

Izotopske raziskave vodnih virov Ljubljanskega barja

Isotopic investigations of the Ljubljansko barje water resources

Janko URBANC¹ & Brigita JAMNIK²

¹Geološki zavod Slovenije, Dimičeva 14, 1000 Ljubljana

²JP Vodovod – Kanalizacija, Vodovodna c. 90, 1000 Ljubljana

Ključne besede: Slovenija, Ljubljansko barje, podzemna voda, izotopi, kisik-18, devterij
Key words: Slovenia, Ljubljana moor, groundwater, isotopes, oxygen-18, deuterium

Kratka vsebina

Rezultati študije kažejo, da je z uporabo kombinacije izotopskih in hidrokemijskih metod mogoče pridobiti nove hidrogeološke podatke o značilnostih vod v posameznih vodonosnikih Ljubljanskega barja. Nedvoumno je bilo možno ločiti vode, ki prihajajo v vodonosnik barja s Krimskega pogorja, od vod, ki zatekajo v vodonosnik iz Gradašnice. Prav tako je bilo možno prepoznati vode, ki pripadajo kraškemu porečju reke Ljubljanice. Na osnovi izotopskih analiz je bila ocenjena povprečna nadmorska višina zaledij posameznih vod. V kombinaciji s kemijskimi analizami je bilo možno približno oceniti delež karbonatnih kamnin v zaledju vodonosnika in opredeliti litološko sestavo zaledja. Na osnovi letnih sprememb amplitude izotopskega signala je bila ocenjena tudi dinamika napajanja posameznih vodonosnikov ter starost opazovanih podzemnih in površinskih vod.

Abstract

Results of the study show that a combination of isotopic and hydrochemical methods can be used to obtain new hydrogeological data about the properties of waters in individual aquifers of the Ljubljansko barje. An unambiguous distinction was made between waters flowing into the aquifer from the Krim mountains and waters originating in the Gradaščica. It was also possible to identify waters deriving from the karst basin of the Ljubljana river. The mean altitude of individual waters' recharge areas was estimated on the basis of isotopic analyses. The combination with chemical analyses was used to assess the approximate share of carbonate rocks in the aquifer's recharge area and determine its lithological composition. On the basis of annual changes in the amplitude of the isotope signal, also the recharge dynamics of aquifers and the age of observed ground and surface waters were estimated.

Uvod

Z izotopskimi raziskavami podzemnih vod Ljubljanskega barja smo želeli pridobiti podatke o izotopskih in hidrokemijskih značilnostih podzemnih vod, izvoru posameznih vod, povprečni nadmorski višini zaledja vodonosnikov, dinamiki obnavljanja vode v vo-

donosnikih in starosti vod ter intenzivnosti vpliva površinskih vod na podzemne vode.

Ljubljansko barje je v hidrogeološkem smislu dokaj kompliciran sistem. Tu najdemo več vodonosnikov. Holocenski vodonosnik v južnem delu barja tvorijo prodni zasipi Borovniščiće, Iške in Želimeljščiće, v severnem delu pa prodni zasip Gradaščiće. Pod holo-

censkimi vodonosnikom se nahajata zgornji in spodnji pleistocenski vodonosnik, oba sta med seboj ločena s slabo prepustnimi glinastimi sedimenti. V podlagi je vodonosnik v karbonatnih kamninah, triasnih in jurskih dolomitih in apnencih.

Izotopska sestava kisika v površinskih vodah

Slika 1 prikazuje povprečno izotopsko sestavo kisika v opazovanih površinskih vodah in izviri. Iz slike je razvidno, da so s težjim kisikovim izotopom ^{18}O najbolj osiromašeni potoki na Rakitni, Iška in Ižica. Takšen rezultat je posledica višinskega izotopskega efekta, saj omenjeni vodotoki odvodnjavajo Krmsko – Rakitniško planoto, ki v najvišjem delu doseže nadmorsko višino preko 1100 m. Na osnovi izvedenih meritev znaša povprečna izotopska sestava potoka na Rakitni -9,4 ‰, Iške -9,2 ‰ in Ižice -9,1 ‰. Na osnovi teh rezultatov lahko sklepamo, da je povprečna nadmorska višina zaledja vseh vod dokaj podobna.

