

Karakterizacija vodnih virov za javno oskrbo s pitno vodo v Ljubljani s pomočjo različnih geokemičnih analiz

Polona Vreča¹, Tjaša Kanduč¹, Zdenka Šlejkovec¹, Stojan Žigon¹, Klara Nagode², Nika Močnik³, Branka Bračič Železnik⁴, Brigita Jamnik⁴, Marjetka Žitnik⁴

Povzetek

V urbani hidrologiji predstavljajo različni geokemični parametri, tudi naravni izotopi, pomembno orodje, in nudijo upravljavcem vodnih virov dodatne informacije, s pomočjo katerih lahko proučujemo sestavo in dinamiko virov, njihove poti ter interakcije med vodnimi telesi. Da bi poglobili znanje o kroženju vode na območju Ljubljanskega polja in Ljubljanskega barja, pomembnih vodonosnikov za oskrbo mesta Ljubljane s pitno vodo, smo v letu 2018 izvedli prve obsežnejše geokemično-izotopske raziskave na različnih odvzemnih mestih znotraj ljubljanskega vodovodnega sistema, od vodnjakov v črpališčih do pip pri končnih uporabnikih.

Ključne besede: javna oskrba s pitno vodo, geokemija, izotopi, kisik, vodik, ogljik

Key words: domestic water supply, geochemistry, isotopes, oxygen, hydrogen, carbon

Uvod

V Sloveniji se 97 % prebivalcev oskrbuje s pitno vodo iz podzemne vode (Janža, 2015), zato je znanje o ranljivosti le-te ključnega pomena za zaščito in upravljanje z vodnimi viri. V Sloveniji je glede na število uporabnikov javnega vodovodnega sistema največje javno podjetje JP Vodovod- Kanalizacija d.o.o. (JP VO-KA), ki oskrbuje s pitno vodo več kot 300.000 prebivalcev Ljubljane. Oskrba s pitno vodo je zagotovljena v Ljubljani že od leta 1890. Glede na zakonodajo in zadnje tehnološke standarde priteče danes voda do uporabnika po modernem vodovodnem cevovodu preko osrednjega vodovodnega sistema, ki se napaja iz peščeno-prodnih vodonosnikov Ljubljanskega polja in Ljubljanskega barja. Osrednji vodovodni sistem se napaja s podzemno vodo preko vodnjakov v petih vodarnah (Kleče, Hrastje, Brest, Jarški prod in Šentvid), od koder voda preko zbirnih vodov, vodohranov in ostalih objektov vodovodnega sistema potuje do priključkov končnih uporabnikov. Nekateri predeli Ljubljane se oskrbujejo iz posamezne vodarne, drugi pa iz dveh ali več vodarn, kar je odvisno od porabe vode in tlačnih razmer v sistemu. V Ljubljani priteče pitna voda po vodovodnem omrežju do uporabnikov brez tehničnih postopkov priprave vode in je klorirana le občasno. Pretežni del vode v vodovodnem sistemu (90 %) se načrpa iz vodarn Kleče, Hrastje, Jarški prod in Šentvid na ljubljanskem polju (Janža, 2015), manjši delež pa predstavlja podzemna voda iz vodarne Brest na ljubljanskem barju.

Kakovost podzemne vode se že desetletja ščiti z vodovarstvenimi območji, določenimi z uredbami, na katerih je prepovedana oziroma omejena vsaka dejavnost ali poseg v prostor, ki bi ogrožal kakovost ali količino vodnih virov. Ukrepi so namenjeni zmanjševanju nevarnosti in tveganja, ki jih povzročajo sedanje dejavnosti ali tiste, ki se v prostor šele uvajajo. Napajalno zaledje vodarn je kljub temu izpostavljeno pritiskom

¹ Odsek za znanosti o okolju, Institut »Jožef Stefan«, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana; polona.vreca@ijs.si

² Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Aškerčeva cesta 12, 1000 Ljubljana

³ Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Univerza v Ljubljani, Večna pot 113, 1000 Ljubljana

⁴ JP Vodovod-Kanalizacija d.o.o., Vodovodna cesta 90, 1000 Ljubljana

urbanizacije, industrije, prometa, kmetijstva in starih okoljskih bremen (Janža, 2015). Neznani viri onesnaženja predstavljajo pomemben del teh pritiskov. Dobro kemijsko stanje podzemne vode je ogroženo kljub izvajanju osnovnih ukrepov in obstoju stroge okoljske zakonodaje (Jamnik et al., 2012).

Ključ za razumevanje poslabšanja kakovosti urbanih vodnih virov je poznavanje vpliva urbanizacije na celotno vodno pot. Najpogostejši problemi v urbanih območjih so: 1) nihanja gladine podzemne vode zaradi sprememb v rabi tal in hidrometeoroloških razmer; 2) točkovni ali razpršeni viri onesnaževanja; 3) karakterizacija in kvantifikacija komponent podzemnega dotoka in odtoka; 4) posebne značilnosti toka podzemne vode in transport onesnažil; in 5) povezovanje podatkov za trajnostno upravljanje z urbaniimi vodnimi viri (IAEA F3024, 2018, projektna dokumentacija). Posledično obsega urbana hidrogeologija interdisciplinarno razumevanje vodnih virov, transporta, porazdelitve ter mešanja vode in onesnaževal v odvisnosti od urbane rasti, družbenih sprememb in podnebne spremenljivosti (Grimmeisen et al., 2017).

