

Hidrogeokemične in izotopske raziskave podmorskih in kopenskih izvirov pri Izoli

Kaja Šušmelj*, Petra Žvab Rožič*, Polona Vreča**, Tjaša Kanduč**, Timotej Verbovšek*, Klara Nagode**, Tea Zuliani**, Barbara Čenčur Curk*, Boštjan Rožič*, Branko Čermelj***

Povzetek

Nedaleč od obale Izole se pod morjem nahaja dvanajst podmorskih kotanj, poimenovane tudi kot Žumrove kotanje, iz katerih prihaja voda. Da bi razširili razumevanje Žumrovih kotanj oziroma izvirov v njih, smo na podlagi fizikalno-kemijskih parametrov in rezultatov geokemičnih ter izotopskih analiz bolje opredelili njihove značilnosti, ki so osnova za razumevanje dinamike in izvora podmorskih in kopenskih izvirov na območju Izole. Meritve smo izvedli v letih 2020 in 2021 v štirih podmorskih in štirih kopenskih izviri ter eni vrtini v Izoli. Rezultati fizikalno-kemijskih parametrov, geokemičnih in izotopskih analiz vzorcev podmorskih izvirov v kotanjah in enega kopenskega izvira kažejo značilnosti sladke vode, obogatene z žveplom, in nekoliko povišano temperaturo, ki pa se na iztoku takoj zmeša z morsko vodo in je tako pri vzorčenju prišlo do mešanja obeh. Analize so pokazale, da je izvor vode iz karbonatnih kamnin, obogatitev z žveplom pa je verjetno povezana z redukcijo anaerobnih bakterij.

Ključne besede: Žumrove kotanje, podmorski kraški izviri, hidrogeokemija, izotopi

Keywords: Žumer depressions, submarine karstic springs, hydrogeochemistry, isotopes

Uvod

Podmorski izviri so vzdolž kraške obale Sredozemlja pogosti in zanje je značilna sladka ali brakična voda, saj so to potopljeni kraški izviri, znani tudi kot brojnice ali vrulje (Gams, 2004). Slanost v njih se običajno spreminja glede na količino padavin in stanje podzemne vode v napajalnem zaledju izvirov. Nekateri podmorski izviri so sezonski in aktivni samo v obdobjih visokega vodostaja (Fleury idr., 2007). Karbonatni priobalni vodonosniki v Sredozemlju so bili od konca miocena dalje pogosto podvrženi nihanju gladine morske vode (Fleury idr., 2007), kar omogoča zakrasevanje. V Sredozemlju je v primerjavi s koncentracijo drugod po svetu sicer veliko več podmorskih izvirov (Bakalowicz, 2018). Najverjetneje je na nastanek vplival mesinski dogodek, ko se je zaprla Gibraltarska ožina zaradi premikanja Afriške plošče proti severu in je bil dotok sladke vode manjši od evaporacije. Gladina morja je bila 1500 do 2500 m nižja od današnje in v karbonatnih kamninah se je razvil globoki kras ter z njim izviri, ki so bili ob koncu mesinskega dogodka s ponovnim odprtjem ožine poplavljeni (Bakalowicz, 2018).

Podmorski izviri pri Izoli se razlikujejo od običajnih brojnic, saj imajo močan vonj po žveplu, v preteklosti pa so poročali tudi o izrazito povišani temperaturi izvirske vode. Podmorske izvire pri Izoli je prvič podrobneje opisal Jože Žumer (2004, 2008) in po njem so danes ti izviri oz. podmorske kotanje tudi poimenovane (Žumrove kotanje). Takrat je naštel osem kotanj z izviri, kasneje pa so jih z detajlnejšimi raziskavami odkrili še več (Slavec, 2012). Žumer je podrobneje opisal izvira Ronek 32 (v tem prispevku M11) in Izola

