

## Izotopske raziskave podzemne vode Ljubljanskega polja

### Isotope investigations of groundwater from Ljubljansko polje (Slovenia)

Janko Urbanc

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva 14, 1000 Ljubljana, Slovenija

Brigita Jamnik

Vodovod - Kanalizacija d.o.o., Ambrožev trg 7, 1000 Ljubljana, Slovenija

*Ključne besede:* Ljubljansko polje, podzemna voda, izotopi kisika  
*Key words:* Ljubljansko polje, groundwater, oxygen isotopes

#### Kratka vsebina

V podzemni vodi peščeno-prodnega vodonosnika Ljubljanskega polja se pojavljata dve komponenti različnega izvora: lokalno infiltrirane padavine ter voda iz reke Save. Na osnovi izotopske sestave kisika v vodi je bilo možno oceniti deleže obeh komponent v podzemni vodi Ljubljanskega polja. V obdobju opazovanja je komponenta reke Save predstavljala od 19 do 100 % celokupnega volumna podzemne vode v posameznih vodnjakih.

#### Abstract

Two components of different origin occur in the groundwater of the sand-gravelly aquifer Ljubljansko polje: locally infiltrated precipitation and water from the Sava river. The proportion of both components was assessed on the basis of groundwater oxygen isotope composition. During the observation period, the Sava river component was represented by 19 to 100 % of the total groundwater volume in individual wells.

#### Uvod

Ljubljansko polje predstavlja peščeno-prodni vodonosnik na neprepustni podlagi iz glinovcev karbonske in permske starosti. Geološke ter hidrogeološke razmere Ljubljanskega polja podrobneje opisuje Ž i b n i k (1971). V vodonosniku Ljubljanskega polja prihaja do mešanja podzemnih vod iz dveh virov (D r o b n e i n s o d., 1997): prva komponenta izhaja iz reke Save, ki zateka v vodonosnik na kontaktu s prodnimi sedimenti, druga komponenta pa je padavinska voda, ki se infiltrira na območju Ljubljanskega polja.

Z raziskavo smo želeli ugotoviti, kolikšen je delež posameznih virov napajanja podzemne vode Ljubljanskega polja. Za ugotavljanje hidrogeoloških pogojev v vodo-

nosniku smo izbrali izotop  $^{18}\text{O}$ . Stabilne izotope v hidrogeoloških raziskavah uporabljamo kot naravno sledilo, s katerim je možno ugotavljati procese v vodonosnikih. Ker se sestava stabilnih izotopov v podzemni vodi ne spreminja, so idealni za ugotavljanje območij napajanja, kvantifikacijo mešalnih razmerij v podzemni vodi ter za ugotavljanje dinamike obnavljanja vode v podzemnih vodonosnikih.

Izotopska sestava kisika v vodi je v veliki meri pogojena z nadmorsko višino terena, na katerem so se infiltrirale padavine. Ker ima reka Sava v primerjavi z Ljubljanskim poljem drugačno nadmorsko višino zaledja, smo pričakovali razliko v izotopski sestavi obeh vhodnih komponent podzemne vode Ljubljanskega polja, kar je osnova za ugotavljanje deležev mešanja.

Vzorčevanja so potekala v vodnjakih vseh štirih vodarn Ljubljanskega polja: Kleče, Šentvid, Hrastje in Jarški prod. Da bi zmanjšali število vzorcev, smo v sedmih vodnjakih izvajali vzorčevanja v mesečnih intervalih, v ostalih vodnjakih pa smo vzorčevali v tromesečnih intervalih. Izotopska sestava kisika v vodi je bila izmerjena z metodo izotopskega uravnotežanja med vodo in  $\text{CO}_2$  ob konstantni temperaturi. Meritve izotopske sestave kisika v vodi so bile opravljene z masnim spektrometrom Varian Mat 250 na Inštitutu J. Stefan v Ljubljani. Rezultati izotopskih analiz so podani v promilih glede na mednarodni standard SMOW.