Stabilni in radioaktivni izotopi ponujajo široko paleto možnosti za proučevanje vodnih virov, poti in interakcij v vodnem krogu in predstavljajo pomembno orodje v izotopski hidrologiji (Aggarwal et al., 2005). Poleg tega predstavljajo izotopi pomembno orodje tudi v urbani hidrogeologiji in lahko zagotovijo pomembne dodatne informacije upravljavcem voda (IAEA, 2002; Ehleringer et al., 2016; Jameel et al., 2016; Grimmeisen et al., 2017; IAEA F3024, 2018).

Kljub uporabnosti naravnih izotopov lahkih elementov (H, O, C in N) v raziskavah pomembnih za upravljanje z vodnimi viri slovenska zakonodaja ne predpisuje monitoringa razmerij stabilnih izotopov v pitni vodi. Zato se v Sloveniji ne izvaja sistematična karakterizacija in redno spremljanje izotopske sestave pitne vode od vodnega vira do končnega uporabnika. V preteklosti so na območju ljubljanskih vodonosnikov potekale številne kratkotrajne izotopske raziskave, s pomočjo katerih so bile določene značilnosti vodonosnikov, kot tudi viri, poti in interakcije vode za javno oskrbo ter pridobljeni podatki za izboljšavo konceptualnega modela ljubljanskega vodonosnika (npr. Andjelov et al., 2005, Cerar in Urbanc, 2013, Mezga et al., 2014, Ogrinc et al., 2008, Pirc et al., 1998, Trček, 2017; Urbanc in Jamnik, 1998; 2007; Vrzel et al., 2016; 2018; Zupanc et al., 2011). Sistematično poteka redno v Ljubljani od leta 1981 le monitoring izotopske sestave kisika in vodika v mesečnih kompozitnih vzorcih padavin (Vreča in Malenšek, 2016).

V letu 2018 smo v okviru IAEA koordiniranega projekta F33024 »Use of Isotope Techniques for the Evaluation of Water Sources for Domestic Supply in Urban Areas« pričeli v sodelovanju z JP VO-KA z izvajanjem projekta »Multi-isotope characterization of water resources for domestic supply in Ljubljana, Slovenia«, katerega glavni namen je oceniti uporabnost različnih geokemičnih parametrov, predvsem razmerij stabilnih izotopov, pri določanju izvora, kroženja in medsebojnih vplivov vode v urbanem okolju in izdelati smernice za nadaljnjo redno uporabo izbranih parametrov pri upravljanju z vodnimi viri za javno oskrbo s pitno vodo na območju Ljubljane. Prva faza raziskav obsega pregled razpoložljive literature in zbiranje podatkov o izotopski sestavi vod na območju ljubljanskih vodonosnikov (Ljubljanskega polja in Ljubljanskega barja). Pregled je pokazal, da so bile opravljene do sedaj izotopske raziskave v posameznih vodnjakih na območju vodarn Kleče, Hrastje, Jarški prod, Šentvid in Brest, v preostalih objektih javnega vodovodnega sistema pa tovrstne raziskave niso bile opravljene. Zato smo v letu 2018 izvedli prvo vzorčenje na različnih odvzemnih mestih znotraj ljubljanskega vodovodnega sistema, od vodnjakov v vodarnah do pip pri končnih uporabnikih, in v zbranih vzorcih določili izotopsko sestavo ter ostale geokemične parametre. V prispevku predstavljamo rezultate dosedanjih raziskav.

Metodologija

Na osnovi zbranih podatkov in izkušenj JP VO-KA smo določili 97 odvzemnih mest znotraj ljubljanskega vodovodnega sistema, ki ga z rednimi monitoringi za nadzor kakovosti pitne vode spremlja JP VO-KA. Odvzemna mesta zajemajo vodnjake (VD) v petih vodarnah, zbirne vode (ZV), vodohrane (VH), objekte za pripravo vode (PV), pitnike (PIT) ter pipe v javnih objektih (PJ). V načrt vzorčenja smo vključili 9 oskrbovalnih območij in sicer pet glavnih vodarn: Kleče (A), Hrastje (B), Brest (C), Jarški prod (D), Šentvid (E), in štiri območja, ki se oskrbujejo z vodo iz dveh ali treh različnih vodarn: Hrastje/Jarški prod (F), Kleče/Brest (G), Kleče/Hrastje/Jarški prod (H) in Kleče/Hrastje/Brest (I2). Dodatno smo za vzorčenje izbrali 10 odvzemnih mest: pip v javnih in privatnih (PP) objektih, ki niso vključena v redni monitoring JP VO-KA, 3 mesta na reki Savi (R: Brod, Črnuče in Šentjakob) in iztok iz Centralne čistilne naprave (CČN). V načrt vzorčenja je bilo zajetih skupaj 111 odvzemnih mest. Vzorčenje je potekalo v obdobju od 6. 9. 2018 do 29. 11. 2018. Na štirih izbranih odvzemnih mestih vzorčenja ni bilo možno izvesti, na enem mestu pa je bilo vzorčenje izvedeno dvakrat. Septembra je bilo izvedenih 8 vzorčenj (zbranih 35 vzorcev), oktobra 10 vzorčenj (zbranih 42 vzorcev), novembra pa 12 vzorčenj (zbranih 31 vzorcev). Končno število zbranih vzorcev glede na vrsto odvzemnega mesta in oskrbovalno območje je prikazano v Preglednici 1.