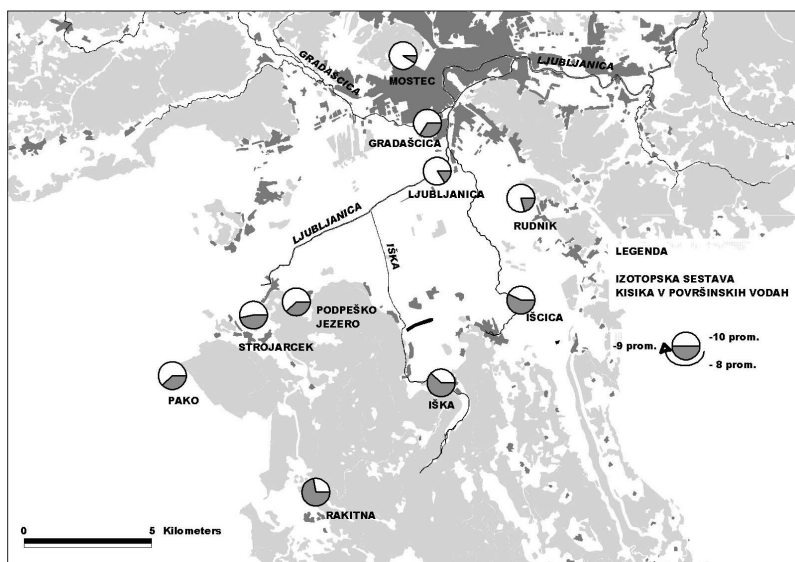
Bolj pozitivne vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ smo zabeležili pri Gradaščici, njena povprečna vrednost $\delta^{18}\text{O}$ znaša -8,6 ‰. Gradaščica ima nekoliko nižjo povprečno nadmorsko višino zaledja, kar se zaradi višinskega izotopskega efekta

odraža tudi v njeni izotopski sestavi kisika. Iz razlike v izotopski sestavi lahko ocenimo, da razlika v srednji nadmorski višini znaša okoli 200 m.

Izrazito pozitivne vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ beležimo pri potoku v Mostecu, njegova povprečna izotopska sestava znaša -8,1 ‰. Nadmorska višina zaledja tega potoka večinoma ne presega niti 400 m. Ocenjujemo, da ima potok v Mostecu podobne izotopske značilnosti kot vode, ki se infiltrirajo na območju Ljubljanskega barja, in da ga lahko uporabimo kot izotopski reper za ocenjevanje povprečne nadmorske višine podzemnih vod na območju Ljubljanskega barja.

Izotopska sestava kraških izvirov na južnem obrobju Ljubljanskega barja se giblje med -8,7 in -8,9 ‰. Povprečna izotopska sestava Ljubljanice v toku dosedanjih opazovanj znaša -8,3 ‰, torej je tudi Ljubljanica izrazito obogatena s težjim kisikovim izotopom.

Najbolj pozitivne vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ smo zabeležili pri potoku Curnovec. Pri tem potoku so bile v poletnem času zabeležene celo vrednosti okoli -6 ‰, kar pripisujemo evaporitnemu izotopskemu efektu zaradi njegovega počasnega toka. Zaradi evaporitnega izotopskega efekta Curnovca torej ne smemo upoštevati kot reprezentativnega za ugotavljanje izotopskih značilnosti obravnavanih vod.



Slika 1: Povprečna izotopska sestava kisika v površinskih vodah območja Ljubljanskega barja



Slika 2: Povprečna izotopska sestava kisika v holocenskem vodonosniku

Izotopska sestava holocenskega vodonosnika

Vodonosnika v holocenskih plasteh sta razvita na južnem delu Barja (Iški vršaj) in na severnem delu ob Gradaščici (prva prodna plast). Izotopska sestava kisika v opazovanih vodah iz holocenskega vodonosnika je prikazana na sliki 2.

V piezometrih IŠ-6pl, IŠ-7 in IŠ-8, ki si sledijo od juga proti severu, lahko opazujemo postopno naraščanje vrednosti $\delta^{18}\text{O}$: povprečna izotopska sestava kisika v piezometru IŠ-6pl znaša $-9,1\text{ ‰}$, v piezometru IŠ-8 pa $-8,6\text{ ‰}$. Ker ima Iška povprečno izotopsko sestavo $-9,2\text{ ‰}$, lahko sklepamo, da se v piezometru IŠ-6pl pojavlja pretežno voda Iške, ki se proti severu v vse večjem deležu meša z vodo iz lokalnih padavin, ki so zaradi nižje nadmorske višine obogatene s težjim kisikovim izotopom.