### Izotopska sestava vhodnih komponent

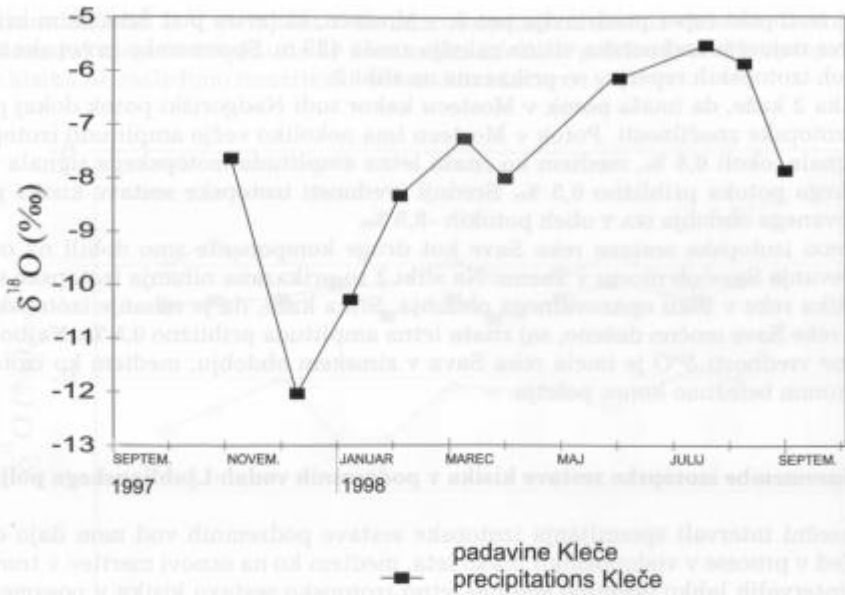
Za kvantifikacijo mešalnih deležev v podzemni vodi je potrebno poznati izotopsko sestavo obeh vhodnih komponent: izotopsko sestavo lokalnih padavin na območju Ljubljanskega polja ter izotopsko sestavo reke Save.

Vzorčevalnik za ugotavljanje izotopske sestave kisika v padavinah je lociran v vodarni Kleče. Vzorčevalnik je zasnovan tako, da ni možna evaporacija vzorca dežja, ki bi lahko povzročila spremembo njegove izotopske sestave. V toku raziskave smo vzorčevali kumulativne padavine v obdobju približno enega meseca.

Spremembe izotopske sestave padavin v toku obdobja opazovanja so prikazane na sliki 1. Iz slike je razvidno, da so bile spremembe izotopske sestave padavin dokaj tipične za naše klimatske razmere. V zimskem času smo zabeležili izrazito negativne vrednosti  $\delta^{18}\text{O}$  padavin. Najbolj negativno izotopsko sestavo so imele padavine v mesecu decembru, ko smo izmerili vrednost  $\delta^{18}\text{O}$   $-12\%$ . Po zimskem minimumu so bile padavine vse bolj obogatene s težjim kisikovim izotopom  $^{18}\text{O}$ , tako da smo v mesecu juliju izmerili pozitivni maksimum izotopske sestave približno  $-5,5\%$ . V celotnem obdobju opazovanja smo tako zabeležili amplitudo izotopskega padavinskega signala preko  $6\%$ .

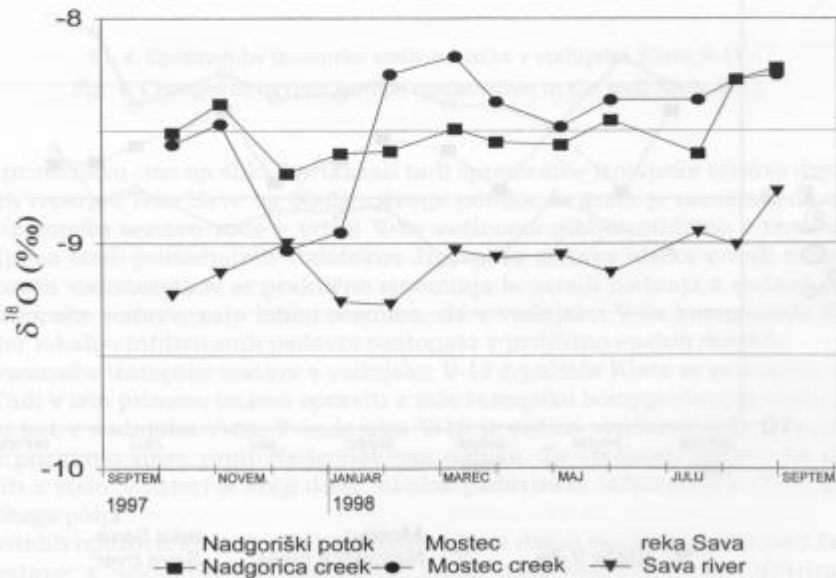
Drugi parameter, ki smo ga uporabili za ugotavljanje izotopske sestave lokalne infiltracije na območju Ljubljanskega polja, je bila izotopska sestava dveh manjših potokov na obrobju Ljubljanskega polja. Izkušnje pri uporabi izotopov namreč kažejo, da so potoki z majhnimi zaledji znane nadmorske višine, zaradi svoje homogenizirane izotopske sestave, lahko dober indikator povprečne izotopske sestave lokalnih padavin (Markič in sod., 1991).