Meteorološki podatki o količini padavin in temperaturi zraka ter hidrološki podatki (pretok in temperatura vode reke Save v Šentjakobu pri Ljubljani) so bili pridobljeni iz arhiva Agencije RS za okolje (v nadaljevanju ARSO).

Preglednica 1 - Število zbranih vzorcev glede na vrsto odvzemnega mesta in oskrbovalno območje.

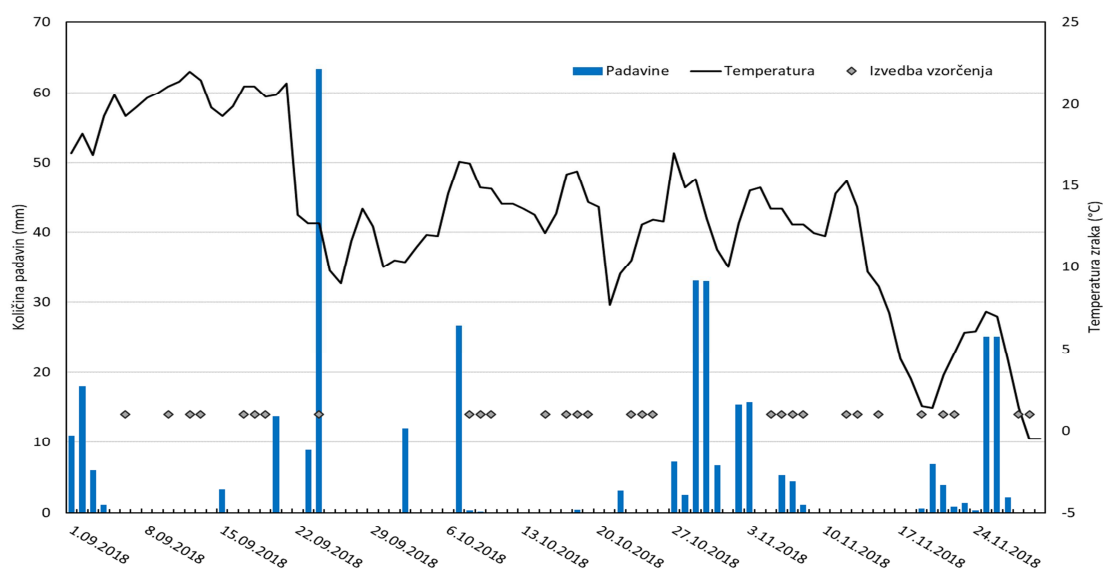
OSKRBOVALNO OBMOČJE		VRSTA ODVZEMNEGA MESTA									
		VD	ZV	VH	PV	PIT	PJ	PP	CČN	R	Vsota
A	Kleče	15	5	5		6	2*	2			35
B	Hrastje	9									9
C	Brest	11	2	2	2	2	1	1			21
D	Jarški prod	3		5			2				10
E	Šentvid	3		6			1	1			11
F	Hrastje/Jarški prod					2	1	1			4
G	Kleče/Brest			1		1	2	1			5
H	Kleče/Hrastje/Jarški prod					1	1	1			3
I2	Kleče/Hrastje/Brest			3		1	1	1			6
	Ostale lokacije								1	3	4
	Vsota	41	7	22	2	13	11	8	1	3	108

* – vzorčenje opravljeno dvakrat

Vzorčenje na mestih, ki so vključena v redni monitoring za nadzor kakovosti pitne vode (skupno 93 odvzemnih mest) in na iztoku CČN so izvedli sodelavci JP VO-KA, na ostalih mestih (13) pa sodelavci IJS. Ob odvzemu vzorcev je bila in-situ izmerjena temperatura vode (T v °C) in elektroprevodnost (EC v $\mu\text{S}/\text{cm}$). V laboratorijih Odseka za znanosti o okolju, IJS smo v zbranih vzorcih vode določili pH, totalno alkalnost (TA v mM), izotopsko sestavo raztopljenega anorganskega ogljika ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ v ‰), izotopsko sestava kisika ($\delta^{18}\text{O}$ v ‰) in vodika ($\delta^2\text{H}$ v ‰) ter koncentracijo celotnega arzena (As v $\mu\text{g}/\text{L}$).

