

Izotopske raziskave vodnih virov na območju vodonosnikov Ljubljanskega polja in Barja

Klara Žagar^{*}, Lucia Ortega^{**}, Urška Pavlič^{***}, Brigita Jamnik^{****}, Branka Bračič
Železnik^{****}, Polona Vreča^{*}

Povzetek

Potreba po pitni vodi, spremembe rabe prostora in podnebne spremembe vplivajo na količino, kakovost in vodno bilanco vodnih virov. Razumevanje urbanega vodnega kroga, vključno z uporabo okoljskih indikatorjev, je ključnega pomena za razvoj strategij upravljanja, ki izboljšujejo kakovost in razpoložljivost vodnih virov. Z določanjem izotopske sestave vodika ($\delta^2\text{H}$) in kisika ($\delta^{18}\text{O}$) v padavinah, površinskih in podzemnih vodah na območju Ljubljane, smo analizirali časovno dinamiko urbanega kroženja vode in spremljali spremembe v vodnih virih, ki so vir pitne vode za Ljubljano. Določili smo delež lokalnih padavin in površinskih voda k napajanju in obnavljanju podzemne vode. Povprečni zadrževalni časi (MRT) na reki Savi so bili ocenjeni na 3–4 leta, kar je precej več, kot so kazale prejšnje študije. Ti rezultati prispevajo k boljšemu razumevanju lokalne porazdelitve podzemne vode in nudijo pomembne informacije za prihodnje upravljanje z vodnimi viri v urbanem okolju.

Ključne besede: Urbana hidrologija, stabilni izotopi, vodni viri, upravljanje vodnih virov

Key words: Urban hydrology; Isotopes; Water sources; Water management

Uvod

Zdravstveno ustrežna pitna voda je ključnega pomena za urbana območja, vendar pa postaja njeno zagotavljanje zaradi naraščajoče urbanizacije (United Nations, 2019) in vplivov podnebnih sprememb, vse bolj zahtevno (Caretta in Mukherji, 2022).

Slovenija, ki jo zaznamujejo raznolika podnebna območja in kompleksna topografija, se sooča z izzivi podnebnih sprememb, ki napovedujejo znatno povišanje povprečne letne temperature do konca 21. stoletja, in sicer od 1,3 °C do 4,1 °C, odvisno od vrste scenarija (Dolinar, 2018). Napovedi o spremembah količine padavin so manj zanesljive, vendar modeli nakazujejo povečanje količine padavin skozi leto, zlasti v zimskem času (Dolinar, 2018). Poleg podnebnih sprememb, urbanizacija dodatno ogroža naravne procese ohranjanja količin in kakovosti podzemne vode, saj zmanjšuje infiltracijo, povečuje odtok in znižuje kakovost vode, kar ogroža trajnostno oskrbo z vodo (McGrane, 2016).

V zadnjih desetletjih so stabilni izotopi vodika in kisika postali pomembni okoljski sledilci za preučevanje določanja vodnih virov ter njihovega mešanja v urbanih območjih. Skupaj s fizikalno-kemijskimi podatki omogočajo podatki o izotopski sestavi vodika ($\delta^2\text{H}$) in kisika ($\delta^{18}\text{O}$) vpogled v procese razporeditve vode, njenega premikanja v porečjih in vplivanja med različnimi vodnimi viri (Clark, 2015; Ortega et al., 2022). Takšni pristopi omogočajo kvantitativno določitev virov vode, njihove prispevke k oskrbi s pitno vodo ter oceno časa zadrževanja vode in mešalnih modelov (Sánchez-Murillo et al., 2020; Nagode et al., 2021).

* Odsek za znanosti o okolju, Institut »Jožef Stefan«, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana; klara.zagar@ijs.si

** Mednarodna agencija za jedrsko energijo, Wagramer Str. 5, 1220 Dunaj,

*** Agencija republike Slovenije za okolje, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana

**** JP VOKA SNAGA d.o.o., Vodovodna cesta 90, 1000 Ljubljana

Ljubljana, glavno mesto Slovenije, z okoli 300.000 prebivalci, se oskrbuje s pitno vodo iz dveh vodonosnikov: Ljubljansko polje in Ljubljansko barje, ki imata različni napajalni območji (Nagode et al., 2022). Pretekle raziskave so pokazale, da predstavljajo glavi vir podzemne vode lokalne padavine in površinske vode (Urbanc in Jamnik, 1998; Vrzel et al., 2018), povezave med obema vodonosnikoma pa so še vedno razmeroma neraziskane (Cerar in Urbanc, 2013).

V prispevku predstavljamo rezultate raziskav prispevka posameznih vodnih virov k oskrbi Ljubljane s pitno vodo ter analizo mešalnih procesov in kratkoročnih sprememb v vodovodnem sistemu. Rezultati kažejo na pomembne procese mešanja, vplive podnebnih sprememb na obnavljanje podzemne vode in omogočajo razvoj trajnostnih rešitev za oskrbo z vodo.

Območje raziskav

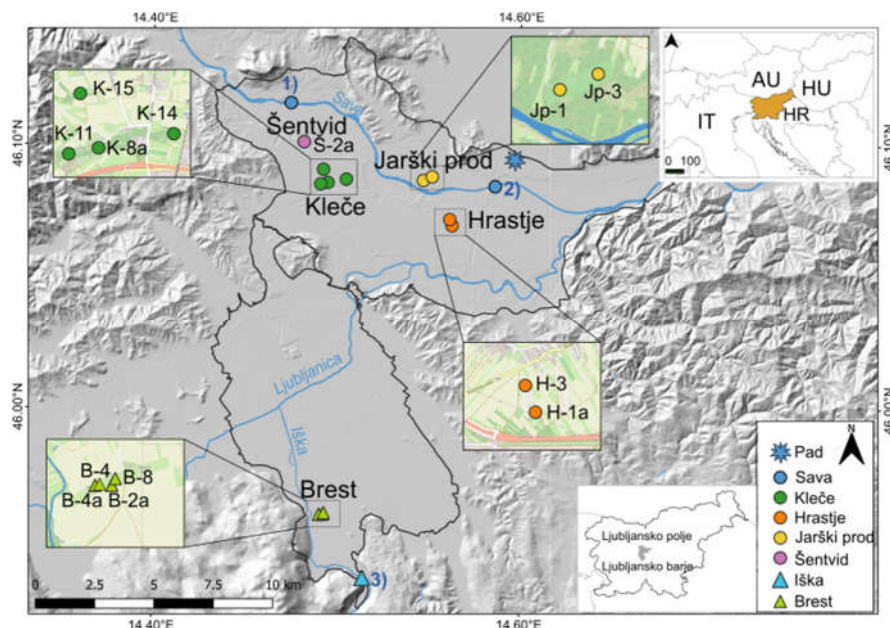
Raziskovalno območje se nahaja na območju osrednje Slovenije in zajema dva vodonosnika: Ljubljansko polje in Ljubljansko barje (Slika 1). Ljubljansko polje leži v severnem delu, medtem ko je Ljubljansko barje v južnem delu.