* UL, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana

** Odsek za znanosti o okolju, Institut "Jožef Stefan", Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana

*** Nacionalni inštitut za biologijo - Morska biološka postaja Piran, Fornace 41, 6330 Piran

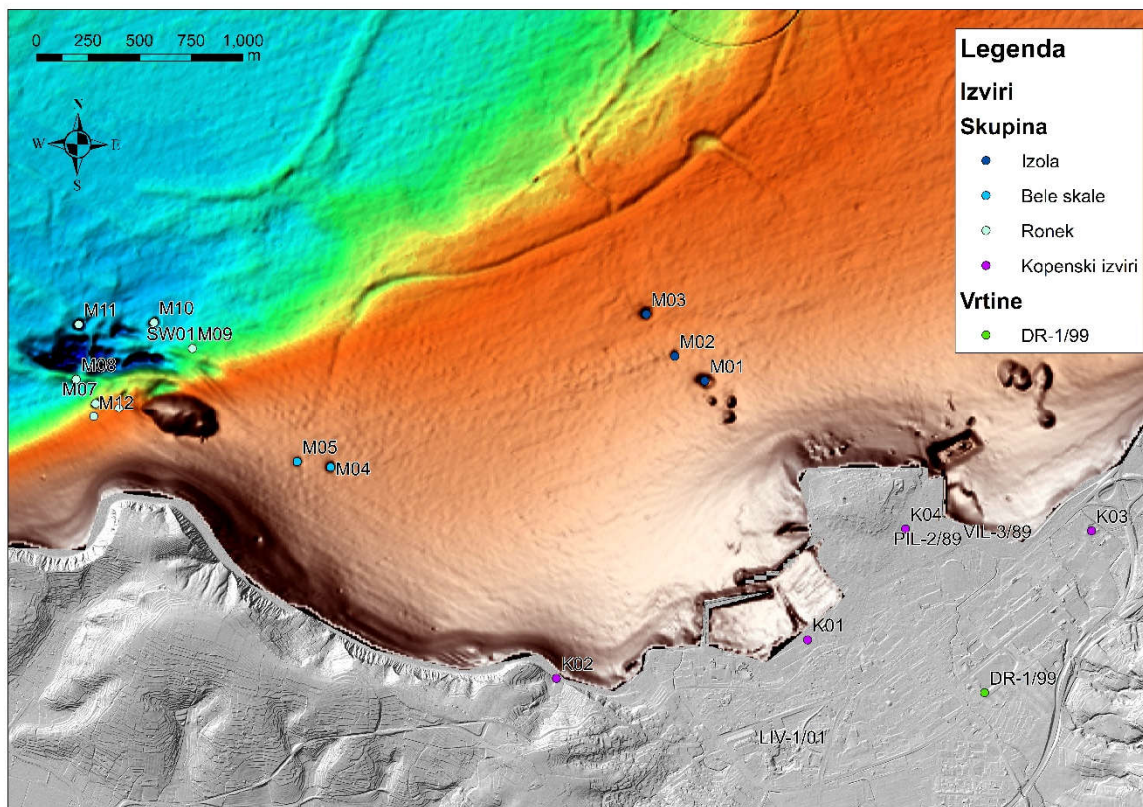
32 (v tem prispevku M03). Faganeli s sodelavci (2005) je opisal nekaj geokemijskih lastnosti izvira M03 (Izola 32). Takrat so mu izmerili slanost 5,5 ‰, voda naj bi imela visoko vsebnost H₂S, namerjene temperature pa so segale do 29,6 °C (Faganeli idr., 2005). Žveplena in toplejša voda je bila na območju Izole poznana že v 17. stoletju, ko je zdravilno vodo omenil škof Tomasini, prve analize pa so opravili v 19. stoletju. Izvir v breznu pri Sv. Petru, ki je bil takrat v medplimskem pasu, naj bi imel 21 °C in visoke vsebnosti amonijaka, žvepla, magnezija, nitrata, bakra in klorida. Še v istem stoletju so začeli vodo iz tega izvira izkoriščati v Izolskih termah (Kramar, 2003). Danes te termalne vode ne izkoriščajo, brezno pri Sv. Petru in Izolansko brezno pa sta zasuti in zazidani na območju nekdanje tovarne Delamaris. Na žvepleno termalno vodo so naleteli tudi v globoki vrtini LIV-1/01 (501 m) v Izoli, ki je bila zvrtna za hidrogeološke raziskave vodonosnika termalne vode in morebitnega zajema vode za nadaljnjo uporabo (Benedik in Rožič, 2002). V njej se mešata spodnja visokomineralizirana Na-Cl voda in pripovršinska Ca-Mg-HCO₃ voda (Lapanje, 2006), ista vrtina je v tem viru zabeležena kot LIV-1/02 (500 m). V vrtini v Luciji pri Portorožu (801 m) so ugotovili visoke koncentracije železa, sulfida in klorida, ki so posledica mešanja morske (31%) in podzemne (69%) vode pod vplivom redukcijskih pogojev v hidrodinamsko zaprtem karbonatnem vodonosniku (Brenčič, 2009).

Namen raziskave je poglobiti poznavanje Žumrovih kotanj in na podlagi fizikalno-kemijskih parametrov in rezultatov geokemičnih ter izotopskih analiz dodatno potrditi obstoj žveplene termalne izvirske vode, razložiti njen izvor ter značilnosti in dinamiko podmorskih izvirov. Zaradi pojavljanja termalne vode na kopnem in za primerjavo s podmorskimi izviri smo poleg Žumrovih kotanj v raziskavo vključili tudi štiri kopenske izvire in eno vrtino v Izoli.

Opis območja raziskav

Blizu Izole, približno 400-1000 m stran od obale, se na morskem dnu nahaja dvanajst lijakastih kotanj, v katerih izvira voda. Kotanje so glede na lokacijo razdeljene v tri skupine. V skupini Izola, ki je najbližje staremu mestnemu jedru, se nahajajo tri kotanje (M01, M02, M03), v skupini Bele skale, nedaleč od plaže Bele skale, sta dve kotanji (M04, M05), najbolj zahodno pri rtiču Ronek pa se nahaja sedem kotanj (M06, M07, M08, M09, M10, M11, M12) skupine Ronek (Slavec, 2012; Žumer, 2004, 2008). Kotanje lijakaste oblike se nahajajo na območju, kjer je dno morja na približno 20 m globine, največje kotanje pa segajo še globlje in dosegajo do 32 m globine. Kotanja M03 (Izola 32) ima na vrhu približno 20 m premera, na dnu pa je široka okoli 2 m (Žumer, 2008). V raziskavo smo za primerjavo vključili tudi štiri kopenske izvire (K01, K02, K03, K04) in vrtino (VK01 oz. DR 1/99) v Izoli (slika 1). Na sliki 1 so prikazane tudi druge vrtine v Izoli, ki v to raziskavo niso vključene zaradi težav z dostopom.