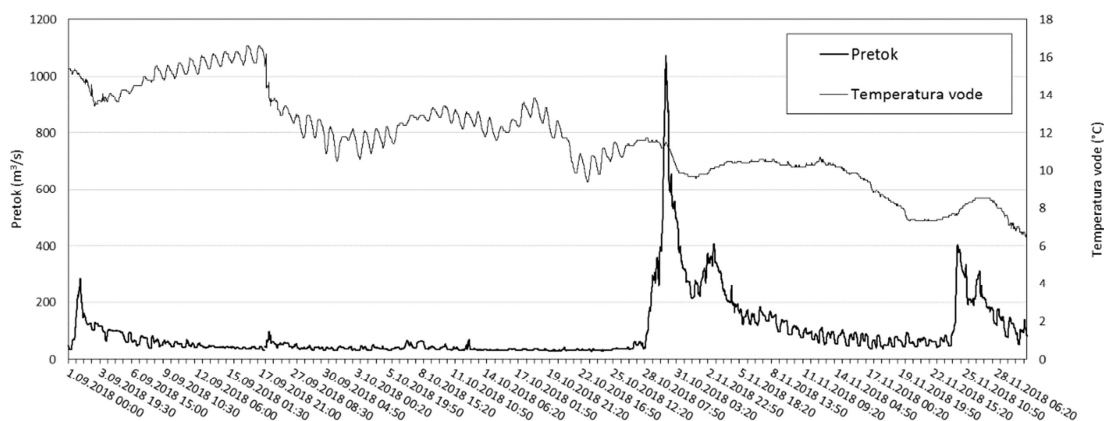
Rezultati

Prvotni načrt raziskav je predvideval, da bomo večji del vzorčenja opravili v enem mesecu, dejanska izvedba pa je bila zaradi obsežnosti možna v treh mesecih, ko so se znatno spreminjale tudi meteorološke in hidrološke razmere v zaledju obeh vodonosnikov. Poteka dnevne količine padavin in temperature zraka na meteorološki postaji Ljubljana–Bežigrad v času izvedbe raziskav sta prikazana na Sliki 1, pretoka in temperature vode v reki Savi v Šentjakobu pri Ljubljani pa na Sliki 2. Ker v obdobju raziskav na nobenem odvzemnem mestu nismo izvajali bolj pogostega vzorčenja (npr. tedenskega), časovnih sprememb na posamezni lokaciji ne moramo opredeliti.



Slika 1 - Spreminjanje dnevne količine padavin in temperature zraka na meteorološki postaji Ljubljana–Bežigrad (vir: meteo.si, 12.12.2018) ter dnevi izvedenega vzorčenja.

Rezultati dosedanjih raziskav so prikazani v Preglednicah 2 in 3, kjer so zbrane povprečne vrednosti analiziranih parametrov glede na oskrbovalno območje ter glede na vrsto odvzemnega mesta. Rezultati meritev na objektih vodovodnega sistema od vodnjakov do pip glede na oskrbovalno območje so prikazani na grafih odvisnosti med totalno alkalnostjo in elektroprevodnostjo (Slika 3), totalno alkalnostjo in pH (Slika 4), izotopsko sestavo raztopljenega anorganskega ogljika in totalno alkalnostjo (Slika 5) ter izotopsko sestavo vodika in kisika (Slika 6). Glede na totalno alkalnost in elektroprevodnost se od ostalih mest razlikuje območje vodnjakov v Hrastju (Slika 3), glede na izotopsko sestavo vodika in kisika pa oskrbovalno območje Šentvid (Slika 6). V vseh vodnjakih na Ljubljanskem polju so bile določene koncentracije arzena pod 0,1 oziroma pod 0,2 ng/mL, v šestih vodnjakih na območju vodarne Brest pa so bile vrednosti višje in so znašale do 0,53 ng/mL v vodnjaku VD Brest 2 (Preglednica 3). Vse določene koncentracije arzena so zelo nizke in ne presegajo mejnih vrednosti za As v pitni vodi, ki znaša 10 µg/L (Uradni list RS, 2004). Za oskrbovalno območje Brest so značilne tudi višja totalna alkalnost in nižja izotopska sestava raztopljenega anorganskega ogljika (Slika 5).



Slika 2 - Spreminjanje pretoka in temperature vode v reki Savi v Šentjakobu pri Ljubljani (vir: arhiv ARSO, neobdelani podatki, 20.12.2018)