Ljubljansko polje je nastalo v zgodnjem pleistocenu s tektonskim ugrezanjem. Podlago Ljubljanskega polja sestavljajo karbonske in permske kamnine, ki jih tvorijo kremenovi konglomerati, peščenjaki, meljevci in glinasti skrilavci, ki izdanjajo v okoliških hribih (Žlebnik, 1971). Globina sedimentov je spremenljiva, najgloblji del do predkvartarne podlage pa je 105 m (Bračič Železnik et al., 2005). V pleistocenu in holocenu so območje zapolnjevale prodno peščene naplavine reke Save. Globina podzemne vode se nahaja 20-25 m pod površjem (Vrzel et al., 2018). Glavni vodotoki, ki tečejo skozi preučevano območje, so reka Sava, Ljubljanica in Iška (Slika 1). Reka Sava teče od severozahoda proti vzhodu (Jamnik et al., 2003).

Hidravlična prevodnost se giblje od $3-7 \times 10^{-3}$ m/s na obrobju vodonosnika do 10^{-2} m/s v osrednjem delu (Jamnik et al., 2003). Hidrološke razmere definirajo močne povezave med reko Savo in podzemno vodo. Ocenjene hitrosti pretoka podzemne vode in transport onesnaževal se gibljejo od nekaj m/dan do 20 m/dan (Janža et al., 2005). Podzemna voda se na Ljubljanskem polju črpa iz štirih vodarn: Kleče, Hrastje, Jarški prod in Šentvid (slika 1). Globine vodnjakov se gibljejo od 30 do 105 m pod površjem, filterski odseki vrtin pa se nahajajo na globini od 200 do 290 m nadmorske višine.

Tudi Ljubljansko barje predstavlja depresijo, ki se na jugu razteza do Krimsko-Mokriških hribov. V pleistocenu in holocenu so nižine Ljubljanskega barja zapolnili aluvialni, močvirni in jezerski sedimenti (Mencej, 1988), območje pa se je ugreznilo ob prelomih. V južnem, zahodnem in osrednjem delu Ljubljanskega barja je podlaga sestavljena iz zgornjetrijasnega dolomita in jurskega apnenca, medtem ko je v severnem in vzhodnem delu sestavljena iz triasnih in permokarbonskih peščenjakov, kremenovega peščenjaka peska in konglomeratov z nizko hidravlično prevodnostjo. Globina vodonosnika je v vzhodnem delu globlja v primerjavi z zahodnim delom, na južnem robu se globina strmo znižuje iz nekaj deset metrov na 100 metrov, medtem ko je na severu globina več kot 150 metrov. Zaradi heterogenosti sedimentov so hidrogeološke razmere na Ljubljanskem barju bolj zapletene kot na Ljubljanskem polju (Mencej, 1988; Cerar in Urbanc, 2013), saj na Ljubljanskem barju lahko ločimo štiri med seboj bolj ali manj ločene vodonosnike. Splošna hidravlika Ljubljanskega barja je odvisna od toka reke Ljubljanice, vendar reka ne prispeva k obnavljanju podzemne vode zaradi neprepustnega rečnega dna (Jamnik et al., 2003). Iška, desni pritok reke Ljubljanice, teče proti severu iz kraške planote Krim-Mokrca, njen pretok v bližini naselja Iška vas znaša od 0 do 90 m³/s in napaja zgornji vodonosnik tudi na območju vodarne Brest. Globlji deli vodonosnika se napajajo posredno s pomočjo globoke perkolacije vode, ki se

infiltrira v južnem zaledju. Ta voda se nato prenaša skozi razpoke in vodnjake v karbonatnih kamninah (Mencej, 1988) ter vpliva na dinamiko podzemne vode. Vodnjaki v vodarni Brest (slika 1) so plitvi z globino od 30 m in globoki z globino preko 100 m.



Slika 1 – Lokacija vzorčenja na Ljubljanskem polju in Ljublanskem barju.

Količina črpanja v vodarni Brest je odvisna od hidroloških razmer; med sušnimi obdobji se iz vseh plitvih vodnjakov lahko črpa le 40 l/s (Bračič Železnik, 2016). Hidrokemične značilnosti pitne vode iz vodnjakov vodarne Brest so odvisne od reke Iške in se spreminjajo glede na razdaljo od nje (Cerar in Urbanc, 2013; Urbanc in Jamnik, 2002). Močna povezava med površinsko in podzemno vodo je zelo pomembna, saj so zgornje vodonosne plasti plitvo pod površino in slabo zaščitene pred vplivi s površine. Površinska voda neposredno pronica v plitvo podzemno vodo skozi sistem kanalov in razpok v kraškem zaledju.

Za območje Ljubljanske kotline je značilno zmerno celinsko podnebje (Köppenu–Geigerjevem sistem Cfb) (Ogrin et al., 2023). Dolgoletna povprečna temperatura zraka je 11,4 °C, medtem ko je povprečna količina padavin 1368 mm (obdobje 1991–2020; ARSO, 2022). Ljubljana kaže precej izrazite trende segrevanja zraka, najbolj opazne v poletnih mesecih (0,4 °C/10 let). Maksimum padavin je opazen v jesenskih mesecih s povprečjem 448 mm v 30-letnem obdobju (Bertalanič et al., 2019). Podnebne projekcije za Ljubljano kažejo na pomemben dvig povprečne letne temperature do konca 21. stoletja, ki se bo gibal od 1,3 °C do celo 4,1 °C, odvisno od različnih scenarijev. Čeprav so projekcije sprememb padavin za to območje, ki leži v prehodni coni, manj zanesljive, različni modeli napovedujejo povečanje padavin čez celo leto, pri čemer je najbolj izrazita sprememba navzgor pričakovana v zimskih mesecih (Dolinar, 2018; Bertalanič et al., 2019). Tudi pretoki rek se spreminjajo. Po letu 1992 se je število sušnih epizod v Sloveniji povečalo za več kot 50 %, njihovo trajanje pa se je skoraj podvojilo: delež časa s prisotnostjo sušnih ali mokrih epizod je tako postal prevladujoč (Petan in Koprivšek, 2024).