V mezozoiku in začetku kenozoika je bilo območje slovenske obale del Jadransko-Dinarske karbonatne platforme, kjer so v plitvem morju nastajale karbonatne kamnine. V paleogenu je platforma razpadla, območje se je poglobilo, nastajale so flišne kamnine (Šmuc idr., 2019). Danes je ta prostor del Istrsko-Furlanske cone poddrivanja, ki je nastala kot posledica segmentacije Jadranske litosferne mikroplošče v miocenu ali pozneje (Placer idr., 2010). Osrednji element Istrsko-Furlanske cone poddrivanja je Črnokalski oz. Palmanovski narivni prelom, njegov sekundarni element pa je Strunjanska struktura, znotraj katere je več deformacij, med drugim tudi Izolska antiklinala, kjer alveolinsko-numulitni apnenci izdajajo izpod fliša (Placer, 2005; Pleničar idr., 1973). V apnencih izolske antiklinalne, ki se nadaljuje v morje, se nahajajo raziskovani podmorski izviri (Vrabec idr., 2013).



Slika 1 - Lokacije podmorskih in kopenskih izvirov ter vrtine

Vzorčenje, meritve in analize

Podrobnejše raziskave izvirov na območju Izole smo izvedli v letih 2020 in 2021 v treh sklopih, prvi je potekal junija in julija 2020, drugi oktobra 2020, zadnji pa aprila 2021. Potapljači so ob vsakem sklopu vzorčenja vzeli vzorce vode v treh kotanjah, po en vzorec iz vsake skupine izvirov (M03 - Izola, M05 - Bele skale, M10 in M11 - Ronnek) (Preglednica 1). Vzorce so odvzeli s 100 ml brizgami, ki so jih namerili v izvir na morskem dnu. Uhajanje izvirske vode je vidno zaradi razlike v gostoti med bolj sladko izvirsko vodo in slano morskó vodo. V zadnjem sklopu smo odvzeli vzorce tudi z 8-litrskim vzorčevalnikom Niskin (vzorci označeni s črko N), pri čemer smo predpostavljali, da bo izvirská vóda ob spustu vzorčevalnika v kotanjo izpodrnila morskó.

Takoj, ko so potapljači prinesli vzorce na krov ladje, smo vodi izmerili temperaturo (T), pH, specifično elektroprevodnost (EC), skupno količino raztopljenih snovi (TDS), redukcijsko-oksidiacijski potencial (ORP) in vsebnost kisika v mg/l in %. Sočasno smo po isti metodologiji izvedli tudi raziskave štirih kopenskih izvirov (K01, K02, K03, K04) ter kopenske vrtine (VK01) in odvzeli vzorce morske vode (SW01, SW02, SW03) (Preglednica 1). Vzorce smo nato pripravili za nadaljnje geokemične in izotopske analize, ki so predstavljene v preglednici 2 in podrobneje opisane v Žvab Rožič idr. (2021).

Preglednica 1 - Datum vzorčenja, oznake, skupine in lokacije vzorcev

Datum	Oznaka	Skupina	LAT	LONG
8. 10. 2020, 16. 4. 2021	M03, M03/B, M03/N	Izola	45,54853	13,64594
9. 7. 2020, 8. 10. 2020, 23. 4. 2021	M05, M05, M05/B, M05/N	Bele skale	45,54181	13,62447
15. 6. 2020	M10	Ronek	45,54781	13,61543
9. 7. 2020, 23. 4. 2021	M11, M11/B, M11/N	Ronek	45,54767	13,61077
17. 6. 2020, 14. 4. 2021	K01	Kopenski izvir	45,53444	13,65628
17. 6. 2020, 14. 4. 2021	K02	Kopenski izvir	45,53258	13,64075
17. 6. 2020, 14. 4. 2021	K03	Kopenski izvir	45,53939	13,67375
17. 6. 2020, 8. 10. 2020, 14. 4. 2021	K04	Kopenski žvepleni izvir	45,53933	13,66222
17. 6. 2020	SW01	Morje	45,54781	13,61543
8. 10. 2020	SW02	Morje	45,54181	13,62447
16. 4. 2021	SW03	Morje	45,54905	13,63484
8. 10. 2020, 16. 4. 2021	VK01	Vrtina	45,53226	13,66731