Tudi voda iz vodnjakov V-1 in V-7 je po izotopski sestavi dokaj blizu Iški, zato tudi v tem primeru lahko pričakujemo prevladujoči delež vode Iške. Vrtine V-9, V-10, V-12 in V-13 so zopet bolj obogatene s težjim kisikovim izotopom, vzrok je verjetno isti kot pri piezometrih IŠ-7 ter IŠ-8, in sicer vpliv lokalno infiltriranih padavin, ki so zaradi višinskega izotopskega efekta obogatene s težjim kisikovim izotopom.

Piezometri ob deponiji komunalnih odpadkov Barje (DBP-2, DBP-4, DBP-5, DBP-6 in DBP-9) imajo povprečno izotopsko sestavo kisika večinoma okoli $-8,8\text{ ‰}$. Ker ima

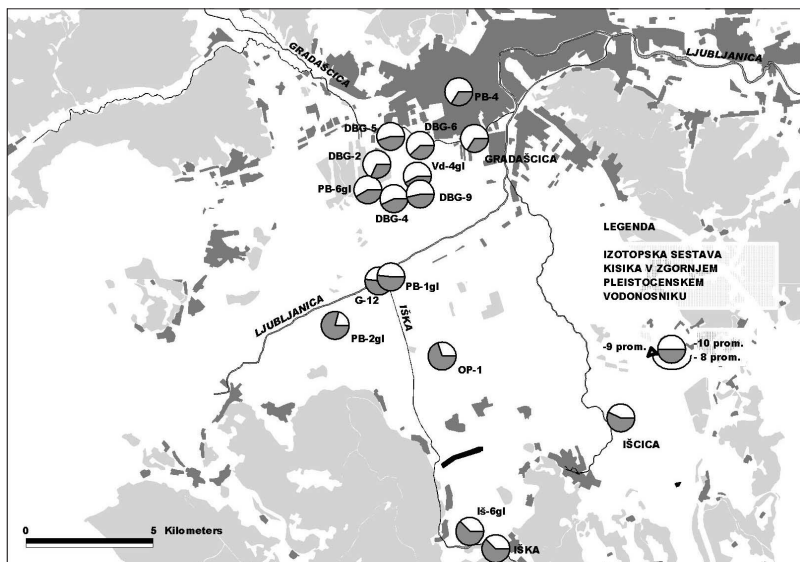
Gradaščica srednjo izotopsko sestavo okoli $-8,7\text{ ‰}$, lahko domnevamo, da je v teh vrtinah voda, ki se pretežno napaja iz Gradaščice.

Zgornji pleistocenski vodonosnik

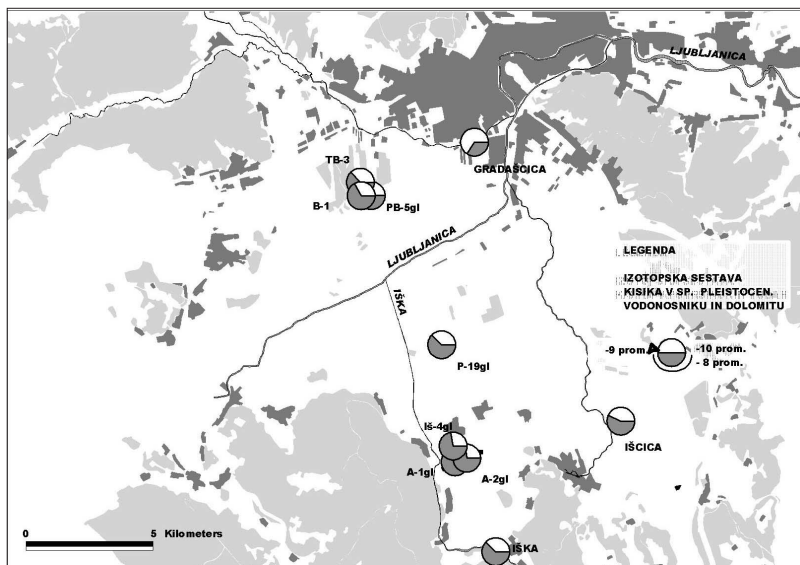
Povprečne vrednosti izotopske sestave kisika v vodah iz zgornjega pleistocenskega vodonosnika so prikazane na sliki 3. Na njej vidimo, da imajo najbolj negativne vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ vrtine IŠ-6gl, OP-2 Peščenik ter PB-2gl. Iz prikazanih vrednosti lahko sklepamo, da gre pri teh vodah za prevladovanje višinskih dotokov s pogorja Krma, za katere je značilno osiromašenje s težjim kisikovim izotopom.

