18}\text{O}$ v obdobju obeh raziskovalnih faz in, v povezavi s slikami 3-5 in 7, odsevata tok in prenos snovi v opazovanem vodnem telesu.

V skupini A so statistične lastnosti $\delta^{18}\text{O}$ vode piezometrov PU-vr7 in PU-vr38 podobne v obeh raziskovalnih fazah, spremembe pa so očitne za piezometer PU-vr9 (slika 3). Razpon vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ piezometra PU-



Slika 3. Rezultati meritev izotopske sestave kisika v podzemnih vodah

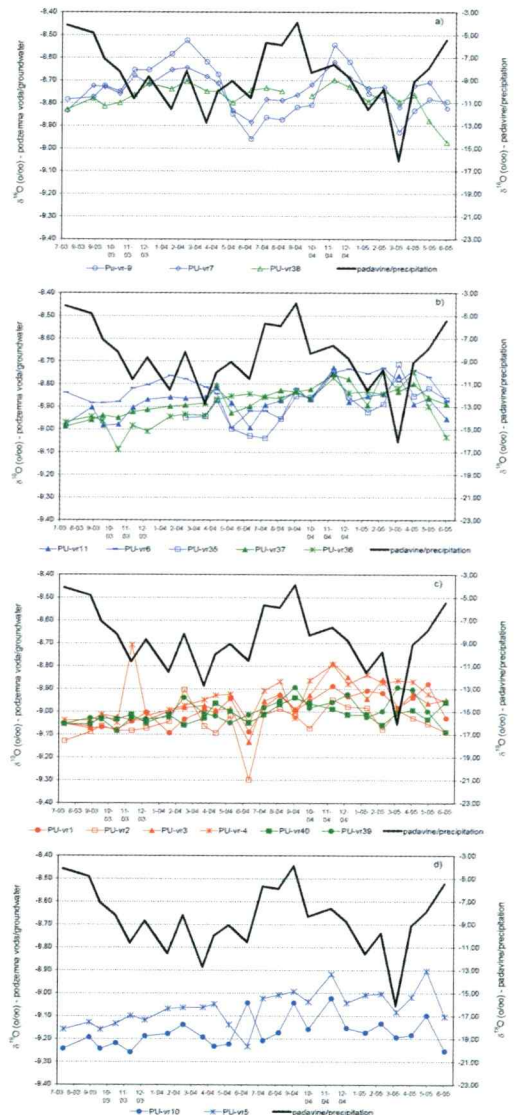
Figure 3. Results of measurements of groundwater oxygen isotopic composition



Slika 4. Rezultati meritev specifične elektroprevednosti (SEC) v podzemnih vodah

Figure 4. Results of measurements of groundwater specific electroconductivity (SEC)

vr9 je sicer v obeh raziskovalnih fazah podoben, razlikuje pa se njihova porazdelitev. V II. raziskovalni fazi so podatki asimetrično razporejeni in sicer bolj proti negativnim vrednostim, ki so značilne za podzemne vode skupine B (npr. PU-vr11 in PU-vr6). Kljub opisanim razlikam, pa je mogoče privzeti, da so podzemne vode skupine A izotopsko sorodne, zato je njihovo napajanje najverjetneje vezano na isto območje (slika 1).



Slika 5. Časovno nihanje izotopske sestave kisika v vzorčevanih vodah

Figure 5. Time-trend plot of sampled water oxygen isotopic composition

Vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ podzemnih vod skupine A so najvišje izmed vseh, vendar to ne pomeni, da so te vode tudi najmlajše (slika 3). Vode PU-vr9 in PU-vr7 so sorodne tudi po elektroprevodnosti (slika 4). Visoke vrednosti parametra opozarjajo na onesnaženje in s tem na lokalno napajanje. Voda piezometra PU-