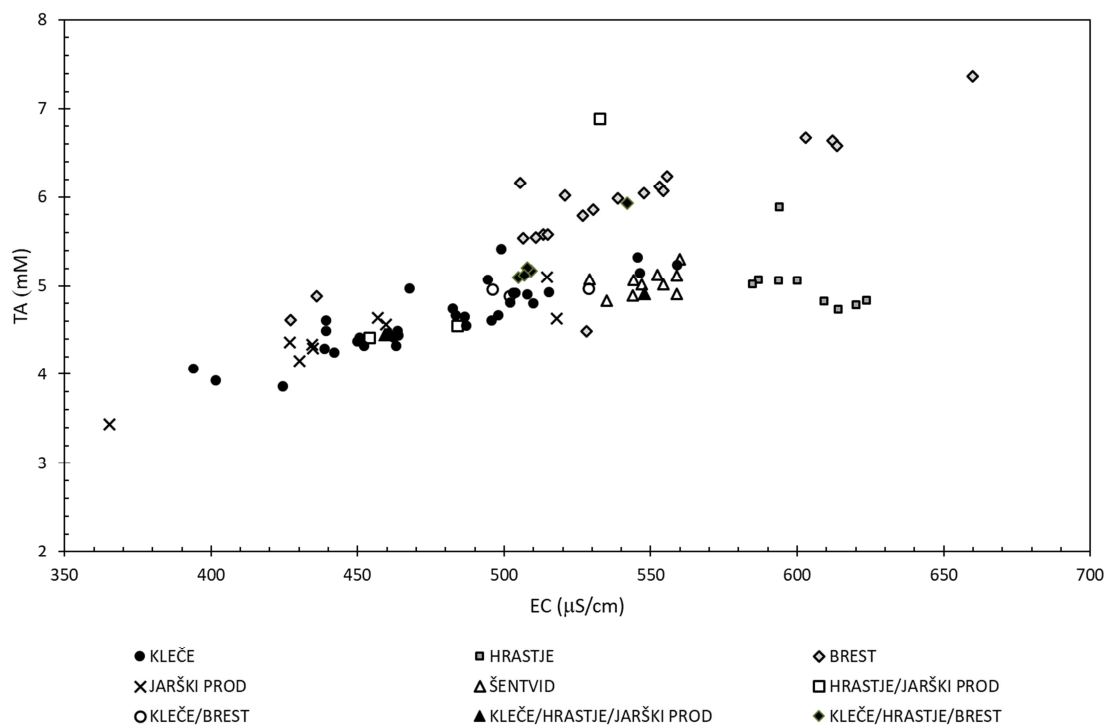
Preglednica 2 - Povprečne vrednosti parametrov, analiziranih glede na oskrbovalno območje, razen pri arzeniu (As*), kjer je navedena najvišja določena koncentracija celotnega arzena v vodi, n.d. pa pomeni, da so vse določene vrednosti pod mejo detekcije.

Št. predstavlja število analiziranih vzorcev.

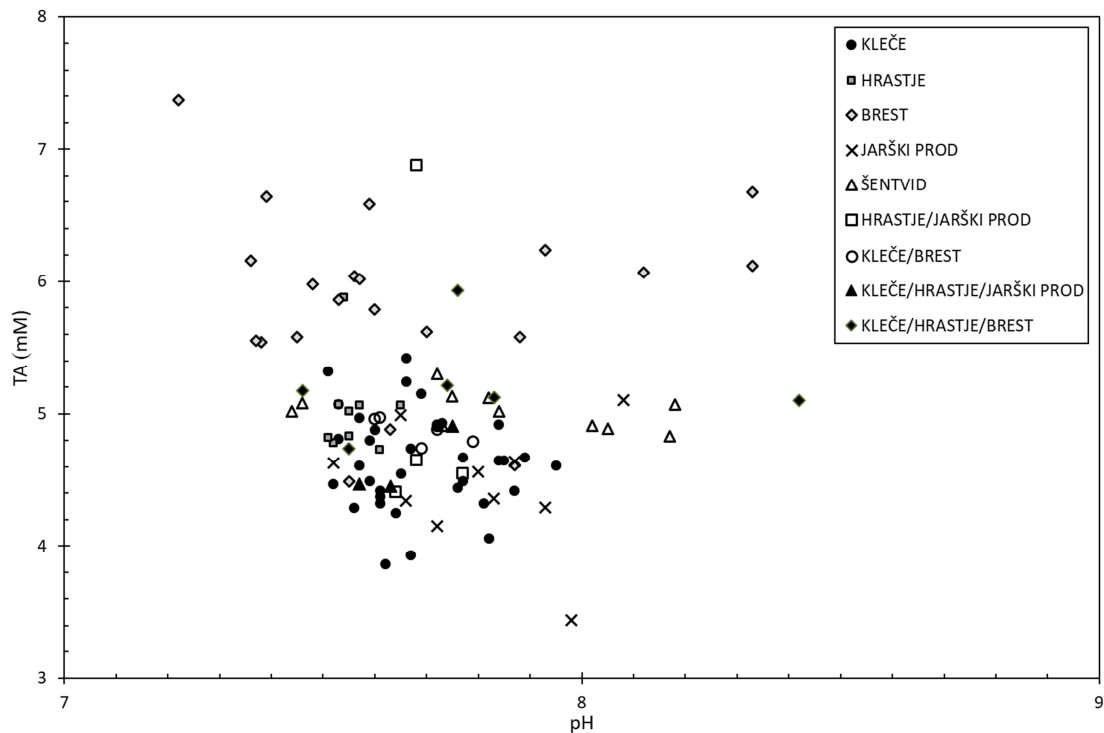
OSKRBOVALNO OBMOČJE	Št.	T	EC	pH	TA	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	As*
		°C	$\mu\text{S}/\text{cm}$		mM	‰	‰	‰	$\mu\text{g}/\text{L}$
Kleče (A)	35	12,3	477	7,7	4,6	-9,17	-61,1	-12,4	0,16
Hrastje (B)	9	12,8	603	7,6	5,0	-8,97	-59,7	-13,2	n.d.
Brest (C)	21	12,2	538	7,7	5,9	-9,27	-61,3	-13,4	0,53
Jarški prod (D)	10	12,7	449	7,8	4,5	-9,26	-61,8	-12,2	0,23
Šentvid (E)	11	13,3	548	7,8	5,0	-8,85	-58,7	-12,7	n.d.
Hrastje/Jarški prod (F)	4	14,4	490	7,7	5,1	-9,16	-61,2	-12,6	n.d.
Kleče/Brest (G)	5	12,9	509	7,7	4,9	-9,15	-61,5	-12,8	n.d.
Kleče/Hrastje/Jarški prod (H)	3	14,5	504	7,7	4,6	-9,13	-60,9	-12,8	n.d.
Kleče/Hrastje/Brest (I2)	6	15,1	514	7,8	5,2	-9,24	-61,4	-13,4	0,39
Vodovodni sistem	104	12,7	511	7,7	5,0	-9,10	-60,9	-12,8	0,53