Pri izbiri tovrstnih izotopskih reperjev je potrebno paziti, da je nadmorska višina njihovega zaledja čim bližje nadmorski višini zaledij opazovanih vod, saj bi v nasprotnem primeru zaradi višinskega izotopskega efekta lahko prišlo do prevelikih razlik v izotopski sestavi. Zaradi tega smo kot prvi izotopski reper izbrali Nadgoriški potok, katerega zaledje predstavlja Soteški hrib pri Nadgorici z največjo višino 405 m.



Sl. 1. Izotopska sestava kisika v padavinah Ljubljanskega polja v letih 1997/1998

Fig. 1. Oxygen isotope composition of precipitation at Ljubljansko polje in the period 1997/1998



Sl. 2. Izotopska sestava kisika primerjalnih vodotokov

Fig. 2. Oxygen isotope composition of comparative streams

Drugi izotopski reper predstavlja potok v Mostecu, ki izvira pod Šišenskim hribom; njegova največja nadmorska višina zaledja znaša 429 m. Spremembe izotopske sestave obeh izotopskih reperjev so prikazane na sliki 2.

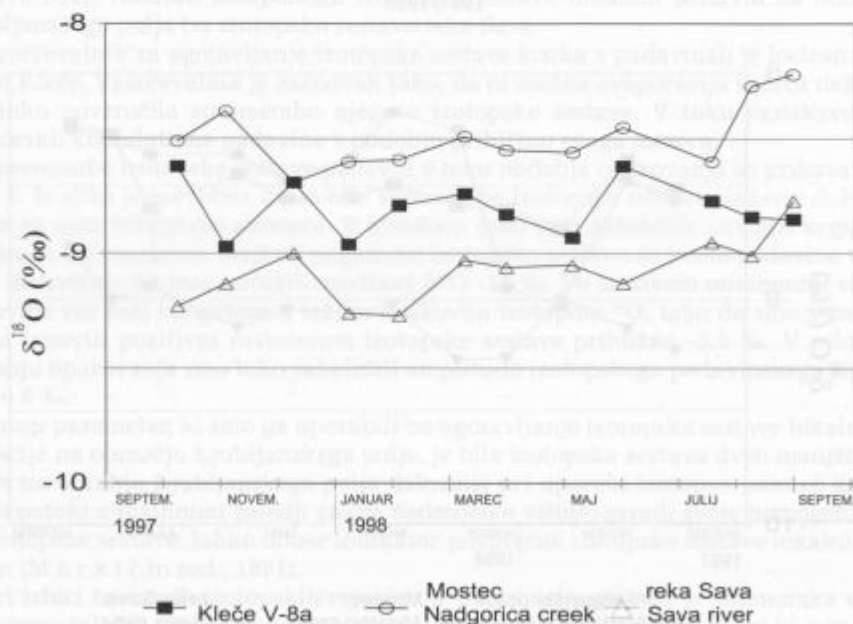
Slika 2 kaže, da imata potok v Mostecu kakor tudi Nadgoriški potok dokaj podobne izotopske značilnosti. Potok v Mostecu ima nekoliko večjo amplitudo izotopskega signala, okoli 0,8 ‰, medtem ko znaša letna amplituda izotopskega signala Nadgoriškega potoka približno 0,5 ‰. Srednji vrednosti izotopske sestave kisika preko opazovanega obdobja sta v obeh potokih -8,5 ‰.