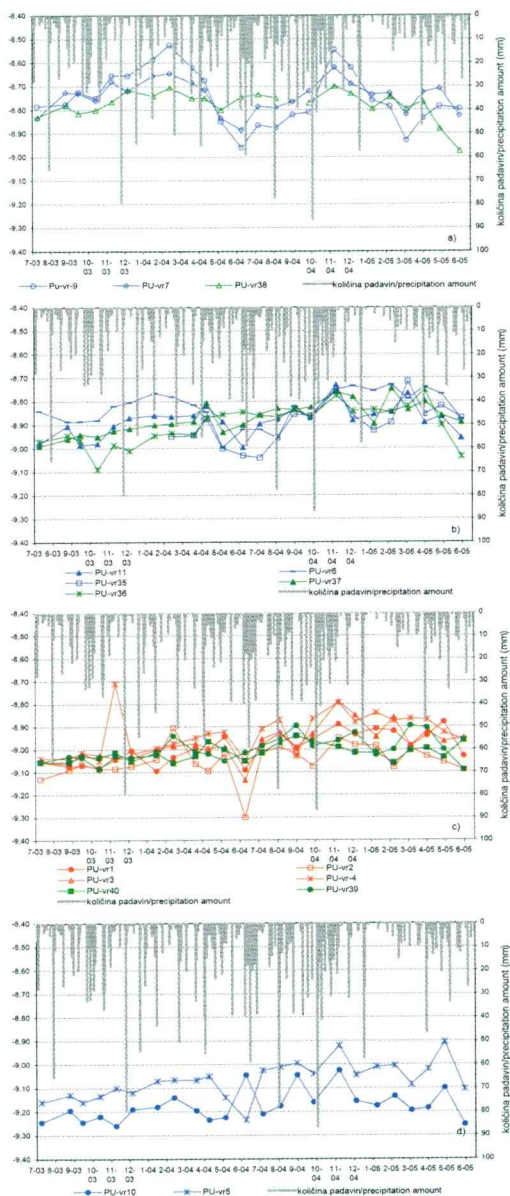
vr38 ni kemijsko onesnažena (sliki 4 in 7), vendar se predvideva, da je tudi napajanje te vrtnice lokalno vezano na območja Rožnika.

Sinteza informacij kaže, da je podzemna voda skupine A uskladiščena v plasteh zgornjega prodnega vodonosnika, ki so lokalno pod vplivom napajanja z območja Šišenskega hriba in Rožnika (slika 1).

V skupini B so izpostavljene vrednosti piezometra PU-vr6. Tudi v tem primeru se razlikuje razporeditev podatkov med obema raziskovalnima fazama (slika 3). V II. fazi se velik odstotek vrednosti prekriva s tistimi, ki so značilne za skupino A, kar odseva podobnost med podzemnimi vodami piezometrov PU-vr6 in PU-vr7. Kot za prejšnjo skupino podzemnih vod, je mogoče zaključiti, da pripada podzemna voda piezometrov PU-vr6 in PU-vr11 zgornjemu prodnemu vodonosniku, ki je pod vplivom lokalnega onesnaženja, kar je še posebej očitno v primeru vode PU-vr11 (sliki 4 in 7). Skupini B pripada tudi voda piezometra PU-vr37, ki ima podobno izotopsko sestavo kot voda PU-vr11 (slika 6b), medtem ko niha njena elektroprevodnost podobno kot v vodi PU-vr6 (slika 7). Tudi ta voda je kemijsko onesnažena, kar odseva lokalne vplive. Podzemne vode piezometrov PU-vr35 in PU-vr36 imajo podobne izotopske lastnosti, le da te vode niso pod vplivom kemijskega onesnaženja (sliki 4 in 7).