Izotopska sestava vod iz preostalih vrtin (PB-6gl, Vd-4gl, DBG-2, DBG-4, DBG-5, DBG-6, DBG-9 in PB-4 Kolezija) je blizu vrednostim, ki so značilne za Gradaščico (med $-8,6\text{ ‰}$ in $-8,9\text{ ‰}$), zato lahko sklepamo, da gre v teh vrtinah za prevladovanje infiltrirane Gradaščice. O tem nas prepričuje tudi podobnost letnega izotopskega signala teh vod izotopskemu signalu Gradaščice.

V vrtinah G-12 in PB-1 opazujemo v primerjavi z izotopsko sestavo Gradaščice nekoliko večje osiromašenje s težjim kisikovim izotopom. Oblika časovne serije izotopskega signala v teh dveh vrtinah se razlikuje tako od signala Gradaščice kot tudi od Iške. Bolj negativne vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ si razlagamo tako, da v vodonosniku prihaja do mešanja vode iz Gradaščice z vodami, ki prihajajo s Krma.



Slika 3: Povprečna izotopska sestava kisika v zgornjem pleistocenskem vodonosniku



Slika 4: Povprečna izotopska sestava kisika v spodnjem pleistocenskem vodonosniku

Spodnji pleistocenski vodonosnik

Vode iz spodnjega pleistocenskega vodonosnika so od vseh obravnavanih vod v povprečju najbolj osiromašene s težjim kisikovim izotopom. Povprečne izotopske sestave vod, ki izhajajo iz spodnjega pleistocenskega vodonosnika se gibljejo v intervalu med -9,2 in -9,5 ‰. Iz tega lahko sklepamo, da v spod-

nji pleistocenski vodonosnik dotekajo vode z najvišjih predelov krimskega pogorja, kjer so zaradi višinskega izotopskega efekta padavine najbolj osiromašene z ^{18}O . Rezultati kažejo, da se podzemna voda v spodnjem pleistocenskem vodonosniku pretaka pod Ljubljano proti severu brez pomembnejših vplivov s površja oziroma višje ležečih vodonosnih struktur.

Razmerje med izotopsko sestavo kisika ter koncentracijo karbonatov

Vsebnost v vodi raztopljenih karbonatov, predvsem kalcijevega in magnezijevega karbonata, je večinoma odvisna od dveh dejavnikov: deleža karbonatnih kamnin v zaledju vodonosnika ter parcialnega tlaka CO_2 v tleh, ki pa je odvisen od klimatskih in vegetacijskih značilnosti območja napajanja vodonosnika. Znano je, da imajo vode z višjimi zaledji zaradi nižjega talnega parcialnega tlaka CO_2 običajno manjšo karbonatno trdoto od vod, pri katerih je zaledje nižje.

Z višjo nadmorsko višino so padavine večinoma vse bolj osiromašene s težjim kisikovim izotopom, kar opisujemo kot višinski izotopski efekt. V povprečju znaša višinski izotopski efekt na kisiku-18 okoli 0,3 ‰ na vsakih 100 m višinske razlike. Višinski izotopski efekt je v hidrogeoloških raziskavah zelo uporaben, saj z njim lahko opredelimo približne nadmorske višine zaledij posameznih vodonosnikov.