Preglednica 2: Opravljene geokemične in izotopske analize

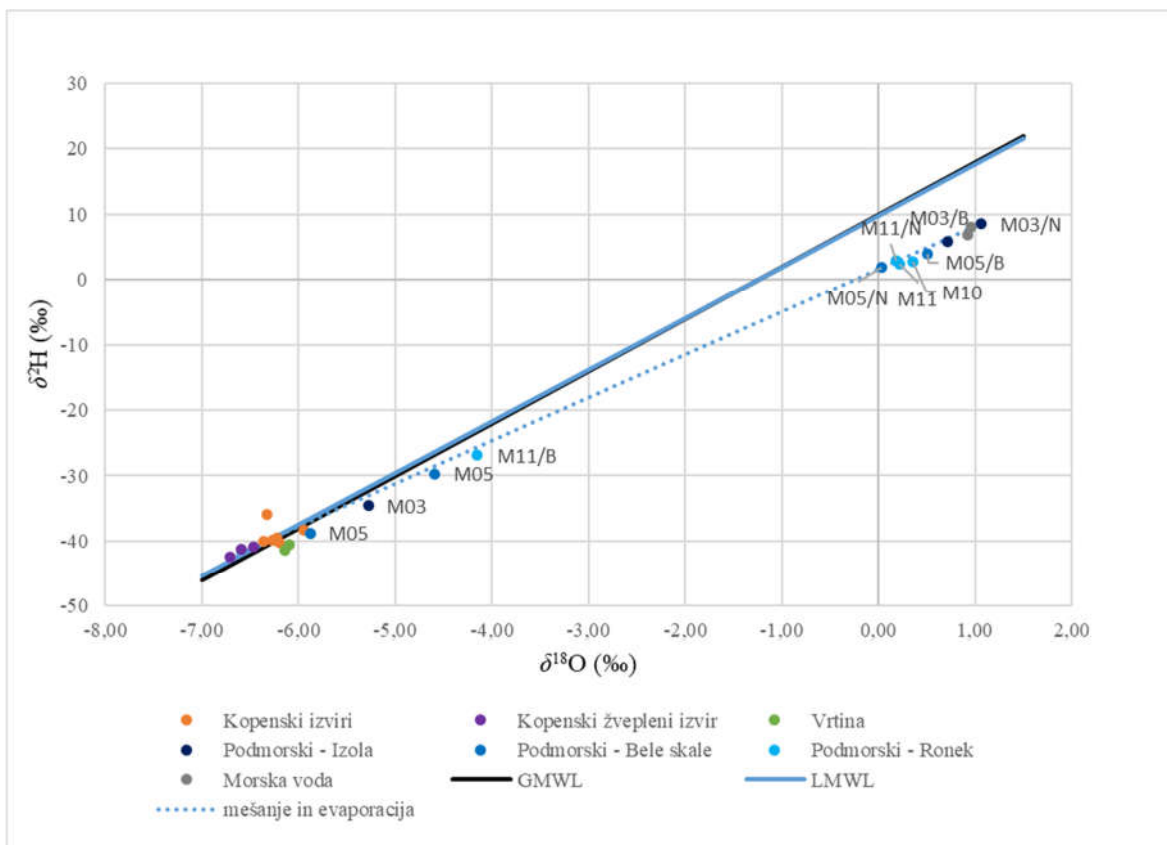
Parameter	Enota	Št. vzorcev	Metoda	Laboratorij
Na, Li, Be, Mg, Al, Si, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Hg, Ta, W, Tl, Pb, Bi, Th, U	µg/L	25	ICP-MS Perkin Elmer Sciex ELAN 9000 ICP/MS, Perkin Elmer Nexion, Thermo icapQ or Agilent 7700, opis metode dostopen na https://actlabs.com/geochemistry/tools-for-buried-deposit-targets/hydrogeochemistry/	ActLabs, Kanada
F, Cl, NO ₂ (kot N), Br, NO ₃ (kot N), PO ₄ (kot P), SO ₄	mg/L	25	Ionska kromatografija z uporabo DIONEX DX-120 Ion Chromatography System, opis metode dostopen na https://actlabs.com/geochemistry/tools-for-buried-deposit-targets/hydrogeochemistry/	ActLabs, Kanada
δ ¹⁸ O in δ ² H	‰	25	Masni spektrometer Finnigan MAT DELTA plus z dvojnimi uvajalnimi sistemom in avtomatskim H ₂ -H ₂ O in CO ₂ -H ₂ O ekvilibratorjem HDOeq48 - postopek uravnoteženja H ₂ -H ₂ O (Coplen et al.,	Institut "Jožef Stefan", Slovenija

Parameter	Enota	Št. vzorcev	Metoda	Laboratorij
			1991) in CO ₂ -H ₂ O (Avak in Brand, 1995; Epstein in Mayeda, 1953)	
$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (‰)	‰	25	Masni spektrometer s kontinuirnim pretokom Europa-Scientific 20-20 in TG preparacijskim modulom (Spötl, 2005, Kanduč, 2006)	Institut "Jožef Stefan", Slovenija
totalna alkalnost (TA)	mM	25	Granova titracija (Gieskes, 1974)	Institut "Jožef Stefan", Slovenija
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	-	25	Multikolektorski ICP-MS Nu II, Nu Plasma, Ametek	Institut "Jožef Stefan", Slovenija
^3H	TU	17	LSC-GCT Parkin Elmer, selektivna izotopska obogatitev z uporabo elektrolize (Gröning and Rozanski, 2003, Plastino et al., 2007, Villa and Mannjón, 2004), standard IRP (FS-78-15-AKU:1995) in standard MSZ 19387:1987	Wessling, Madžarska
$\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ in $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$	‰	6	CF-IRMS ThermoQuest Finnigan Delta PlusXL in CF-IRMS Thermo Electron Delta V, opis metode dostopen na https://www.geo.arizona.edu/node/153	University of Arizona, ZDA