Metodologija

Mesečno vzorčenje je potekalo v letih 2020 in 2021 in je obsegalo meritve padavin (N=24), površinskih voda (N=56) ter podzemne vode (N=248). V Ljubljani, na postaji IJS-

Reaktor (SLONIP, <https://slonip.ijs.si>), so bili mesečno zbirani vzorci za določanje $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$. Vzorčenje reke Save se je začelo januarja 2020 z mesečnim vzorčenjem na lokacijah Brod in Šentjakob, medtem ko se je z vzorčenjem reke Iške pri Iški vasi začelo marca 2021. Na terenu so bile izvedene meritve temperature in električne prevodnosti (EC).

Zbiranje vzorcev podzemne vode je vključevalo 13 vodnjakov (slika 1), ki jih je kot reprezentativne izbral upravljavec vodovodnega sistema: Kleče 8a (K-8a), Kleče 11 (K-11), Kleče 14 (K-14), Kleče 15 (K-15), Hrastje 1a (H-1a), Hrastje 3 (H-3), Brest 4 (B-4), Brest 2a (B-2a), Brest 4a (B-4a), Brest 8 (B-8), Jarški prod 1 (Jp-1), Jarški prod 3 (Jp-3) in Šentvid 2a (Š-2a). Vzorčenje je izvedlo tehnično osebje JP VOKA SNAGA d.o.o. Če izbrani vodnjak ni bil v obratovanju, je bil vzorčen najbližji vodnjak (ti rezultati niso obravnavani v tem prispevku). Ob vzorčenju je bila izmerjena tudi temperatura vode. Bolj podrobno vzorčenje je opisano v Žagar et al. (2024), medtem ko so vsi podatki zbrani v podatkovni bazi Pangaea (Žagar et al., 2022a; 2022b).

Izotopska sestava kisika in vodika v vodi ($\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$) je bila določena v vseh 328 vzorcih po postopku uravnoveženja $\text{H}_2\text{-H}_2\text{O}$ (Coplen et al, 1991) in $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ (Epstein in Mayeda, 1953; Avak in Brand, 1995) na masnem spektrometru Finnigan MAT DELTA plus z dvojnimi uvajalnimi sistemom in avtomatskim $\text{H}_2\text{-H}_2\text{O}$ in $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ ekvilibrijem $\text{HDO}_{\text{eq}48}$ z vodno kopeljo s temperaturo 18 °C. Past za vlago (etanol) je bila ohlajena na -55 °C. Rezultati so v obliki vrednosti δ (delta), izraženo v promilih (‰) z enačbo:

$$\delta X = \left(\frac{R_{VZ}}{R_{ST}} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

kjer je X ^{18}O ali ^2H , R_{VZ} in R_{ST} pa izotopsko razmerje med težjimi in lažjimi izotopi kisika ali vodika ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ali $\text{H}/^1\text{H}$) v vzorcu oziroma standardu umerjenem na mednarodni standard V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) (Brand in Coplen, 2012). Podrobnejši opis metode je podan v prispevku Žagar et al. (2024). Vzorci so bili analizirani na Institutu "Jožef Stefan".

Obdelava podatkov

Vir meteoroloških in hidroloških podatkov – Meteorološki podatki o količini padavin in temperaturi zraka za postajo Ljubljana Bežigrad (<https://meteo.arso.gov.si/met/sl/>) ter hidrološki podatki (pretok in temperatura vode reke Save v Šentjakobu pri Ljubljani in Iške v Iški vasi; <https://www.arso.gov.si/vode/podatki>) so bili pridobljeni iz arhiva Agencije RS za okolje (v nadaljevanju ARSO).

Analiza podatkov – Vse osnovne statistike so bile izvedene z uporabo Microsoft® Office Excel 2019 in OriginPro 2021 za grafično prikazovanje.

Lokalna meteorna premica – Lokalna meteorna premica (LMWL) za obdobje od januarja 2020 do decembra 2021 (N=24) je bila izdelana z uporabo metode zmanjšane glavne osi in upoštevanjem količine padavin ($\text{LMWL}_{\text{PWRMA}}$) (Crawford et al., 2014) s pomočjo Python kode (Pavšek in Vreča, 2022). Pridobljena enačba je bila primerjana z Globalno meteorno premico (GMWL): $\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$ (Craig, 1961).

Izotopska masna bilanca – Preprosta izotopska masna bilanca je bila uporabljena zaradi statistične razlike med vrednostjo $\delta^{18}\text{O}$ lokalnih padavin ter $\delta^{18}\text{O}$ Save in Iške ($p=0,05$). Frakcija podzemne vode je bila določena glede na vsebnost padavin in površinske vode.

Zadrževalni čas vode (MRT) – Za modeliranje sezonskih trendov $\delta^{18}\text{O}$ v padavinah in površinskih vodah reke Save pri Brodu in Šentjakobu smo uporabili periodično regresijsko analizo s prilegajočo se sinusno krivuljo. Model predpostavlja hitro mešanje padavin in površinskih voda, MRT pa je bil izračunan z eksponentnim modelom, ki temelji na amplitudi variacij $\delta^{18}\text{O}$ tako v padavinah kot v površinskih vodah (Maloszewski et al., 1983).