Oceno izotopske sestave reke Save kot druge komponente smo dobili na osnovi vzorčevanja Save ob mostu v Tacnu. Na sliki 2 so prikazana nihanja izotopske sestave kisika reke v toku opazovalnega obdobja. Slika kaže, da je nihanje izotopske sestave reke Save močno dušeno, saj znaša letna amplituda približno 0,5 ‰. Najbolj negativne vrednosti  $\delta^{18}\text{O}$  je imela reka Sava v zimskem obdobju, medtem ko izotopski maksimum beležimo konec poletja.

### Spremembe izotopske sestave kisika v podzemnih vodah Ljubljanskega polja

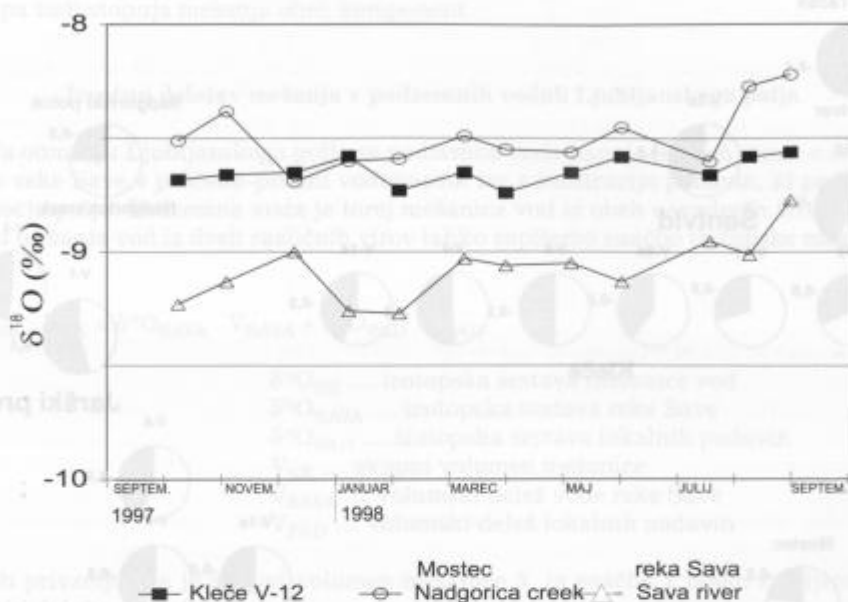
Mesečni intervali spremljanja izotopske sestave podzemnih vod nam dajo dober vpogled v procese v vodonosniku preko leta, medtem ko na osnovi meritev v tromesečnih intervalih lahko ocenimo srednjo letno izotopsko sestavo kisika v posameznem vodnjaku.

Spremembe izotopske sestave kisika v vodi vodnjaka V-8a v črpališču Kleče so



Sl. 3. Spremembe izotopske sestave kisika v vodnjaku Kleče V-8a  
Fig. 3. Changes of oxygen isotope composition in the well Kleče V-8a

prikazane na sliki 3. V vodnjaku V-8a imamo opraviti z močno dušenim izotopskim signalom, saj njegova amplituda ne doseže niti 0,5 ‰. V poteku krivulje izotopske sestave kisika ne zasledimo izrazitejših sezonskih efektov.