Rezultati in razprava

Rezultati meritev fizikalno-kemijskih parametrov, predvsem specifična elektroprevodnost (EC) in skupna količina raztopljenih snovi (TDS), nakazujejo na mešanje morske in sladke vode v podmorskih izviroh (EC: 16,900–58,500 mS/cm), prav tako prihaja do mešanja z morskovo vodo tudi v kopenskem izviru K04 (EC: 3,370–5,410 mS/cm), ki ima tako kot podmorski izviri močan vonj po žveplu. V vzorcih podmorskih izvirov so visoke koncentracije elementov in spojin, značilnih za morskovo vodo (Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} , K^+ , Sr^{2+} , Br^{2+} , SO_4^{2-}), višje vrednosti so tudi v kopenskem žvepljenem izviru (K04), kar potrjuje mešanje z morskovo vodo. Podmorskim izvirom smo izmerili podobne temperature (T: 12,9–23,6 °C) kot morski vodi (T: 12,4–21,2 °C). Morski vodi so podobne tudi temperature kopenskega žvepljenega izvira in vrtine, merjene v istih obdobjih (T: 16,8–19,9 °C), vendar so te v primerjavi s temperaturami ostalih kopenskih izvirov (T: 13,9–17,4 °C) nekoliko višje.

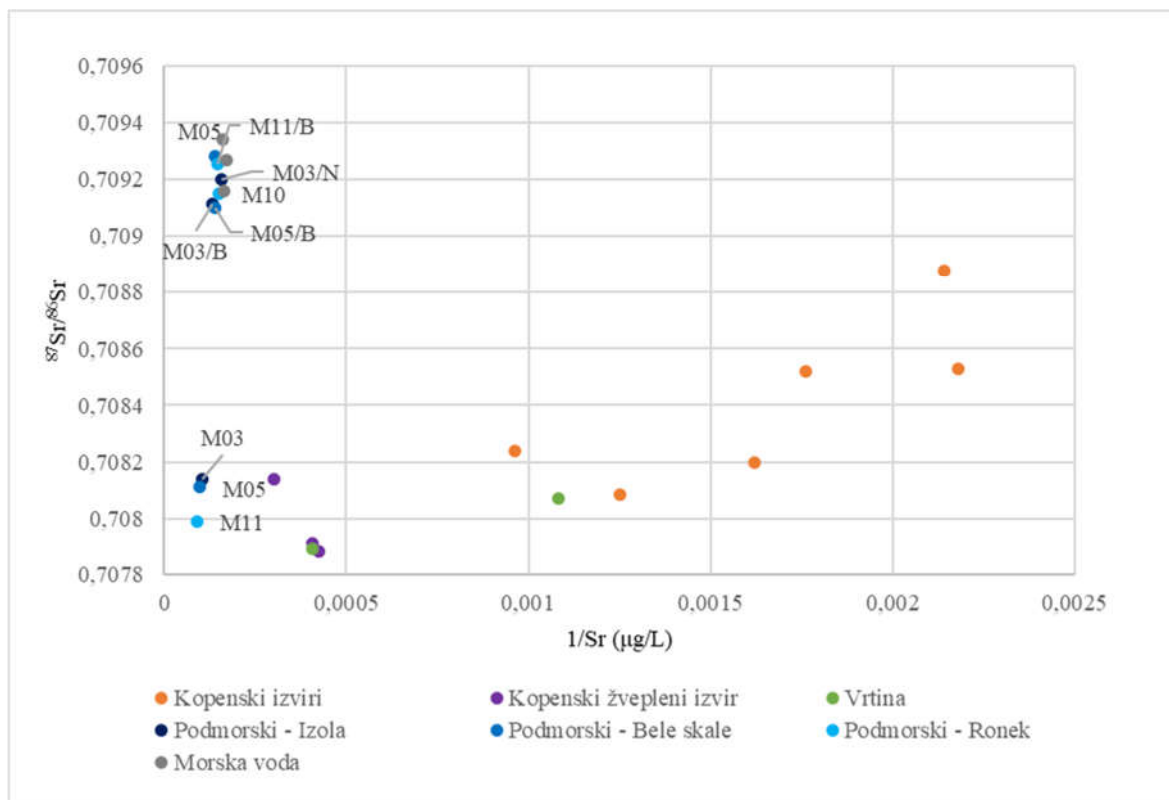
Rezultati izotopske sestave kisika ($\delta^{18}\text{O}$) in vodika ($\delta^2\text{H}$) kažejo na mešanje različnih tipov vod, poleg tega pa dajo tudi informacijo o izvoru vode. Značilne vrednosti morske vode so okoli 0 ‰ za $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ (Clark, 2015), kjer se giblje tudi večina vzorcev podmorskih izvirov, torej je voda teh vzorcev v veliki meri mešana z morskovo. Vrednosti vzorcev M03 (8. 10. 2020), M05 (9. 7. 2020), M05 (8. 10. 2020) in M11/B (23. 4. 2021), ki so na grafu pomaknjene proti kopenskim izvirom, pa kažejo na večji delež kopenskega izvira vode, kar dokazujejo nižje vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$. Ti vzorci postopoma odstopajo od globalne padavinske premice (Global Meteoric Water Line – GMWL, definirane kot $\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$; Craig, 1961) oziroma od lokalne padavinske premice (LMWL) utežene s količino padavin za letališče Portorož (LMWL(2011-2020) $\delta^2\text{H} = 7,87 * \delta^{18}\text{O} + 9,77$; Vreča, neobjavljeni podatki) in ležijo na premici, ki povezuje morske in kopenske vzorce ter nakazuje vpliv evaporacije in mešanja morske in kopenske vode (slika 2).