Preglednica 3 - Povprečne vrednosti parametrov, analiziranih glede na vrsto odvzemnega mesta, razen pri arzenu (As*), kjer je navedena najvišja določena koncentracija celotnega arzena v vodi, n.d. pa pomeni, da so vse določene vrednosti pod mejo detekcije. Št. – število analiziranih vzorcev; LP – območje Ljubljanskega polja, LB – območje Ljubljanskega barja; ostale okrajšave so pojasnjene v poglavju Metodologija.

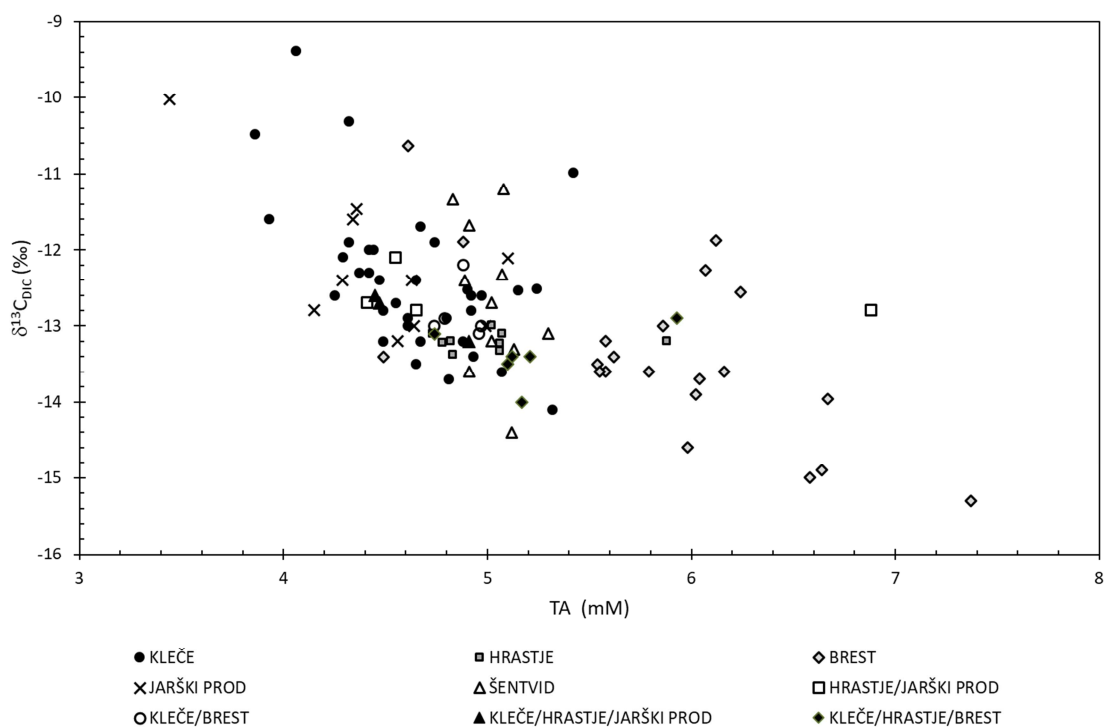
VRSTA ODVZEMNEGA MESTA	Št.	T	EC	pH	TA	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	As*
		°C	$\mu\text{S}/\text{cm}$		mM	‰	‰	‰	$\mu\text{g}/\text{L}$
PIT	13	14,3	513	7,7	5,1	-9,18	-61,3	-13,0	0,19
VD	41	11,8	519	7,7	5,1	-9,14	-60,7	-12,4	0,53
VD (LP)	30	11,9	514	7,7	4,8	-9,10	-60,5	-12,2	n.d.
VD Kleče	15	11,4	470	7,7	4,6	-9,19	-61,2	-12,0	n.d.
VD Hrastje	9	12,8	603	7,6	5,0	-8,97	-59,7	-13,2	n.d.
VD Brest (LB)	11	11,7	533	7,7	5,9	-9,25	-61,0	-13,0	0,53
VD Jarški prod	3	11,5	436	8,0	4,3	-9,28	-61,5	-11,2	n.d.
VD Šentvid	3	11,7	541	7,9	4,9	-8,88	-58,9	-11,4	n.d.
VH	22	13,5	499	7,8	4,9	-9,12	-60,7	-12,9	0,29
PP	8	n.d.	n.d.	7,7	4,8	-9,13	-61,2	-13,0	0,39
PJ	11	13,6	500	7,6	4,9	-9,16	-61,0	-12,9	0,16
ZV	7	12,0	484	7,7	4,8	-9,23	-61,2	-12,8	0,12
CČN, 12.9.2018	1	21,7	1086	9,9	5,91	-8,68	-58,2	-11,9	0,12
R, 12.9.2018	3	15,1	344	8,2	3,3	-9,41	-62,9	-8,3	n.d.