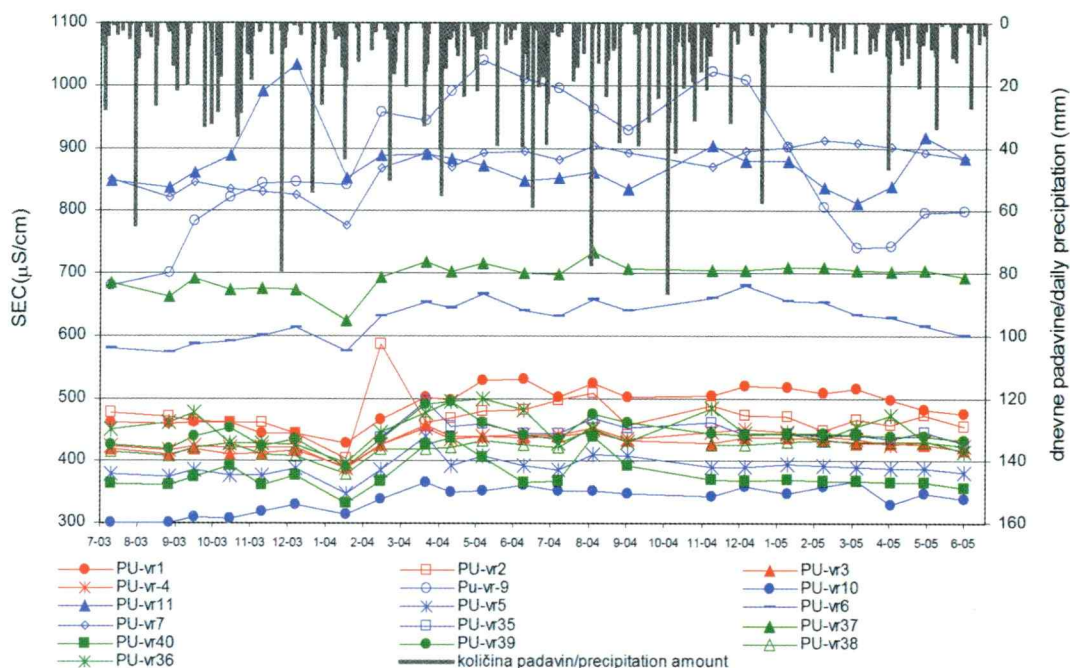
Predstavljeni podatki kažejo, da je tudi podzemna voda skupine B uskladiščena v določenih plasteh zgornjega prodnega vodonosnika, ki pa se ob določenih hidrodinamičnih pogojih lahko meša s podzemno vodo, uskladiščeno v višjih plasteh tega vodonosnika.

V skupino C spadajo podzemne vode piezometrov PU-vr1, PU-vr2, PU-vr3 in PU-vr4, ki zajemajo vodo spodnjega prodnega vodonosnika in podzemne vode dveh piezometrov z barjanskega obrobja (PU-vr39 in PU-vr40). Vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ te skupine vod so nižje od prejšnjih skupin, meritve elektroprevodnosti pa ne odsevajo kemijskega onesnaženja (slike 3-7). V I. raziskovalni fazi so imele vode PU-vr1 in PU-vr2 podobne razpone vrednosti in srednje vrednosti, kar velja tudi za vode PU-vr3 in PU-vr4. V II. raziskovalni fazi so razlike v $\delta^{18}\text{O}$ med obravnavanimi pari vod večje. Izstopajo predvsem vrednosti PU-vr4 (slika 3 in 6c), ki



Slika 6. Časovno nihanje izotopske sestave kisika v podzemnih vodah

Figure 6. Time-trend plot of groundwater oxygen isotopic composition



Slika 7. Časovno nihanje specifične elektroprevodnosti (SEC) v podzemnih vodah

Figure 7. Time-trend plot of groundwater specific electroconductivity (SEC)

se prekrivajo v II. fazi v znatnem deležu z vrednostmi sosednjega piezometra PU-vr9 (slika 6a). Ta informacija je zelo pomembna in opozarja, da je pri določenih hidrodinamičnih pogojih prišlo verjetno do vertikalnega preboja vode iz zgornjega v spodnji prodni vodonosnik. Za vode PU-vr39 in PU-vr40 je mogoče ugotoviti, da so izotopsko zelo sorodne (slike 3 in 6c), kar odseva podobno območje napajanja, medtem ko se po kemijski sestavi precej razlikujejo (slike 4 in 7).

Podzemna voda skupine C je torej uskladiščena v plasteh spodnjega prodnega vodonosnika, ki se lahko ob ekstremnih hidrodinamičnih pogojih napaja iz zgornjega prodnega vodonosnika.

Za podzemne vode skupine D, vode piezometrov PU-vr10 in PU-vr5, so značilne najnižje vrednosti izotopske in kemijske sestave (slike 3-7), kar najverjetneje odseva lokalno napajanje z območja Šišenskega hriba (slika1).