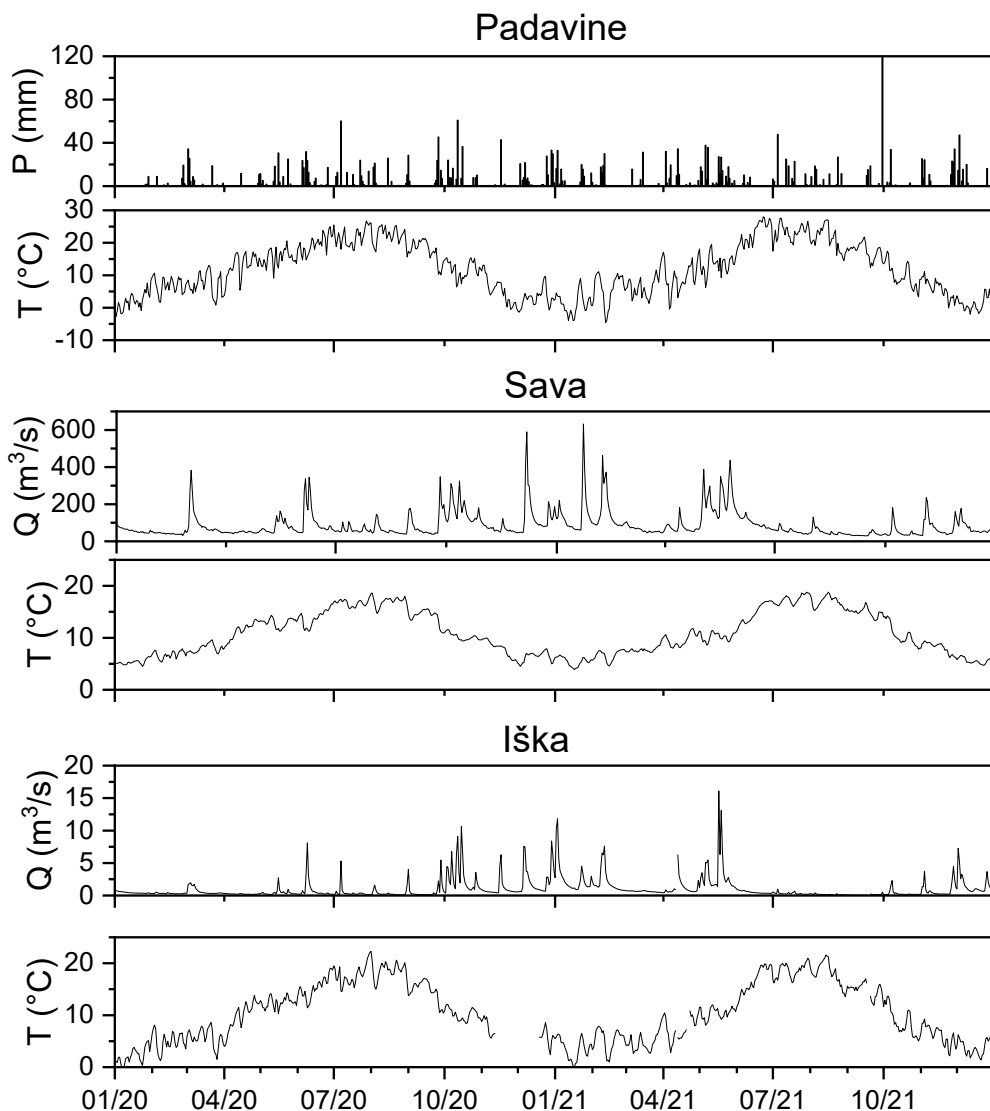
Bolj podrobni opisi obdelav podatkov so podani v prispevku Žagar et al. (2024).

Rezultati

Podnebne in izotopske značilnosti padavin

Na območju raziskav so bile temperature v obdobju 2020 in 2021 za več kot 0,8 °C višje od dolgoletnih (1981-2010). Poleg tega je bilo v letu 2020 zabeležen upad količine padavin za 7,3 %, v letu 2021 pa presežek padavin za 5,9 % v primerjavi z dolgoletnim povprečjem letnih padavin, ki znaša za Ljubljano 1362 mm (ARSO, 2022). Največja dnevna količina padavin, je bila 120 mm (september 2021), medtem ko se je povprečna dnevna temperatura gibala med -4,6 in 28 °C (slika 2).

Mesečne vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ v padavinah so sledile sezonskim trendom: bolj negativne vrednosti so bile v zimskih mesecih, medtem ko so bile bolj pozitivne v poletnih mesecih. Utežene vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ so bile $-8,47 \pm 0,22 \text{ ‰}$ in $-56,2 \pm 1,5 \text{ ‰}$ (N=24), s skupno variabilnostjo 9,55 ‰ oziroma 74,9 ‰ v obdobju dveh let. LMWL_{PWRMA} za celotno obdobje je bila $\delta^2\text{H} = (7.23 \pm 0.16) \delta^{18}\text{O} + (5.06 \pm 1.44)$, $R^2 = 0.99$, N=24 in je podobna premici za krajše obdobje (januar 2020 – avgust 2021) (Nagode et al., 2022).

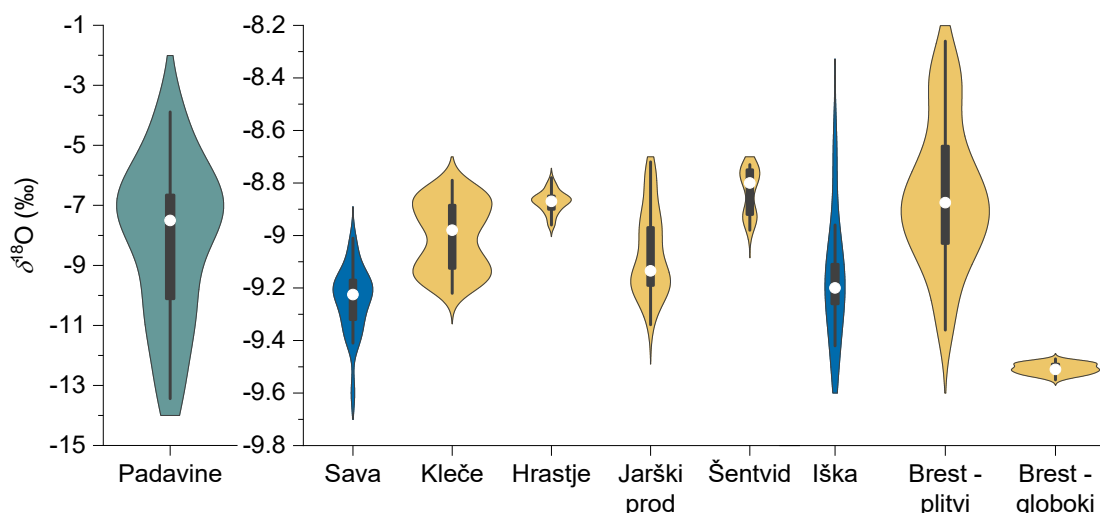


Slika 2 – Dnevne količine padavin, temperature zraka, pretoka in temperature površinskih voda (Sava in Iška).

Hidrološke in izotopske značilnosti površinskih vod

Pretok reke Save se je v času vzorčenja močno spreminjal; dnevni pretok se je gibal od 31,6 do 385,7 m³/s brez izrazitih sezonskih trendov (slika 2). V letu 2020 je bil pretok 13,2 % nižji, v letu 2021 pa 6,1 % višji od dolgoročnega povprečja 82,0 m³/s (1981–2010). Temperatura reke Save je sledila sezonskemu nihanju in je bila med 3,9 °C in 16,8 °C, medtem ko je bila EC med 225 in 372 µS/cm. Variabilnost $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$ je bila minimalna (3,2 ‰ za $\delta^2\text{H}$ in 0,61 ‰ za $\delta^{18}\text{O}$ v dvoletnem obdobju), brez izrazitih sezonskih razlik.