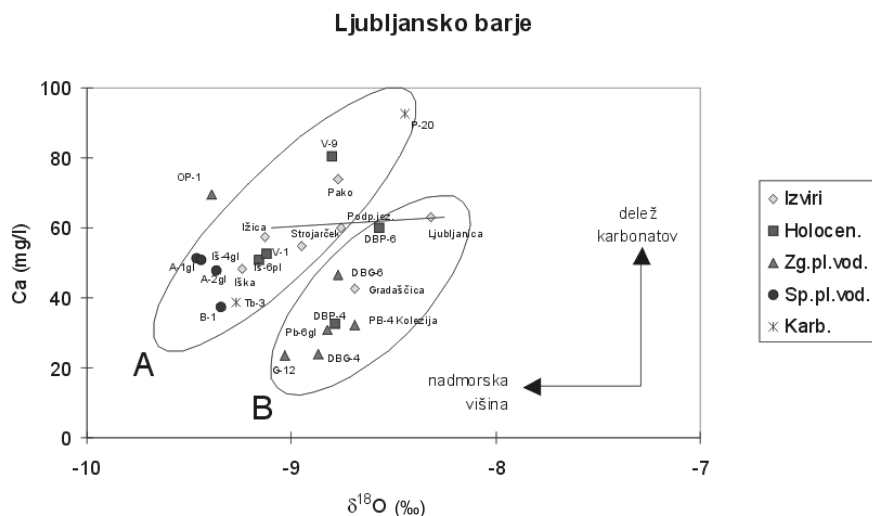
Graf Ca – $\delta^{18}\text{O}$ (slika 5) nam torej prikazuje vode po dveh parametrih, ki sta oba v določeni povezavi z nadmorsko višino zaledja vodonosnika: vode z višjih območij bodo imele zaradi višinskega izotopskega efekta bolj negativne $\delta^{18}\text{O}$ vrednosti ter nižjo karbonatno trdoto kot vode z nižjih območij. Nižjo karbonatno trdoto bomo izmerili tudi

pri vodah, v katerih zaledjih je manjši delež karbonatnih kamnin.

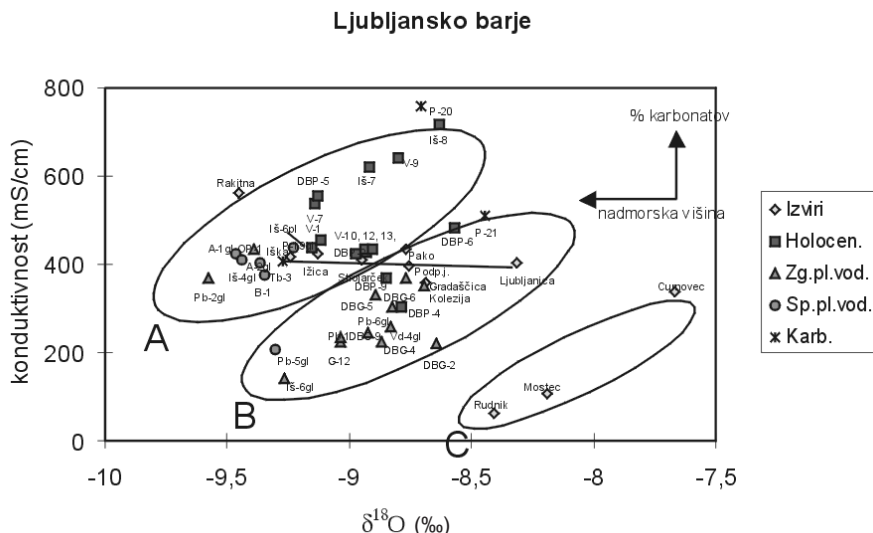
Iz slike 5 je razvidno, da rezultate analiz v grobem lahko razvrstimo v dve glavni skupini. Prvo skupino (A) tvorijo vode, ki imajo v povprečju najvišje koncentracije HCO_3 oziroma najvišjo karbonatno trdoto ob dokajšnji osiromašenosti vode z izotopom ^{18}O . Za te vode lahko sklepamo, da je njihovo zaledje zgrajeno praktično izključno iz karbonatnih kamnin, bodisi apnencev bodisi dolomitov. Glede na geološke razmere okrog Ljubljanskega barja lahko sklepamo, da te vode dotekajo z širšega območja Krima oziroma Rakitniške planote.