Slika 2 - Odvisnost med izotopsko sestavo vodika ($\delta^2\text{H}$) in kisika ($\delta^{18}\text{O}$) v raziskanih vzorcih vode

Vzorci, ki odstopajo proti kopenskim vrednostim, predstavljajo vse tri skupine izvirov: Izola (M03), Bele skale (M05) in Ronek (M11/B). Ti vzorci so bili odvzeti s 100 ml brizgami, vsi vzorci, odvzeti z Niskinom, pa kažejo vrednosti, značilne za morsko vodo. Ker imajo isti vzorci bolj sladkovodne oz. kopenske značilnosti tudi po drugih parametrih, sklepamo, da je odvzem z brizgami bolj uspešen pri zajemu izvirske vode kot odvzem z Niskinom, pri katerem smo zajeli več morske vode.

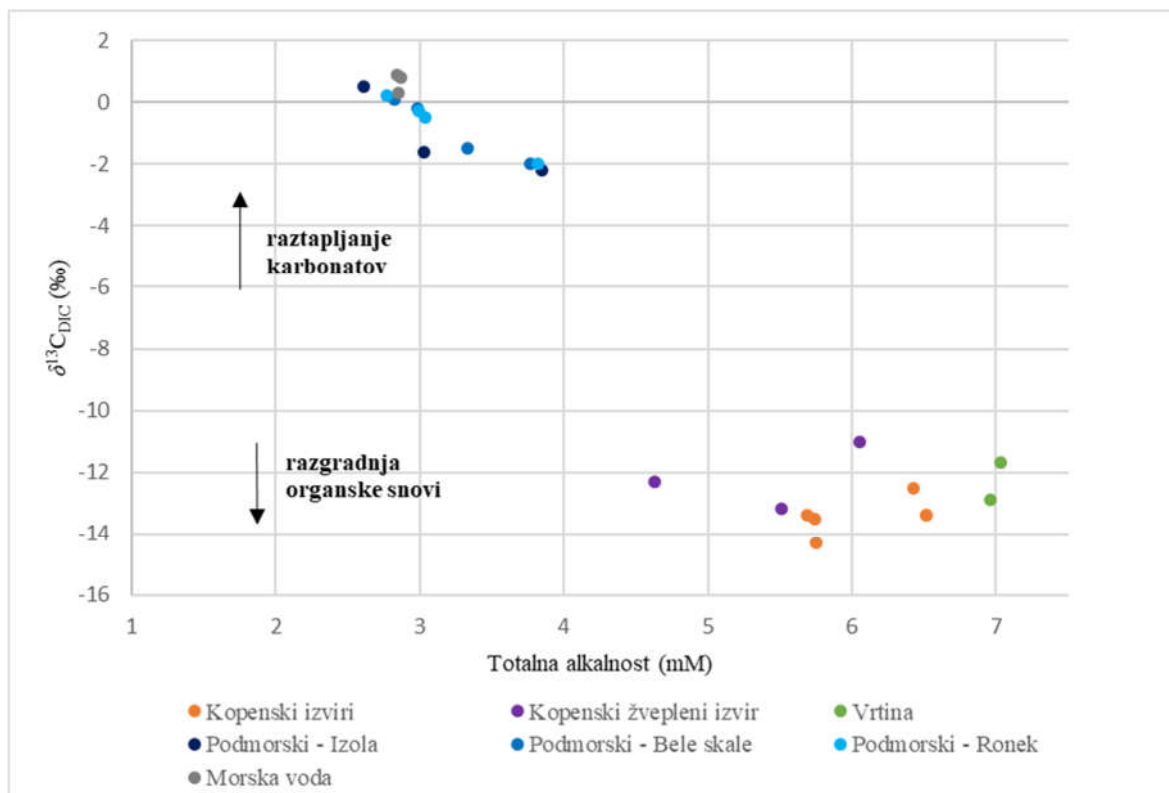
Koncentracije Sr v vodi so v kopenskih vzorcih nižje (Sr: 0,459–3,300 mg/l) kot v vzorcih morske vode in podmorskih izvirov (Sr: 5,830–11,100 mg/l). Da imajo kotanje dotok kopenske vode, dokazuje razmerje ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$). Vrednosti vzorcev M03, M05, M11/B ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{M03, M05, M11/B}}$: 0,70799–0,70814), podobno kot pri rezultatih $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$, odstopajo od vrednosti, ki so značilne za morsko vodo ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70917$), vzorcev morja in večine podmorskih izvirov. Bolj značilne so za kopensko okolje, čeprav imajo kopenski izviri in vrtina zelo razpršene vrednosti Sr (slika 3).