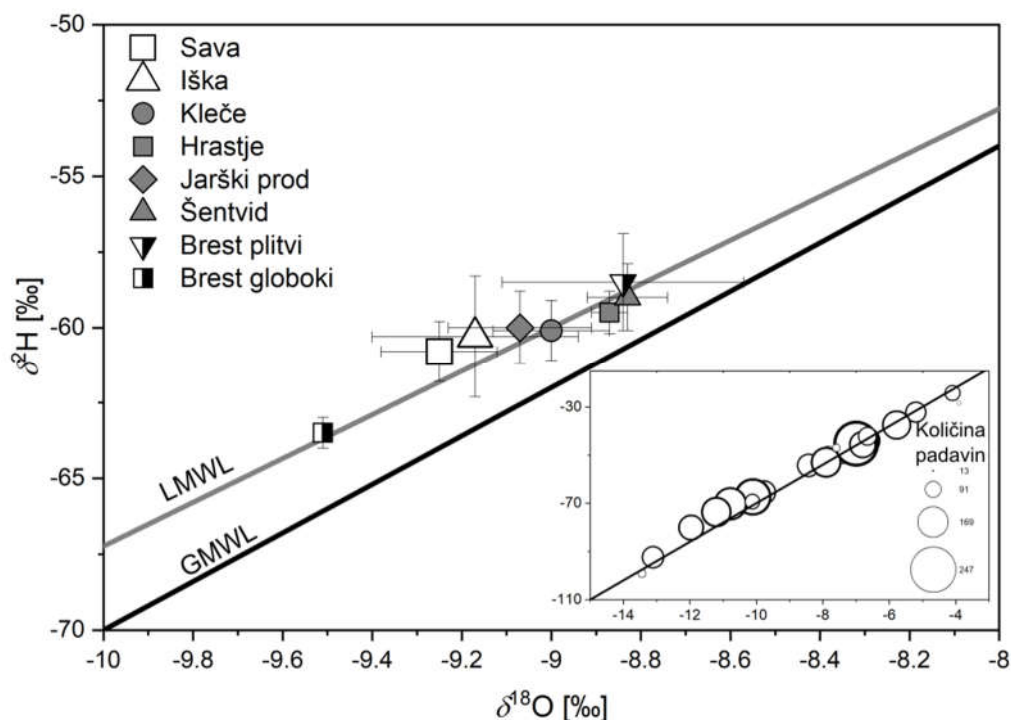
Reka Iška, opazovana od marca 2021, je imela manjši pretok (0,09–11,83 m³/s) (slika 2) in višjo EC (358–423 µS/cm), kar je posledica kraškega zaledja ter manjšega prispevnega zaledja reke. Temperatura se je gibala med 0,0 °C in 22,3 °C, najvišja je bila poleti 2021. Izotopske vrednosti ($\delta^{18}\text{O}$: od –9,51‰ do –8,68 ‰) so pokazale več sezonskih nihanj kot pri reki Savi, kar odraža njene specifične hidrološke značilnosti.



Slika 3 – Violinski graf porazdelitve izotopske sestave kisika ($\delta^{18}\text{O}$) v padavinah, reki Savi in Iški ter v vseh vodarnah.

Spremenljivost gladine podzemne vode in izotopske sestave

Med letoma 2015 in 2021 je gladina podzemne vode v vodonosnikih Ljubljanskega polja in Ljubljanskega barja sledila hidro-meteorološkim razmeram, z najnižjimi vrednostmi konec poletja (avgust) in najvišjimi pozimi (december). Leta 2020 so se vodne gladine v vodonosniku Ljubljanskega polja zniževale do junija, nato dosegle vrh decembra, najvišje vrednosti pa dosegle junija 2021, katerim je sledilo zniževanje vodnih gladin do novembra. Vodonosnik Ljubljanskega barja je pokazal podoben trend, z izrazitimi vrhovi januarja-februarja in maja-junija 2021. Temperature podzemne vode so bile med 9,9 in 16 °C.



Slika 4 – Povprečna izotopska sestava reke Save in Iške ter v vodarnah Kleče, Hrastje, Jarški prod, Šentvid ter Brest (plitvi in globoki vodnjaki). Izotopska sestava padavin za obdobje 2020-2021 je prikazana v grafu desno spodaj. GMWL – globalna meteorna premica; LMWL – lokalna meteorna premica.

Vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ v podzemni vodi vodonosnika Ljubljanske polja niso pokazale velike variabilnosti; od $-9,34\text{‰}$ do $-8,72\text{‰}$ za $\delta^{18}\text{O}$ (slika 3) ter od $-62,6\text{‰}$ do $-56,7\text{‰}$ za $\delta^2\text{H}$ z zelo majhnimi sezonskimi razlikami. Nasprotno pa so vrednosti v vodonosniku Ljubljanskega barja znašale od $-9,55\text{‰}$ do $-8,26\text{‰}$ za $\delta^{18}\text{O}$ (slika 4) ter od $-64,2\text{‰}$ do $-54,5\text{‰}$ za $\delta^2\text{H}$, pri čemer so bile vrednosti iz globljih vodnjakov nižje. Oba vodonosnika sta imela omejeno izotopsko variabilnost v primerjavi s padavinami in površinsko vodo, brez znakov izhlapevanja.

Razprava

Med letoma 2020 in 2021 so bile temperature višja od dolgoletnega povprečja. Povprečna letna temperatura je preseгла dolgoletno povprečje za $0,9\text{ °C}$ (2020) in $0,6\text{ °C}$ (2021), pri čemer so bile zime toplejše. Padavinski vzorci so pokazali manj padavin poleti in jeseni ter več spomladi.

Izotopska sestava padavin je povezana s temperaturo in vrsto padavin. Negativne vrednosti so bile zaznane pozimi, zaradi snega in manjše evaporacije, medtem ko so bile bolj pozitivne vrednosti v toplih mesecih, predvsem zaradi izhlapevanja (Gat et al., 1996; Vreča et al., 2006; Kern et al., 2020).

Značilnosti površinskih voda

Med januarjem in aprilom 2020 je bil pretok Save pri Šentjakobu za 10% nižji od povprečja med letoma 1981–2010. Majhna časovna nihanja vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ v reki Savi so

posledica njenega obsežnega alpskega dela porečja, saj padavine na višjih nadmorskih višinah pomembno prispevajo k pretoku reke (Ogrinc et al., 2008, Vrzel et al., 2018). Projekcije podnebnih sprememb nakazujejo nadpovprečno segrevanje, krajša obdobja snežne odeje, več padavin pozimi in pogostejše ekstremne dogodke, kar bo vplivalo na prihodnje stopnje napajanja (Dolinar, 2018).