V skupino karbonatnih vod z največjo srednjo nadmorsko višino zaledja uvrščamo torej praktično vse vode iz vodnjakov vodarne Brest, ki zajemajo vodo v spodnjem pleistocenskem vodonosniku: IŠ-4 gl, A-1gl, A-2gl. Vode s podobnimi hidrokemijskimi karakteristikami najdemo tudi v vrtini B-1 ob Curnovcu ter v 346 m globoki vrtini Tb-3, ki zajema vodo iz dolomita v podlagi. V to skupino uvrščamo tudi potok Iško ter vode holocenskega vodonosnika Iškega vršaja: IŠ-6pl, V-1 in V-9.

V drugi skupini (B) so vode, katerih karbonatna trdota je ob enaki izotopski sestavi kisika v povprečju nižja približno za polovico, kar kaže na manjši delež karbonatnih kamnin v zaledju. V tej skupini se nahaja



Slika 5: Razmerje med povprečno izotopsko sestavo kisika in povprečno koncentracijo kalcija v podzemnih in površinskih vodah Ljubljanskega barja



Slika 6: Razmerje med povprečno izotopsko sestavo kisika in povprečno konduktivnostjo vode

tudi Gradašnica oziroma Mali Graben iz česar bi lahko sklepali, da gre v skupini B za vode, ki se napajajo iz Gradašnice. Do podobnih zaključkov lahko pridemo tudi na osnovi geološke zgradbe obrobja Ljubljanskega barja. V zaledju Gradašnice najdemo glinaste skrilavce iz karbona in perma ter grödenske peščenjake in skrilavce, v katerih praktično ni karbonatov. Karbonatno komponento v zaledju Gradašnice pa predstavljajo skitski in anizijski apnenci ter dolomiti. Zaradi litološko mešanega zaledja ima voda manjšo trdoto kot v primeru, da bi bilo območje napajanja zgrajeno večinoma iz karbonatnih kamnin.

Zelo podobno sliko dobimo tudi ob primerjavi izotopske sestave kisika v vodi ter njene konduktivnosti (slika 6). Razlika je le v tem, da je na grafu večje število vzorčnih mest, saj je bila konduktivnost merjena na večjem številu vzorcev.

Na sliki sta jasno vidni že prej opisani skupini vzorcev: vode iz skupine A imajo zaledje v Krmskem hribovju, vode iz skupine B pa napaja Gradašnica. Na sliki pa je prikazana tudi dodatna skupina vod C. V njej najdemo vode, katerih zaledje je nekarbonatno, bodisi da je zgrajeno iz karbonskih in permskih glinastih skrilavcev bodisi iz barjanskih sedimentov. Zato so koncentracije karbonatov ter z njimi povezana konduktivnost teh vod nizki. Ker je zaledje teh vod v povprečju dokaj nižinsko, so precej

obogatene z izotopom ^{18}O . Na grafu so v skupini C prikazani rezultati potokov v Mostecu in Rudniku, ki jih uporabljamo tudi kot višinski izotopski reper. V to skupino uvrščamo tudi potok Curnovec.

Zahvala

Zahvaljujemo se organizacijam, ki so omogočile izvedbo raziskovalne naloge: Mestni občini Ljubljana, JP Vodovod – Kanalizacija Ljubljana, JP Snaga Ljubljana ter Ministrstvu za šolstvo, znanost in šport.

Literatura

- Mencej, Z. 1988: Prodni zasipi pod sedimenti Ljubljanskega barja. – *Geologija* 31, 517–553, Ljubljana.
- Pezdič, J., Dolenec, T., Krivic, P. & Urbanc, J. 1986: Environmental isotope studies related to groundwater flow in the central Slovenian Karst region, Yugoslavia. *Proceedings of 5th International Symposium on Underground Water Tracing*, 91–100, Athens.
- Pezdič, J. 1998: Stable isotopes as natural tracers of the karst recharge to the tertiary clastic aquifers: A case study of the southern part of Ljubljana marsh. – *Acta Carsologica* 27/1, 349–360, Ljubljana.
- Prestor, J., Trček, B., Strojani, M. & Mencej, Z. 1993: Meritve in interpretacija vpliva črpanja podzemne vode iz globokega vodonosnika vodarne Brest na širše območje Ljubljanskega barja. Delovno poročilo, Arhiv GeoZS, št. K-II-30d/c-1/772, Ljubljana.