Slika 3 - Odvisnost med razmerjem $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in vrednostjo $1/\text{Sr}$

Vrednosti tritija (^3H) ločujejo vzorce na morske (0,6–2,12 TU) in kopenske (2,37–4,49 TU) z izjemo vrtine, kjer smo zajeli podzemno vodo, ta ima nižje vsebnosti (0,7 TU). Nobene vrednosti podmorskih izvirov niso značilne za kopno, najverjetneje zato, ker smo tritij merili v vzorcih podmorskih izvirov, v katerih smo zaznali večje mešanje z morskno vodo. Rezultati vrednosti ^3H tako ne vključujejo vzorcev M03, M05, M11/B, pri katerih se je pokazal kopenski izvir za vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ ter $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

Iz rezultatov izotopske sestave ogljika iz raztopljenega anorganskega ogljika ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) in totalne alkalnosti (TA) lahko opazimo dve skupini vzorcev: 1) morske vode in podmorskih izvirov z $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ od -2,2 do 0,9 ‰, kjer je izvir ogljika predvsem iz raztapljanja karbonatov in 2) kopenskih izvirov (žvepljenih in nežvepljenih) in podzemne vode iz vrtine, kjer je večji delež ogljika iz razgradnje organske snovi z $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ od -14,3 do -11,0 ‰ (slika 4).



Slika 4 - Odvisnost med $\delta^{13}\text{C}\text{-DIC}$ in totalno alkalnostjo (TA)

Vrednosti izotopske sestave žvepla ($\delta^{34}\text{S}$) in kisika ($\delta^{18}\text{O}$) v sulfatu so za večino vzorcev značilne za morsko vodo, ki ima tipične vrednosti $\delta^{34}\text{S}_{(\text{SO}_4^{2-}, \text{mor. v.})} = +21 \text{‰}$ in $\delta^{18}\text{O}_{(\text{SO}_4^{2-}, \text{mor. v.})} = +9,5 \text{‰}$. Vzorec K04 ima nekoliko nižje vrednosti ($\delta^{34}\text{S}_{(\text{SO}_4^{2-}, \text{K04})} = +20,3 \text{‰}$), vzorec M11/B, pri katerem je glede na druge parametre prisotna kopenska voda, pa višje ($\delta^{34}\text{S}_{(\text{SO}_4^{2-}, \text{M11/B})} = +23,6 \text{‰}$) od morskih. Njune vrednosti nakazujejo na možen izvor žvepla, povezan z redukcijo zaradi anaerobnih bakterij ($\delta^{34}\text{S}_{(\text{SO}_4^{2-})} > 20 \text{‰}$), vedeti pa moramo, da se značilne vrednosti za morsko vodo in značilne vrednosti žvepla, povezanega z redukcijo anaerobnih bakterij, v določenem predelu prekrivajo.

Zaključek

Na podlagi fizikalno-kemijskih meritev, geokemične in izotopske sestave vod smo podrobneje določili lastnosti raziskanih podmorskih in kopenskih izvirov pri Izoli. S pomočjo rezultatov raziskav smo lahko potrdili aktivnost podmorskih izvirov v Žumrovih kotanjah in njihov vsaj deloma kopenski izvor vode. Na podlagi specifične elektroprevodnosti (EC), skupne količine raztopljenih snovi (TDS) in koncentracij elementov in spojin, značilnih za morsko vodo, smo ugotovili, da je voda v nekaterih vzorcih podmorskih izvirov mešanica sladke in morske vode, do mešanja z morsko vodo prihaja tudi v kopenskem izviru K04. Izrazito povišanih temperatur nismo zaznali, kar je posledica mešanja s hladnejšo morskno vodo. Ugotovili smo, da so samo vzorci, odvzeti s 100 ml brizgami, imeli večji delež sladke kopenske vode, zato sklepamo, da vzorčenje z Niskinom ne omogoča ustreznega odvzema vode iz podmorskih izvirov. Tudi pri vzorčenju z brizgami ni znano, koliko morske vode je v vzorcih prisotne naravno v izviru in koliko morske vode smo zajeli ob vzorčenju. To bomo poskušali določiti z geokemičnim modeliranjem. Rezultati $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ nakazujejo, da voda izvira iz karbonatnih kamnin, ker so vrednosti značilne za

raztapljanje karbonatov, vendar ima morska voda podobne vrednosti in je zato mešanje z morsko vodo problematično. Izvor žvepla v izviri je verjetno povezan z redukcijo zaradi anaerobnih bakterij. Glede na to, da so v Izoli v preteklosti izkoriščali termalno vodo za terme, je v prihodnje smiselno opraviti nadaljnje raziskave, pri tem pa je potrebno uporabiti ustrežnejšo tehniko za odvzem vzorcev vode v Žumrovih kotanjah in nadalje raziskati izvire tudi v času različnih hidroloških pogojev v napajalnem zaledju izvirov.