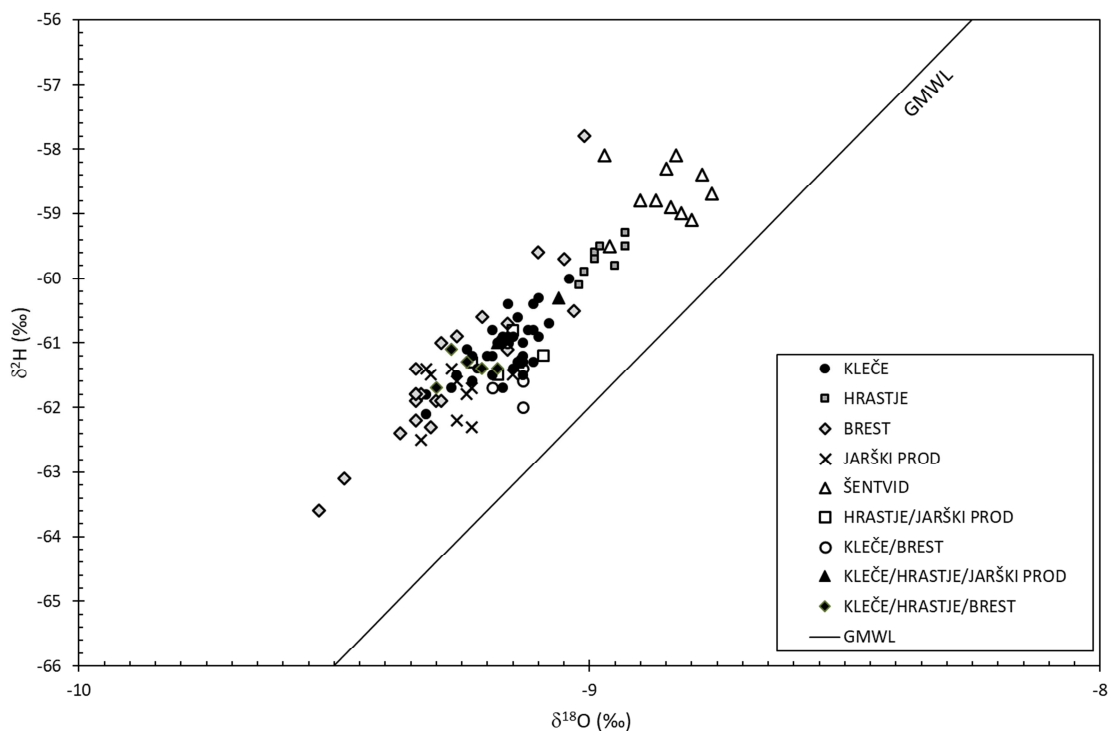
Slika 3 - Odvisnost med totalno alkalnostjo in elektroprevodnostjo glede na oskrbovalno območje.



Slika 4 - Odvisnost med totalno alkalnostjo in pH glede na oskrbovalno območje.



Slika 5 - Odvisnost med izotopsko sestavo raztopljenega anorganskega ogljika in totalno alkalnostjo glede na oskrbovalno območje.



Slika 6 - Odvisnost med izotopsko sestavo vodika in kisika glede na oskrbovalno območje.

Zaključek

V prispevku so predstavljeni rezultati prve obširnejše geokemično-izotopske raziskave ljubljanskega vodovodnega sistema od vodnjakov do pip pri končnih uporabnikih. Prvi rezultati kažejo, da v sistemu prihaja do sprememb, ki jih je potrebno podrobneje raziskati. Glavna pomanjkljivost opravljenih raziskav je povezana z vzorčenjem, ki ga ni možno izvesti v kratkem časovnem obdobju, saj lahko v objekte JP VO-KA vstopa le pooblaščen in usposobljeno osebje. Zbrane rezultate bomo podrobneje proučili, jih primerjali s podatki predhodnih raziskav in na osnovi ugotovitev pripravili smernice za nadaljnje raziskave.

