

TEMPERATURA PODZEMNE VODE V SLOVENIJI OD LETA 2015

Urška Pavlič¹

Povzetek

Temperatura podzemne vode se v medzrnskih vodonosnikih Slovenije okvirno giblje med 8 in 15 °C in se sčasoma zvišuje na povprečni letni in tudi sezonskih ravneh. Najnižje temperature podzemne vode so značilne za vodonosnike Kranjsko in Sorško polje ter Tržiška Bistrica, najvišje pa za vodonosnike Čateško, Vrtojbenko in Ljubljansko polje. Povprečne mesečne vrednosti temperature podzemne vode v obdobju meritev 2015–2023 kažejo na različno variabilnost po vodonosnikih, pri čemer je višja variabilnost značilna za plitvejšje vodonosnike, ki so podvrženi sezonskim temperaturam zraka, nižja pa za globlje vodonosnike. Sezonska nihanja temperature podzemne vode so zglajena in zapoznena v primerjavi z zračnimi temperaturami, amplituda nihanja pa z globino upada. Ugotovili smo različne režime nihanja temperature podzemne vode. V ločenega spadajo merilna mesta v globljih vodonosnikih Ljubljanske kotline, Vrtojbenskega, Dravskega in Krškega polja, v ločenega plitvejši vodonosniki po državi, ločen temperaturni režim pa opažamo pri merilnih mestih, ki so predvidoma hidravlično povezani s površinskimi vodami.

GROUNDWATER TEMPERATURE IN SLOVENIA SINCE 2015

Abstract

The groundwater temperature in the intergranular aquifers of Slovenia generally ranges between 8 and 15°C and has been increasing over time, both annually and seasonally. The lowest groundwater temperatures are characteristic of the Kranjsko and Sorško polje aquifers, as well as the Tržiška Bistrica aquifer, while the highest are found in the Čateško, Vrtojbenko, and Ljubljansko polje aquifers. The monthly average groundwater temperatures from the 2015–2023 observation period show different degrees of variability in the aquifers. Higher variability is typical of shallower aquifers exposed to seasonal air temperature changes, while lower variability is found in deeper aquifers. Seasonal fluctuations in groundwater temperature are smoothed and delayed compared to air temperatures, with the amplitude of variation decreasing with depth. We identified distinct regimes of groundwater temperature fluctuation. One regime includes monitoring sites in deeper aquifers of the Ljubljana Basin, Vrtojbenko, Dravsko, and Krško polje. Another regime comprises shallower aquifers across the country. A separate thermal regime is observed at sites hydraulically connected to surface waters.

¹ dr., Ministrstvo za okolje, podnebje in energijo, Agencija RS za okolje, Vojkova 1b, Ljubljana, urska.pavlic@gov.si

UVOD

Podzemna voda ima pomembno vlogo v številnih naravnih procesih in človekovih dejavnostih. Je vir pitne vode za približno polovico svetovnega prebivalstva in pokriva skoraj polovico svetovnih potreb po namakanju (Benz in sod., 2024). V Sloveniji pitno vodo skoraj v celoti zagotavljamo iz podzemnih vodnih virov. Podzemna voda je med drugim pomembna tudi za vzdrževanje in obstoj kopenskih ekosistemov, odvisnih od podzemne vode.

Temperatura podzemne vode je eden najpomembnejših fizikalnih parametrov, ki vpliva na njeno kakovost in uporabnost v različnih sektorjih. Raziskave kažejo, da se temperatura podzemne vode spreminja prostorsko in časovno, odvisna je od podnebnih

razmer, topografije, lastnosti vodonosnikov, geotermalnega gradienta in antropogenih vplivov (Benz in sod., 2024).

V prispevku raziščemo temperaturo podzemne vode v medzrnskih vodonosnikih po Sloveniji, njihovo porazdelitev, časovno spremenljivost in trend nihanja v obdobju meritev 2015–2023. Natančneje se opredelimo do temperature podzemne vode leta 2024.