Sl. 4. Spremembe izotopske sestave kisika v vodnjaku Kleče V-12

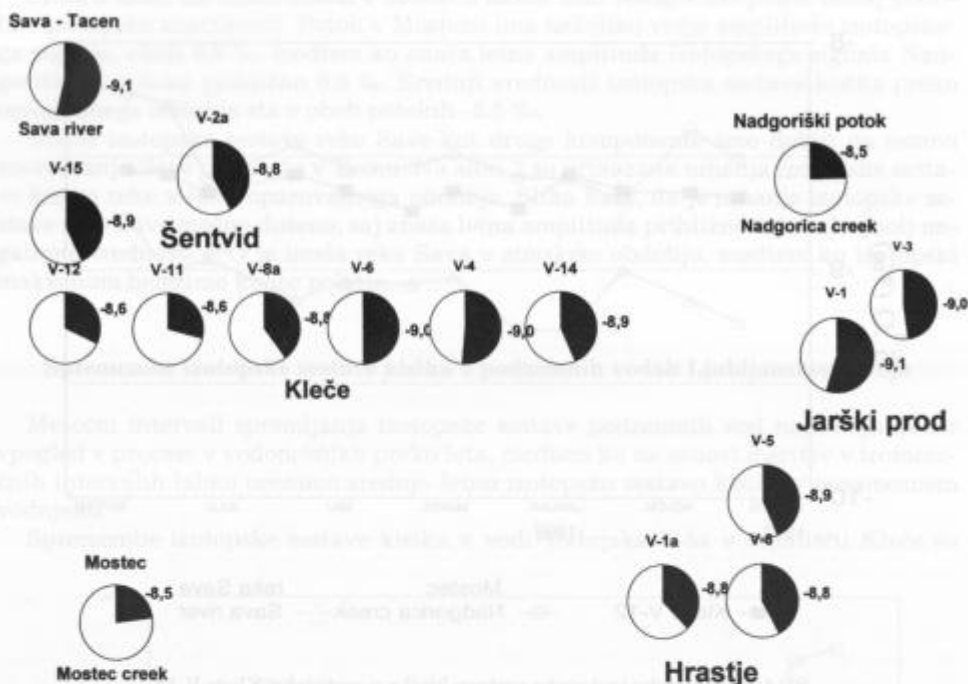
Fig. 4. Changes of oxygen isotope composition in the well Kleče V-12

Za primerjavo smo na sliki 3 prikazali tudi spremembe izotopske sestave dveh izotopskih reperjev, reke Save ter Nadgoriškega potoka. Iz grafa je razvidno, da se krivulja izotopske sestave vode v vrtini V-8a večinoma giblje približno v sredini med krivuljama obeh primerjalnih vodotokov. Izotopska sestava kisika v vodi nizkotemperaturnih vodonosnikov se praktično spreminja le zaradi mešanja z vodami drugačne izotopske sestave, zato lahko ocenimo, da v vodnjaku V-8a komponenti Savske vode ter lokalno infiltriranih padavin nastopata v približno enakih deležih.

Spremembe izotopske sestave v vodnjaku V-12 črpališča Kleče so prikazane na sliki 4. Tudi v tem primeru imamo opraviti z zelo izotopsko homogenizirano vodo, še celo bolj kot v vodnjaku V-8a. V vodnjaku V-12 je večina vrednosti  $\delta^{18}\text{O}$  pomaknjena bolj v pozitivno smer, proti Nadgoriškega potoku. Te vrednosti kažejo, da imamo opraviti z vodo, v kateri je večji delež lokalne padavinske infiltracije z območja Ljubljanskega polja.

V ostalih opazovanih vodnjakih smo naleteli na dokaj različne značilnosti izotopske sestave; v nekaterih bolj prevladuje padavinska voda, ki se je infiltrirala na območju samega Ljubljanskega polja, medtem ko v drugih vodnjakih beležimo večji delež komponente vode reke Save. V tem pogledu je še posebej zanimiv vodnjak V-1 v Jarškemrodu, katerega izotopska sestava kisika je skoraj enaka izotopski sestavi

kisika reke Save. Torej se v tem vodnjaku pojavlja praktično le Savska voda, brez primesi vode lokalnih padavin. Takšen rezultat je povsem logičen, saj je vodnjak lociran v bližini reke Save.



Sl. 5. Primerjava povprečnih vrednosti  $\delta^{18}O$  vseh opazovanih vod na območju Ljubljanskega polja

Fig. 5. Comparison of average  $\delta^{18}O$  values of all observed waters in the area of Ljubljansko polje

Povprečna izotopska sestava vseh opazovanih vod je prikazana na sliki 5. Izotopska sestava kisika v vodi je ponazorjena s krožnim grafom, katerega razpon znaša 2 %. Na grafu tečejo spremembe od bolj pozitivnih proti bolj negativnim vrednostim  $\delta^{18}O$  v smeri urinega kazalca. Prazen krog krožnega grafa tako ponazarja izotopsko sestavo -8 %, medtem ko zapolnjen krog pomeni izotopsko sestavo -10 %.