Pozornost je treba nameniti še slikam 5 in 6a-d, ki predstavljajo časove trende $\delta^{18}\text{O}$ vzorčenih vod. Le-te kažejo, da so izmerjene v I. raziskovalni fazi najvišje vrednosti fe-

bruarja 2004. Na podlagi meritev elektroprevodnosti, prikazanih na sliki 7, se predvideva, da je prišlo takrat do intenzivne infiltracije padavinske vode in stopljenega snega v vodonosnik, kar je hkrati povzročilo tudi izpodrivanje predhodno uskladiščene vode iz višjih v nižja območja proučevanega vodnega telesa. Podoben pojav je mogoče zaslediti tudi v obdobju II. raziskovalne faze - novembra 2004 (slike 4-6). Takrat je padla velika količina padavin, ki je morala, glede na vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ na slikah 4-6, povzročiti intenzivno vertikalno napajanje vodnega telesa. Meritve elektroprevodnosti na sliki 7 opozarjajo, da je infiltrirana padavinska voda povzročila batni efekt - nova voda je izpodrinila predhodno uskladiščeno vodo v nižja območja vodnega telesa.

Sklepi

Rezultati I. in II. faze izotopskih raziskav so omogočili vpogled v hidrodinamiko opazovanega pleistocenskega aluvialnega prodnega vodonosnika in mehanizme toka in prenosa snovi. Identificiran je bil vertikalni

proces napajanja, ki ima zelo veliko vlogo pri analizi ranljivosti spodnjega prodnega vodonosnika. Vertikalni tok je glavni faktor za prenos in širjenje onesnaženja do tega pomembnega vira pitne vode, zato bo vertikalno napajanje ena glavnih tem nadaljnjih raziskovalnih faz. Predvsem se bo proučilo, kdaj in kako pogosto se pojavlja vertikalni tok. Hkrati bomo skušali odgovoriti tudi na odprta vprašanja, povezana s starostjo vzorčenih vod in z mešanjem različnih tipov vod na raziskovalnem poligonu. Sinteza rezultatov vseh raziskav bo omogočila, da se a) določi in napove širjenje podzemne vode in urbanega onesnaženja skozi pleistocenski prodni vodonosnik ter b) analizira tveganje prenosa onesnaženja do vira pitne vode v spodnjem prodnem vodonosniku. Predvideni rezultati bodo označili lokalne hidrogeološke razmere, omogočili razumevanje procesov in vzrokov za spreminjanje okolja in pripomogli k izboljšanju kriterijev za upravljanje in gospodarjenje z vodnimi viri v urbanem okolju.

Isotopic investigations in the area of the Union brewery water body

Summary

In order to protect the urban drinking-water resources from pollution an extensive study of groundwater flow and solute transport commenced in the area of the Union Brewery water body in 2003 with the intention of a) assessing and predicting the movement of groundwater and urban contaminants through the Pleistocene alluvial gravel aquifer and of b) analysing the risk of contaminant transport to drinking-water resources in the lower gravel aquifer.

The first two research phases based on isotopic researches. The monitoring of groundwater composition of ^{18}O in ^2H stable isotopes and basic physico-chemical parameters was established in 16 observation wells (piezometers), located inside of a research polygon that is divided into three zones: zone I - the brewery area (PU-vr1, PU-vr2, PU-vr3, PU-vr4, PU-vr9, PU-vr10, PU-vr11), zone II - the brewery vicinity (PU-vr5, PU-vr6 in PU-vr7) and zone III - the brewery catchment area (PU-vr35, PU-vr36, PU-vr37, PU-vr38, PU-vr39, PU-vr40) (Fig.

1). The piezometers (Fig. 2) capture a) groundwater of the lower gravel aquifer, b) groundwater of the upper gravel aquifer or c) both of them.

Data of the groundwater $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and electroconductivity composition are presented in Table 1 and on Figures 4-9. Their interpretation bases on a leader parameter - $\delta^{18}\text{O}$.

The statistical characteristics of groundwater and precipitation $\delta^{18}\text{O}$ are graphically illustrated with boxplots on Figures 4 and 5. The distributions of data sets significantly distinguish among themselves, which should result from two factors - different residence times of groundwater and different altitudes of groundwater recharge areas. According to Figure 5 sampled groundwaters were divided into four groups:

- group A - waters of piezometers PU-vr9, PU-vr7 and PU-vr38 (waters with the highest values of $\delta^{18}\text{O}$);
- group B - waters of piezometers PU-vr11, PU-vr6, PU-vr35, PU-vr37 and PU-vr36;
- group C - waters of piezometers PU-vr1, PU-vr2, PU-vr3, PU-vr4, PU-vr40 and PU-vr39;
- group D - waters of piezometers PU-vr10 and PU-vr5 (waters with the lowest values of $\delta^{18}\text{O}$).