Zahvala

Raziskave potekajo v okviru IAEA koordiniranega projekta F33024 »Use of Isotope Techniques for the Evaluation of Water Sources for Domestic Supply in Urban Areas« in nacionalnega raziskovalnega programa (P1-0143) Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. Avtorji se zahvaljujemo sodelavcem JP VO-KA (V. Kramarič Zidar, M. Benda) in IJS (R. Jaćimoviću, D. Kocmanu, I. Lengarju, R. Novaku, J. A. Robinson) za pomoč pri vzorčenju ter M. Kobold iz ARSO za posredovanje hidroloških podatkov in pregled prispevka.

Literatura

- Aggarwal, P. K., Gat, J. R., Froehlich, K. F. (2005). *Isotopes in the water cycle*. Springer, Dordrecht, 381 p.
- Andjelov, M., Rejec Brancelj, I., Smrekar, A., Kladnik, D., Perko, D. (2005). Podtalnica Ljubljanskega polja. *Geografija Slovenije* 10, Založba ZRC, Ljubljana, 251 p.
- Cerar, S., Urbanc, J. (2013). Carbonate chemistry and isotope characteristics of groundwater of Ljubljansko Polje and Ljubljansko Barje aquifers in Slovenia, *The Scientific World Journal* 2013, 11 p.
- Ehleringer, J. R., Barnette, J. E., Jameel, Y., Tipple, B. J., Bowen, G. J. (2016). Urban water – a new frontier in isotope hydrology, *Isotopes in Environmental and Health Studies* 52, 477-486.
- Grimmeisen, F., Lehmann, M. F., Liesch, T., Goepfert, N., Klinger, J., Zopf J., Goldscheider, N. (2017). Isotopic constraints on water source mixing, network leakage and contamination in an urban groundwater system, *Science of the Total Environment* 583, 202-213.
- IAEA [International Atomic Energy Agency] (2002). *The application of isotope techniques to the assessment of aquifer systems in major urban areas: Final report of a co-ordinated research project 1997–2000*. IAEA, Vienna, 82 p.
- IAEA F3024 (2018). *Use of Isotope Techniques for the Evaluation of Water Sources for Domestic Supply in Urban Areas*. Projektna dokumentacija, 5 p.
- Jameel, Y., Brewer, S., Good, S. P., Tipple, B. J., Ehleringer, J. R. in Bowen, G. J. (2016). Tap water isotope ratios reflect urban water system structure and dynamics across a semiarid metropolitan area, *Water Resources Research* 52, 5891-5910.
- Jamnik, B., Janža, M., Prestor, J. (2012). Project INCOME: developing a comprehensive approach for Slovenian aquifer management, *Water* 21, 49.
- Janža, M. (2015). A decision support system for emergency response to groundwater resource pollution in an urban area (Ljubljana, Slovenia), *Environmental Earth Sciences* 73, 3763-3774.
- Mezga, K., Urbanc, J., Cerar, S. (2014). The isotope altitude effect reflected in groundwater: a case study from Slovenia, *Isotopes in Environmental and Health Studies* 50, 33-51.
- Ogrinc, N., Kanduč, T., Stichler, W., Vreča, P. (2008). Spatial and seasonal variations in $\delta^{18}\text{O}$ and δD values in the river Sava in Slovenia, *Journal of Hydrology* 359, 303-312.
- Pirc, S., Brank, M., Mattusch, J., Pezdič, J. (1998). Distribution of carbon and oxygen stable isotopes in stream waters in Slovenia, *RMZ - Materials and Geoenvironment* 45, 163-167.
- Pravilnik o pitni vodi (2004). *Uradni list RS*, št. 19, 2155.
- Trček, B. (2017). Application of environmental tracers to study the drainage system of the unsaturated zone of the Ljubljansko polje aquifer, *Geologija* 60, 267-277.
- Urbanc, J., Jamnik, B. (1998). Izotopske raziskave podzemne vode Ljubljanskega polja, *Geologija* 41, 355-364.
- Urbanc, J., Jamnik, B. (2007). Porazdelitev in izvor nitratov v podzemni vodi Ljubljanskega polja, *Geologija* 50, 467-475.
- Vrzel, J., Vuković-Gačić, B., Kolarević, S., Gačić, Z., Kračun-Kolarević, M., Kostić, J., Aborgiba, M., Farnleitner, A., Reischer, G., Linke, R., Paunović, M., Ogrinc, N. (2016). Determination of the sources of nitrate and the microbiological sources of pollution in the Sava River Basin, *Science of the Total Environment* 573, 1460-1471.
- Vrzel, J., Solomon, D. K., Blažeka, Ž., Ogrinc, N. (2018). The study of the interactions between groundwater and Sava River water in the Ljubljansko polje aquifer system (Slovenia), *Journal of Hydrology* 556, 384-396.
- Vreča, P., Malenšek, N. (2016). Slovenian Network of Isotopes in Precipitation (SLONIP) - a review of activities in the period 1981-2015, *Geologija* 59, 67-83.
- Zupanc, V., Burnik Šturm, M., Lojen, S., Kacjan-Maršič, N., Adu-Gyamfi, J., Bračič-Železnik, B., Urbanc, J., Pintar, M. (2011). Nitrate leaching under vegetable field above a shallow aquifer in Slovenia, *Agriculture, Ecosystems & Environment* 144, 167-174.