Majhna spremenljivost $\delta^{18}\text{O}$ v reki Savi ter daljši zadrževalni časi (MRT), ocenjeni na 4,1 leta (Brod) oz. 3,5 leta (Šentjakob) kažejo na majhen vpliv mlajših padavin (Nagode et al., 2022; Žagar et al., 2024), kar potrjujejo podobne ugotovitve na manjših porečjih (Kuhleman et al., 2021). Kljub daljšemu nizu so rezultati zelo podobni kot pri krajših nizih (Nagode et al., 2022). Na izotopsko sestavo $\delta^{18}\text{O}$ reke Save vplivajo tudi drugi procesi, kot so padavine iz gorvodnih porečij ali pronicanje podzemne vode (Scheliga et al., 2017). Daljši MRT bi lahko bil posledica vzorčenja v pogojih nizkih in nizkih srednjih pretokov, pri čemer se pričakuje, da bodo takšni pogoji v prihodnje postajali vse pogostejši. Daljši MRT površinskih voda so povezani z netočnim določanjem starosti (>4 leta). Le to je povezano s starejšimi zalogami podzemne vode z daljšimi časovnimi razponi, kar presega zmogljivosti stabilnih izotopov za njihovo določanje (McGuire in McDonnell, 2006).

Iška, ki je pomembna za napajanje vodonosnika Ljubljanskega barja, se hitreje odzove na sušne in tople razmere. Le-to je razvidno iz višjih $\delta^{18}\text{O}$ vrednosti. Povišane vrednosti EC v spomladanskih in jesenskih mesecih 2021 nakazujejo prispevek podzemne vode ter morebitne vplive difuznih onesnaževal iz kmetijstva in gospodinjstev (Gücker in Pusch, 2006).

Značilnosti podzemnih voda

Manjše izotopske razlike so opazne med vodonosnikoma Ljubljanskega polja in Ljubljanskega barja. Plitvejši vodnjaki v vodonosniku Ljubljanskega barja imajo višje $\delta^{18}\text{O}$ vrednosti, medtem ko imajo globlji vodnjaki nižje. Izotopske vrednosti podzemne vode se ujemajo z dolgoročnim uteženim povprečjem lokalnih padavin, kar kaže na napajanje z recentnimi padavinami in podobno sestavo površinskim vodam. Prejšnje študije (Urbanc in Jamnik, 1998; Vrzel et al., 2018) so ocenile prispevke lokalnih padavin in Save v podzemno vodo, kar je bilo v tej študiji ponovno dokazano (preglednica 1).

V vodarnah Kleče se je prispevek Save povečal, najbolj v vodnjakih VD Kleče 8a (38 %) in VD Kleče 11 (33 %). Manjše povečanje je opazno v vodarni Hrastje v vodnjaku VD Hrastje 1a, medtem ko se je pri Hrastje 3 prispevek znatno povečal (47 %). Nasprotno pa se je prispevek površinske vode zmanjšal v vodnjaku VD Šentvid 2a (-10 %) in VD Jarški prod 3 (-18 %), pri VD Jarški prod 1 pa ni bilo sprememb. Ugotovljen vzorec se sklada z ugotovitvami, da Sava napaja severozahodni in odvaja vzhodni del Ljubljanskega polja (Janža, 2015).

Izotopska podobnost med podzemno vodo v vodarni Brest in reko Iško poudarja pomen infiltracije površinske vode iz rečne struge za napajanje plitvih vodonosnikov (Pezdič, 1998; Urbanc in Jamnik, 2002). Bolj pozitiven izotopski signal v plitvih vodnjakih, v primerjavi z reko Iško, pa nakazuje, da padavine bolj prispevajo k napajanju podzemne vode. Najbolj pozitivne vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ vode so bile zabeležene pozimi v vodnjaku VD Brest 8, kar odraža vpliv površinske vode in padavin v toplejših mesecih. Najbolj negativne $\delta^{18}\text{O}$ vrednosti so bile opažene v globokih vodnjakih VD Brest 2a in VD Brest 4a z malo časovne spremenljivosti.

Pomanjkanje dolgoročnih podatkov in raziskav globokih vodnjakov omejuje neposredne primerjave s preteklimi ugotovitvami za območje napajanja vodonosnika Ljubljanskega barja.

Preglednica 1– Ocena prispevkov (%) površinske vode v primerjavi z lokalni padavin k posameznemu vodnjaku v obdobju 2020-2021 v primerjavi z ugotovitvami preteklih raziskav (Urbanc in Jamnik, 1998; Vrzel et al., 2018).

Vodnjak	Delež Save 2020-2021	Raziskava Vrzel et al., 2018	Raziskava Urbanc in Jamnik, 1998
K-8a	93		55
K-11	52	13	19
K-14	72		67
K-15	75		65
H-1a	52		48
H-3	61	14	
Jp-1	100	86	100
Jp-3	63	48	81
Š-2a	51		61
B-4	62		
B-8	41		

Vplivi na upravljanje z vodami

Raziskave na območju Ljubljanske kotline so pokazale temperaturna odstopanja v obdobju 2020–2021, kar je v skladu s podnebnimi napovedmi (Dolinar 2018). Spremembe padavin so vplivale na samo izotopsko sestavo, medtem ko so površinske vode odražale spremembe v pretokih in vplivu napajanja iz širšega napajalnega zaledja. Ugotovljeno je bilo, da reka Sava in lokalne padavine prispevajo k napajanju podzemnih voda na Ljubljanskem polju, medtem ko so padavine bolj pomembne za napajanje podzemne vode na območju holocenskega (zgornjega) vodonosnika Ljubljanskega barja. Ugotovitve potrjujejo zapleteno dinamiko med lokalnimi padavinami, površinsko ter podzemno vodo.

Razumevanje teh dinamik je ključno za trajnostno upravljanje z vodami, zlasti v urbanih območjih, kjer spremembe rabe zemljišč vplivajo na napajanje podzemne vode in na kakovost vode. Nekatera onesnaževala, kot so atrazin in šestvalentni krom so prisotna v vodonosnikih že vrsto desetletij (Urbanc et al., 2010; Janža, 2022). Ti rezultati so pomembni za nacionalno strateško načrtovanje (npr. gradnja novih vodnjakov ter jezov), še posebej ob upoštevanju vplivov podnebnih sprememb na vodne vire (Papadimitriou et al., 2016; Cegnar et al., 2021).