Slika 5 kaže, da imata najbolj pozitivno  $\delta^{18}O$  vrednost Nadgoriški potok in potok v Mostecu, približno -8,5 %. Najbolj negativno povprečno vrednost  $\delta^{18}O$  ima reka Sava, in sicer okoli -9 %. Vrednosti izotopske sestave vod iz vodnjakov Ljubljanskega polja se kot mešanica dveh izotopsko različnih komponent gibljejo med tema skrajnima vrednostima, v odvisnosti od deležev posameznih komponent v vodi.

Na sliki 5 vidimo tudi, da se v rezultatih izotopskih analiz v določeni meri odsliska prostorski razpored vodnjakov v posameznih vodarnah. V vodarni Kleče tako opazujemo, da so vodnjaki z večjim deležem lokalnih padavin bolj na skrajnih delih niza vodnjakov, medtem ko imamo v osrednjem delu vodarne vodnjake, v katerih beležimo večji delež savske vode. Na območju vodarne torej nimamo opravka s homogeniziranim tokom podzemne vode, ampak je v osrednjem delu cona z močnejšim dotokom

vode reke Save, medtem ko na obrobju bolj prevladuje voda, ki izvira iz lokalno infiltriranih padavin.

V vodarni Hrastje razlike v deležih posameznih komponent niso tako velike, kar je razumljivo, saj je pot podzemne vode po prodnem vodonosniku do vodarne daljša, s tem pa tudi stopnja mešanja obeh komponent.

### Izračun deležev mešanja v podzemnih vodah Ljubljanskega polja

Na območju Ljubljanskega polja se podzemna voda napaja iz dveh virov: z zatekanjem reke Save v peščeno-prodni vodonosnik ter z infiltracijo padavin, ki padejo na območju polja. Podzemna voda je torej mešanica vod iz obeh navedenih virov. V primeru mešanja vod iz dveh različnih virov lahko zapišemo enačbo izotopske masne bilance:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{SK}} \cdot V_{\text{SK}} = \delta^{18}\text{O}_{\text{SAVA}} \cdot V_{\text{SAVA}} + \delta^{18}\text{O}_{\text{PAD}} \cdot V_{\text{PAD}} \quad (1)$$

$\delta^{18}\text{O}_{\text{SK}}$  .... izotopska sestava mešanice vod

$\delta^{18}\text{O}_{\text{SAVA}}$  .... izotopska sestava reke Save

$\delta^{18}\text{O}_{\text{PAD}}$  .... izotopska sestava lokalnih padavin

$V_{\text{SK}}$  .... skupni volumen mešanice

$V_{\text{SAVA}}$  .... volumski delež vode reke Save

$V_{\text{PAD}}$  .... volumski delež lokalnih padavin

Ob privzetju, da je skupni volumen mešanice 1, iz enačbe 1 lahko izpeljemo volumski delež reke Save:

$$V_{\text{SAVA}} = \frac{(\delta^{18}\text{O}_{\text{SK}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{PAD}})}{(\delta^{18}\text{O}_{\text{SAVA}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{PAD}})} \quad (2)$$

Ker ob posameznih meritvah lahko pride do večjih ali manjših nihanj, bodisi zaradi analitskih napak ali tudi fluktuacij v naravnem sistemu, je za izračun deležev bolj smiselno vzeti podatke o povprečni izotopski sestavi vode iz določenega vodnjaka preko celotnega opazovalnega obdobja. Za izračun so bili vzeti sledeči vhodni podatki:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{SAVA}} = -9,07 \text{ ‰}$$