The electroconductivity data (Fig. 6 and 9) completes information obtained by the leader parameter (Figs. 4, 5, 7 and 8) and the results of previous investigations (Juren, 2004; Veselič, 2000), which provides an insight into the flow and solute transport processes in the urban water body. It was estimated that groundwaters of groups A and B belong to the upper gravel aquifer, which is influenced by local contamination. Groundwaters of group C belong to the lower gravel aquifer, while groundwaters of group D belong to the upper gravel aquifer, which is mixing with waters that flow from the hill Šišenski hrib (Fig. 1).

An additional comment refers to outstanding values. In Figures 5 and 8 the attention should be given to PU-vr4 and PU-vr9 data. During the II. research phase a significant portion of their $\delta^{18}\text{O}$ values coincided, which reflects a vertical breakthrough of groundwater of the upper gravel aquifer into the lower gravel aquifer under specific hydrodynamic conditions. On the other hand in Fe-

bruar 2004 and November 2004 the time-trend plot of $\delta^{18}\text{O}$ (Figs. 7 and 8) points out the piston effect – new event water displaced prestored water into aquifer lower parts.

It could be concluded that the results of the I. and II. research phases have produced general information on the hydrodynamic functioning of the study area and provided an insight into age structure of sampled water. The vertical flow component was identified, which is the main influence on contaminant transport towards the drinking-water resource of the lower gravel aquifer. Hence, investigation of the occurrence and frequency of rapid recharge events represents one of the main themes of the next research phases.

Zahvala

Za sofinanciranje študije se zahvaljujem Pivovarni Union d.d., podjetjema JP Vodovod – Kanalizacija d.o.o. in Snaga d.o.o. pa za pomoč pri izvajanju monitoringa.

References

- Clark, I.D. & Fritz, P. 1997: *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. – Lewis Publishers, 311 pp., New York.
- Craig, H. 1961: Isotopic variations in meteoric waters. – *Science*, 133, 1702–1703.
- Helsel, D.R. & Hirsch, R.M. 1992: *Statistical Methods in Water Resources*. – Elsevier, 522 pp., Amsterdam.
- Hoefs, J. 1997: *Stable Isotope Geochemistry*, Fourth Completely Revised, Updated and Enlarged Edition. – Springer-Verlag, 168 pp., Berlin-Heidelberg.
- Juren, A. 2004: Hidrogeološke razmere na vplivnem območju vodnih virov Pivovarne Union d.d. – GeoSi Institut za zemljelovje d.o.o., Ljubljana.
- Kendall, C. & McDonnell, J.J. 1998: *Isotope tracers in catchment hydrology*. – Elsevier, 722 pp., Amsterdam.
- Pezdič, J. 1999: *Isotopes and geochemical processes: University textbook*. – University of Ljubljana, Faculty of natural sciences, Department of geology, 269 pp., Ljubljana.
- Rozanski, K., Araguds-Araguds, L. & Gonfiantini, R. 1993: Isotopic patterns in modern global precipitation. V: Swart, P.K., Lohman, K.C., McKenzie J. & Savin S. (ur.), *Climate Change in Continental Isotopic Records*, Geophysical Monograph 78. – American Geophysical Union, 1–36, Washington, D.C.
- Trček, B., Pezdič, J., Veselič, M. & Stiehler, W. 2001: Changes in d^{18}O composition of the Hubelj spring under different hydrogeological conditions. V: Seiler, P. & Wöhrlich, S. (eds.), *Proceedings of the Conference on New Approaches Characterizing Groundwater Flow*. – Balkema Publishers, 207–211, Lisse.
- Trček, B. 2001: *Solute transport monitoring in the unsaturated zone of the karst aquifer by natural tracers: PhD thesis*. – University of Ljubljana, 125 pp., Ljubljana.
- Trček, B. 2003: *Epikarst zone and the karst aquifer behaviour, a case study of the Hubelj catchment, Slovenia*. – Geological Survey of Slovenia, 100 pp., Ljubljana.
- Trček, B., Veselič, M. & Pezdič, J. 2006: The vulnerability of karst springs – a case study of the Hubelj spring (SW Slovenia). – *Environmental geology*, 49/6, 865–874.
- Veselič, M. 2000: *Geološke in hidrogeološke raziskave na vplivnem območju vodnih virov Pivovarne Union, končno poročilo*. – Institut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje, Ljubljana.