Zaključek

Izotopske raziskave na območju vodonosnikov Ljubljanskega polja in Ljubljanskega barja potrjujejo vpliv podnebnih sprememb na vodne vire, zlasti na interakcije med padavinami, površinskimi vodami in podzemnimi vodami. Povišane temperature in spreminjajoči vzorci padavin vplivajo na izotopsko sestavo, medtem ko stabilni izotopi v podzemnih vodah kažejo minimalne sezonske spremembe. Reka Sava in padavine prispevajo k napajanju podzemnih voda na območju Ljubljanskega polja, vendar je njihov vpliv različen med posameznimi vodnjaki. V vodonosniku Ljubljanskega barja padavine pomembno vplivajo na napajanje podzemnih voda v holocenskem in zgornjem pleistocenskem vodonosniku.

Upravljanje z vodami mora upoštevati ugotovljene in predvidene podnebne spremembe, zlasti v mestnih območjih, kjer se povečuje potreba po vodi. Raznolikost vodnih virov, skupaj z upravljanjem napajanja vodonosnikov lahko pripomore k trajnostni oskrbi s pitno

vodo. V primeru vodonosnika Ljubljanskega polja je izrednega pomena tudi ustrezno upravljanje in varovanje površinskih voda (predvsem reke Save), ki predstavlja pomembno napajalno komponento podzemne vode.

Stabilni izotopi so ključni za razumevanje dinamik vodnih sistemov in so koristno orodje za upravljalce vodnih virov saj pomagajo pri razumevanju trenutnega stanja oskrbe z vodo ter ranljivosti sistema, s čimer prispevajo k njegovemu učinkovitejšemu upravljanju in trajnostni oskrbi prebivalcev Ljubljane v prihodnosti.

Zahvala

Podatki so bili pridobljeni v okviru različnih projektov: nacionalnega raziskovalnega programa (P1-0143) in programa mladi raziskovalec (PR-09780) Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, IAEA: CRP (F33024, št. 22843) in RER-7013, ter COST akcije CA19120: WATer isotopeS in the critical zONe: od polnjenja podzemnih voda do transpiracije rastlin (WATSON) STSM štipendija št. (CA19120-28497843). Zahvaljujemo se M. Žitnik za pomoč pri vzorčenju ter S. Žigonu za pomoč pri opravljanju izotopskih analiz.

Literatura

- ARSO. (2022). Arhiv meritev (meteo.si). Dostopna na: <http://www.meteo.si/met/sl/archive/> (Pridobljeno 8. 10. 2022)
- Abbass, K., Qasim, M.Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 42539-42559. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>
- Avak, H., Brand, W.A. (1995). The Finning MAT HDO-Equilibration - A fully automated H₂O/gas phase equilibration system for hydrogen and oxygen isotope analyses. Thermo Electronic Corporation. Application News, 1–13.
- Bertalanič, R., Dolinar, M., Honzak, L., Lokošek, N., Medved, A., Vertačnik, G., & Vlahović, Ž. (2019). Climate change projections for Slovenia over the 21st century. Temperature and precipitation summary (Vol. 2019). Ljubljana, Slovenia: Ministry of the Environment and Spatial Planning, Slovenian Environment Agency.
- Bračič Železnik, B., & Jamnik, B. (2005). "Javna oskrba s pitno vodo," in I. Rejec Brancelj, A. Smrekar, & D. Kladnik (Eds.), *Podtalnica Ljubljanskega polja (in Slovene)* (pp. 101–120). Založba ZRC, Ljubljana.
- Bračič Železnik, B., Pintar, M., & Urbanc, J. (2005). "Naravne razmere vodonosnika," in I. Rejec Brancelj, A. Smrekar, & D. Kladnik (Eds.), *Podtalnica Ljubljanskega polja (in Slovene)* (pp. 101–120). Založba ZRC, Ljubljana.
- Bračič Železnik, B. (2016). *Dinamika podzemne vode sistemov vodonosnikov Iškega vršaja (The groundwater dynamics of the aquifer system at Iška fan)*. Unpublished Master's Thesis, Univerza v Ljubljani, FGG, 58 p. (in Slovenian).
- Brand, W. A., & Coplen, T. B. (2012). Stable isotope deltas: tiny, yet robust signatures in nature. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 48(3), 393–409. <https://doi.org/10.1080/10256016.2012.666977>
- Buras, A., Rammig, A., & Zang, C.S. (2020). Quantifying impacts of the 2018 drought on European ecosystems in comparison to 2003. *Biogeosciences*, 17, 1655–1672. <https://doi.org/10.5194/bg-17-1655-2020>
- Caretta, M.A., Mukherji, A., 2022. Water, in: Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegria, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller,

- V., Okem, A., Rama, B. (Eds.), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 551–712.
- Cegnar, T., Vlahović, Ž., Agencija RS za okolje (2021). *Temperatura | Okoljski kazalci*. <http://kazalci.arso.gov.si/sl/content/temperatura-0> (18.12.2022).
- 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, 948394. <https://doi.org/10.1155/2013/948394>
- Coplen, T.B., Wildman, J.D.; Chen, J. (1991). Improvements in the gaseous hydrogen-water equilibration technique for hydrogen isotope-ratio analysis. *Anal. Chem.*, 63, 910–912, <https://doi:10.1021/ac00009a014>
- Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702–1703.
- Crawford, J., Hughes, C. E., & Lykoudis, S. (2014). Alternative least squares methods for determining the meteoric water line, demonstrated using GNIP data. *Journal of Hydrology*, 519, 2331–2340.
- Dolinar, M. (2018). *Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja: sintezno poročilo*. Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana.
- Epstein, S.; Mayeda, T. (1953). Variation of O18 content of waters from natural sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 4, 213–224.
- Gat, J.R., Shemesh, A., Tziperman, E., Hecht, A., Georgopoulos, D., Basturk, O. (1996). The stable isotope composition of waters of the eastern Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research*, 101, 6441–6451.
- Jamnik, B., Železnik, B.B., & Urbanc, J. (2003). Diffuse pollution of water protection zones in Ljubljana, Slovenia. *Proceedings of the 7th International Conference "Diffuse Pollution and Basin Management"*, Dublin, 7-1–7-5.
- Janža, M., Prestor, J., Urbanc, J., & Jamnik, B. (2005). TCE contamination plume spreading in a highly productive aquifer of Ljubljansko polje. *Geophysical Research Abstracts*, 7, 09178. European Geosciences Union.
- 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. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3662-2>
- Janža, M. (2022). Optimization of well field management to mitigate groundwater contamination using a simulation model and evolutionary algorithm. *Science of the Total Environment*, 807, 150811. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150811>
- Kern, Z., Hatvani, I.G., Czuppon, G., Fórizs, I., Erdélyi, D., Kanduč, T., Palesu, L., Vreča, P. (2020). Isotopic ‘Altitude’ and ‘Continental’ Effects in Modern Precipitation across the Adriatic–Pannonian Region. *Water*, 12, 1797. <https://doi.org/10.3390/w12061797>
- Kuhlemann, L.M., Tetzlaff, D., & Soulsby, C. (2021). Spatio-temporal variations in stable isotopes in peri-urban catchments: A preliminary assessment of potential and challenges in assessing streamflow sources. *Journal of Hydrology*, 600, 126685. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126685>
- Małoszewski, P., Rauert, W., Stichler, W., & Herrmann, A. (1983). Application of flow models in an alpine catchment area using tritium and deuterium data. *Journal of Hydrology*, 66(1), 319–330. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90193-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90193-2)
- McGrane, S.J. (2016). Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review. *Hydrological Sciences Journal*, 61, 2295–2311. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1128084>
- McGuire, K.J., McDonnell, J.J. (2006). A review and evaluation of catchment transit time modeling. *Journal of Hydrology*, 330(3–4), 543–563. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.04.020>
- Mencej, Z. (1988). The gravel fill beneath the lacustrine sediments of the Ljubljansko Barje. *Geologija* 31, 517–553.
- Nagode, K., Kanduč, T., Lojen, S., Železnik, B.B., Jamnik, B., & Vreča, P. (2020). Synthesis of past isotope hydrology investigations in the area of Ljubljana, Slovenia. *Geologija*, 63, 251–270. <https://doi.org/10.5474/geologija.2020.019>