Zahvala

Raziskave so potekale v okviru projekta J1-1712 »Zapis okoljskih sprememb in človekovega vpliva v holocenskih sedimentih Tržaškega zaliva« ter raziskovalnih programov P1-0143 in P1-0195, ki jih financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS). Vzorčenje podmorskih izvirov nam je v letu 2020 omogočilo podjetje Sirio, d.o.o., ki je s pomočjo sonarja na plovilu Lyra zelo natančno določilo lokacije izvirov. V letu 2021 nam je pri vzorčenju pomagala Morska biološka postaja Piran Nacionalnega inštituta za biologijo. Zahvaljujemo se potapljačem podjetja Sirio, d. o.o., in Oceanik, d.o.o., za odvzem vzorcev.

Literatura

- Bakalowicz, M. (2018). Coastal Karst Groundwater in the Mediterranean: A Resource to Be Preferably Exploited Onshore, Not from Karst Submarine Springs, *Geosciences*, 8(7), 258.
- Benedik, A., Rožič, B., (2002). Hidrogeološko poročilo o rezultatih raziskav za zajem termalne vode v globokem vodonosniku na območju Izole z vrtino LIV-1. Poročilo geo-hidro d.o.o., Drenov grič, 16 str.
- Brenčič, M. (2009). Hydrogeochemistry of Coastal Carbonate Aquifer in Lucija–Portorož (Gulf of Trieste, Northern Adriatic Sea, Slovenia). *Acta Carsologica* 38(2–3), Article 2–3.
- Clark, I. (2015). *Groundwater Geochemistry and Isotopes*. CRC Press, London, New York, 438 str.
- Craig, H. (1961). Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science* 133(3465), 1702–1703.
- Faganeli, J., Ogrinc, N., Walter, L. N., & Žumer, J. (2005). Geochemical characterization of the submarine spring of Izola (Gulf of Trieste, N Adriatic Sea), *RMZ - Materials and Geoenvironment* 52, 35–39.
- Fleury, P., Bakalowicz, M., & de Marsily, G. (2007). Submarine springs and coastal karst aquifers: A review, *Journal of Hydrology* 339(1–2), 79–92.
- Gams, I. (2004). *Kras v Sloveniji v prostoru in času*. Založba ZRC SAZU, Ljubljana, 515 str.
- Kramar, J. (2003). *Izola: Mesto ribičev in delavcev*. Zgodovinsko društvo za južno Primorsko, 629 str.
- Lapanje, A. (2006). Origin and chemical composition of thermal and thermomineral waters in Slovenia. *Geologija* 49(2), 347–370.
- Placer, L. (2005). Structural curiosity of the northern Istria, *Geologija* 48(2), 245–251.
- Placer, L., Vrabc, M., & Celarc, B. (2010). The bases for understanding of the NW Dinarides and Istria Peninsula tectonics. *Geologija* 53(1), 55–86.
- Pleničar, M., Polšak, A., & Šikić, D. (1973). Tolmač za list Trst: L 33-88: Socialistična federativna republika Jugoslavija, osnovna geološka karta, 1:100 000. Zvezni geološki zavod.
- Slavec, P. (2012): Analiza morfologije morskega dna slovenskega morja (Slovenian seafloor morphology analysis). Univerza v Ljubljani, NTF.
- Šmuc, A., Rožič, B., & Vrabc, M. (2019). "Geološke razmere" v Slovenska Istra I - Neživi svet, rastlinstvo, živalstvo in naravovarstvo, Slovenska matica, 11–17.
- Vrabc, M. idr.(2013). Refleksijske seizmične raziskave v slovenskem morju. Raziskave s področja geodezije in geofizike, 97-101.

- Žumer, J. (2004). Odkritje podmorskih termalnih izvirov pred Izolo, Geografski obzornik : časopis za geografsko vzgojo in izobraževanje, 11–17.
- Žumer, J. (2008). Podmorski kraški izviri pred Izolo, Naše jame 47, 39-44 .
- Žvab Rožič, P., Verbovšek, T., Kanduč, T., Vreča, P., Žigon, S., Nagode, K., Zuliani, T., Čenčur Curk, B., & Rožič, B. (2021). Poročilo o rezultatih geokemičnega vzorčenja žvepljenih izvirov v okolici Izole v letu 2020: Zaključno poročilo: (Raziskave v okviru ARRS projekta J1-1712, 2019-2021: Zapis okoljskih sprememb in človekovega vpliva v holocenskih sedimentih Tržaškega zaliva, prvo fazno poročilo).