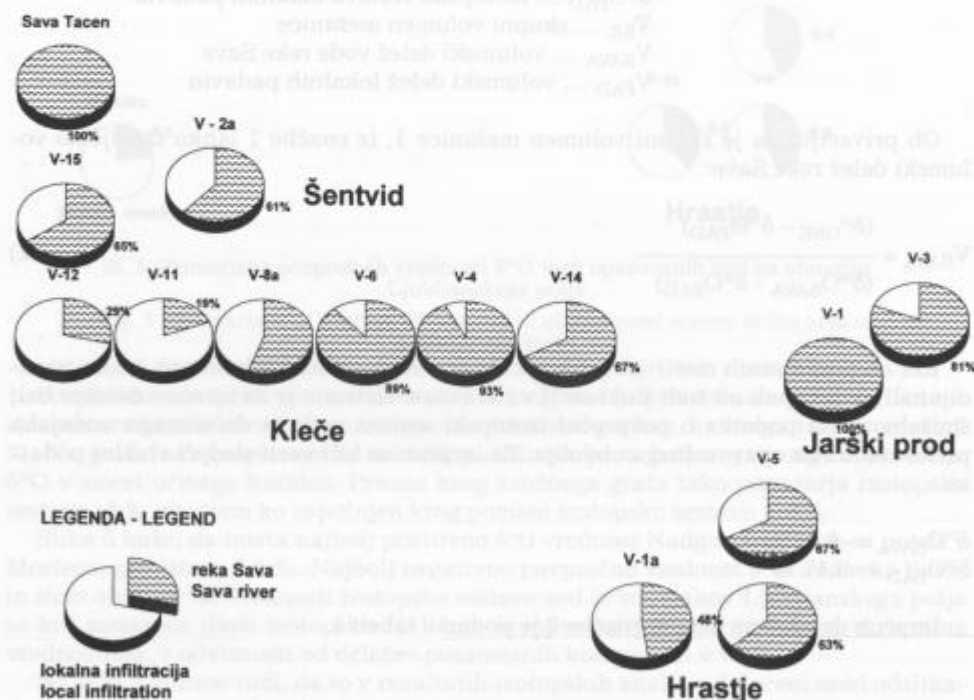
$$\delta^{18}\text{O}_{\text{PAD}} = -8,47 \text{ ‰}$$

Izračun deležev na osnovi enačbe 2 je podan v tabeli 1.



Tabela 1. Izračunani deleži vode reke Save v podzemnih vodah Ljubljanskega polja.  
 Table 1. Calculated proportions of water from the Sava river in the Ljubljansko polje groundwater.

Vrtina	Delež vode reke Save
Kleče V-4	93 %
Kleče V-6	89 %
Kleče V-8a	55 %
Kleče V-11	19 %
Kleče V-12	29 %
Kleče V-14	67 %
Kleče V-15	65 %
Šentvid V-2a	61 %
Hrastje V-1a	48 %
Hrastje V-5	67 %
Hrastje V-8	63 %
Jarški p. V-1	100 %
Jarški p. V-3	81 %



Sl. 6. Izračun deleža vode reke Save v opazovanih vodnjakih Ljubljanskega polja na osnovi izotopske sestave kisika v vodi

Fig. 6. Calculation of the proportion of water from the Sava river in observed wells of Ljubljansko polje on the basis of oxygen isotope composition of water



Rezultati v tabeli 1 kažejo, da se delež vode reke Save spreminja od 19 % deleža v vodnjaku Kleče V-11 do 100 % deleža v vodnjaku Jarški prod V-1. Slika 6 prikazuje porazdelitev deležev reke Save v vseh opazovanih vodnjakih Ljubljanskega polja. Slika nazorno kaže podzemni tok v osrednjem delu vodarne Kleče, v katerem močno prevladuje voda reke Save, medtem ko v bolj obrobni vodnjakih najdemo večji delež lokalnih padavin.

Tudi v vodarni Hrastje se pojavljajo določene razlike v deležih posameznih komponent podzemne vode. Vrtini Hrastje V-5 in V-8 imata večji delež vode reke Save, medtem ko v vrtini Hrastje V-1a bolj prevladuje lokalna infiltracija padavin Ljubljanskega polja. Za ugotovitev vzrokov teh razlik bi bilo potrebno imeti na razpolago podatke o srednji vrednosti  $\delta^{18}\text{O}$  tudi iz ostalih vodnjakov vodarne Hrastje.

V vodarni Jarški prod do razlike med deleži komponent očitno prihaja zaradi različne oddaljenosti vodnjakov od struge reke Save.