- Nagode, K., Kanduč, T., Zuliani, T., Bračič Železnik, B., Jamnik, B., & Vreča, P. (2021). Daily fluctuations in the isotope and elemental composition of tap water in Ljubljana, Slovenia. *Water*, 13, 1451. <https://doi.org/10.3390/w13111451>
- Nagode, K., Pavšek, A., Pavlič, U., & Vreča, P. (2022). Izotopska sestava padavin in reke Save na območju Ljubljanskega polja med leti 2020 in 2021. In: *Raziskave s področja geodezije in geofizike 2021: Zbornik del: 27. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko*, Ljubljana, 27. januar 2022. Elektronska izd. Ljubljana: Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko, pp. 65–77. ISBN 978-961-95299-2-8.
- Ogrin, D., Repe, B., Štaut, L., Svetlin, D., & Ogrin, M. (2023). Podnebna tipizacija Slovenije po podatkih za obdobje 1991–2020. *Dela*, 59, 5–89. <https://doi.org/10.4312/dela.59.5-89>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.010>
- Ortega, L., Miller, J., Araguás-Araguás, L., Zabala, M.E., Vives, L., Mira, A., Rodríguez, L., Heredia, J., Armengol, S., Manzano, M. (2022). Unravelling groundwater and surface water sources in the Esteros del Iberá Wetland Area: An isotopic approach. *Science of the Total Environment*, 846, 157475. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157475>
- Papadimitriou, L.V., Koutroulis, A.G., Grillakis, M.G., & Tsanis, I.K. (2016). High-end climate change impact on European runoff and low flows – exploring the effects of forcing biases. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 1785–1808. <https://doi.org/10.5194/hess-20-1785-2016>
- Petan, S., & Koprivšek, M. (2024). Analiza regionalne vodnatosti rek v Sloveniji. *Acta Hydrotechnica*, 37(66), Ljubljana. <https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2024.04>
- Pezdič, J. (1999). Izotopi in geokemijski procesi. Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, 269 pp.
- Sánchez-Murillo, R., Esquivel-Hernández, G., Birkel, C., Ortega, L., Sánchez-Guerrero, M., Rojas-Jiménez, L.D., Vargas-Viquez, J., & Castro-Chacón, L. (2020). From mountains to cities: a novel isotope hydrological assessment of a tropical water distribution system. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 56, 606–623. <https://doi.org/10.1080/10256016.2020.1809390>
- SLONIP, Jožef Stefan Institute. SLONIP: Slovenian Network of Isotopes in Precipitation. <https://slonip.ijs.si/>
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019. World urbanization prospects: the 2018 revision.
- Urbanc, J., & Jamnik, B. (1998). Isotope investigations of groundwater from Ljubljansko polje (in Slovenia). *Geologija*, 41, 355–364. <https://doi.org/10.5474/geologija.1998.018>
- Urbanc, J., & Jamnik, B. (2002). Isotopic investigations of the Ljubljansko barje water resources. *Geologija*, 45, 589–594. <https://doi.org/10.5474/geologija.2002.070>
- Urbanc, J., Mali, N., Mezga, K., Cerar, S., Bizjak, M., Medić, M., Kranjc, M., Jankovič, M., Čermelj, S., Jamnik, B., Auersperger, P., Bračič Železnik, B. (2010). Groundwater chemical status Ljubljansko polje and Ljubljansko Barje aquifers. Geological Survey of Slovenia, Ljubljana, Slovenia.
- Vreča, P., Bronić, I.K., Horvatinčić, N., Barešić, J. (2006). Isotopic characteristics of precipitation in Slovenia and Croatia: Comparison of continental and maritime stations. *Journal of Hydrology*, 330, 457–469. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.04.005>
- 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.
- Wang, X., Zhang, J., Shahid, S., Guan, E., Wu, Y., Gao, J., & He, R. (2016). Adaptation to climate change impacts on water demand. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 21, 81–99. <https://doi.org/10.1007/s11027-014-9571-6>
- Žagar, K., Žitnik, M., Žigon, S., Bračič Železnik, B., Jamnik, B., Pavlič, U., & Vreča, P. (2022a). Isotopic characterisation of groundwater at Ljubljansko polje and Ljubljansko barje, Slovenia, during 2020-2021 sampling campaign. *Pangaea*.

- Žagar, K., Žitnik, M., Žigon, S., Bračič Železnik, B., Jamnik, B., Pavlič, U., & Vreča, P. (2022b). Isotopic characterisation of the Sava and Iška Rivers at Ljubljansko polje and Ljubljansko barje, Slovenia, during 2020-2021 sampling campaign. *Pangaea*.
- Žagar, K., Ortega, L., Pavlič, U., Jamnik, B., Bračič Železnik, B., & Vreča, P. (2024). Unravelling the sources contributing to the urban water supply: An isotope perspective from Ljubljana, Slovenia. *Journal of Hydrology*, 632, 130892. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130892>
- Žlebnik, L. (1971). Pleistocen Kranjskega, Sorskega in Ljubljanskega polja. *Geologija*, 14, 5–51.