### Sklepi

Ljubljansko polje je peščeno-prodni vodonosnik, ki ga napajata dve komponenti: lokalne padavine ter reka Sava. Raziskave so pokazale, da je izotopska sestava vode v posameznih črpalnih vodnjakih dokaj različna. V nekaterih vodnjakih se pojavlja voda, ki je izotopsko bolj podobna lokalnim padavinam, v drugih je izotopska sestava bolj podobna vodi reke Save.

Z izotopskimi analizami reke Save, lokalnih padavin ter primerjalnih vodotokov je bilo možno dokaj natančno določiti povprečno izotopsko sestavo kisika obeh vhodnih komponent. Ob znani sestavi vhodnih komponent smo z uporabo enačbe masne bilance izračunali deleže obeh komponent v posameznih vodnjakih Ljubljanskega polja. Rezultati so pokazali, da ima od opazovanih vodnjakov največji delež savske vode vodnjak V-1 v vodarni Jarški prod (100 %), najmanjši delež vode reke Save pa smo zabeležili v vodnjaku V-11 Kleče (19 %). V ostalih vodnjakih se deleži precej spreminjajo.

Opazili smo, da ima na delež posamezne komponente v mešanici velik vpliv predvsem lokacija posameznega vodnjaka, tako glede na oddaljenost od reke Save kot tudi glede razporeditve vodnjakov v vodarni. V osrednjem delu vodarne Kleče je bil opažen tok podzemne vode s praktično povsem savsko vodo, medtem ko se v vodnjakih na obrobju vodarne povečuje delež lokalnih padavin. Tudi v vodarni Jarški prod se največji delež vode reke Save pojavlja v vodnjaku, ki leži najbližje strugi reke Save.

## Isotope investigations of groundwater from Ljubljansko polje

### Summary

The Ljubljansko polje aquifer is composed of sandy and gravelly sediments and is recharged by two input water components: local precipitation and the Sava river. Isotopic investigations in the area of Ljubljansko polje indicate that the oxygen isotope composition of groundwater from Ljubljansko polje is not homogeneous, but shows considerable variations in different extraction wells. Isotopic composition of water from individual wells is either more similar to that of local precipitation, or to the isotope composition of the Sava river (Figures 3, 4 and 5).

Isotopic analyses of the Sava river, of local precipitation and of comparative streams were used to make a fairly accurate assessment of the average isotope composition of both input components. The proportion of input components in individual streams was calculated on the basis of their composition, using the mass balance equation. The largest proportion of water from the Sava was found in well V-1, in the Jarški prod pumping station (100%), and the smallest proportion in well V-11, in Kleče (19%). The proportion of components in other extraction wells varies considerably (Table 1, Figure 6).

It was concluded that the proportion of one component in the mixture is to a great deal influenced by the location of the well, as regards its distance from the Sava river as also the location of wells within the pumping station. In the central part of the Kleče pumping station a ground water flow was found, containing practically entirely water from the Sava, while the proportion of local precipitation increased in wells situated on the outskirts of the pumping station. Also in the Jarški prod pumping station, the largest proportion of the Sava's water was found in the well closest to the river bed.

### Zahvala

Avtorja se zahvaljujeva J.P. Vodovod - Kanalizacija d.o.o., Ljubljana, ki je finančno omogočilo raziskavo, Ireni Borštnar in Miroslavu Mediču za vzorčevanje ter Erni Urbanec za prevod v angleščino.

### Literatura

Drobne, F., Mencej, Z. & Brilly, M. 1997: Preveritve in dopolnitve strokovnih osnov za določitev varstvenih pasov sedanjih in perspektivnih vodnih virov za območje mesta Ljubljane in okolice. - Arhiv Geološkega zavoda, Ljubljana.

Markič, M., Urbanec, J., Pezdič, J. & Marin, M. 1991: Determining the origin of waters flowing into the Senovo mine by hydrogeochemical and isotopic methods. - Proceedings of 4<sup>th</sup> International Mine Water Congress, 89-98, Poertschach.

Žlebnik, L. 1971: Pleistocen Kranjskega, Sorškega in Ljubljanskega polja. - Geologija 14, 5-51, Ljubljana.