UPORABLJENI PODATKI IN METODE DELA

Temperatura podzemne vode je eden osnovnih parametrov hidrološkega monitoringa podzemnih voda na Agenciji RS za okolje (ARSO). Tehnike merjenja so

se od začetka izvajanja meritev spreminjale. Pred letom 2010 je bilo prevladujoča vrsta merjenja občasno ročno opazovanje parametra, po zadnji večji posodobitvi merilne mreže leta 2015 pa so prevladujoč način merjenja temperature podzemne vode elektronski merilniki z avtomatskim zapisovanjem in samodejnim prenosom podatkov. V prispevku so obravnavani zvezni podatki o temperaturi podzemne vode od leta 2015 naprej. Skupno je v analizo vključenih 38 merilnih mest. Podatki so večinoma prešli primarno kontrolo meritev, pri čemer so bile odpravljene morebitne anomalije vrednosti. V analizi obravnavamo dnevna, mesečna in letna povprečja temperature podzemne vode na razpoložljivih merilnih lokacijah. V podatkih niso izključene napake meritev, ki na primer nastanejo zaradi neoptimalnega merilnega objekta z zastajanjem vode v vodnjaku, in druge.

Sezonski agregati parametra temperature podzemne vode temeljijo na meteorološki razmejitvi letnih časov; zima traja od decembra do februarja, pomlad od marca do maja, poletje od junija do avgusta in jesen od septembra do novembra. V obravnavi letnega časa tega prispevka je tako december pripisan zimi naslednjega koledarskega leta. Za zimo 2015 smo tako upoštevali strnjeno obdobje od decembra 2014 do februarja 2015.

Analiza trendov je bila izvedena za letna povprečja in sezonska povprečja temperatur podzemne vode na posameznih merilnih mestih med letoma 2015 in

2023 (devetletni niz meritev). Analizo linearnega trenda posamezne spremenljivke v času smo testirali z uporabo metode neparametričnega Spearmanovega koeficienta korelacije rangov ρ s 95-odstotnim intervalom zaupanja. Spearmanov koeficient korelacije rangov je definiran z vsoto razlik rangov (R) med odvisno y in neodvisno x spremenljivko, pri čemer n predstavlja število vseh enot (parov rangov) in ga lahko zapišemo kot (Kundzewicz in Robson, 2000):

$$\rho = \frac{6 \sum_{i=1}^n (R(x_i) - R(y_i))^2}{n(n^2 - 1)}$$

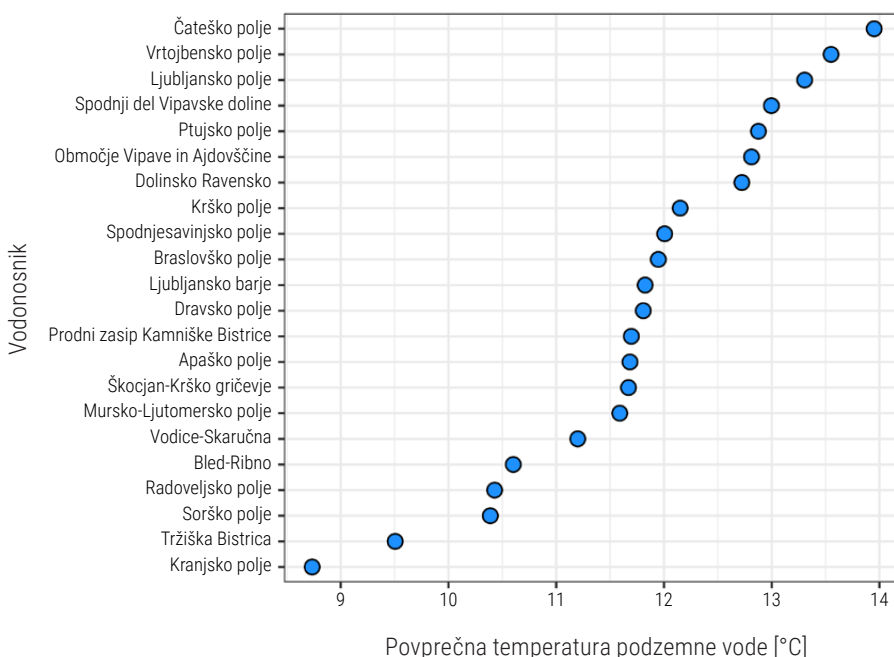
Temperaturne režime smo določili s faktorsko analizo. Faktorska analiza je multivariatna statistična metoda, ki se uporablja za ugotavljanje struktur med opazovanimi spremenljivkami. Temelji na predpostavki, da je vsak opazovani podatek mogoče izraziti kot linearno kombinacijo latentnih faktorjev in naključne napake (Tabachnick in Fidell, 2019).

Osnovna enačba faktorskega modela je:

$$X_i = \lambda_{i1} F_1 + \lambda_{i2} F_2 + \dots + \lambda_{im} F_m + e_i,$$

pri čemer je: X_i – opazovana spremenljivka, $F_1, F_2, \dots, F_m$ – latentni (skriti) faktorji, λ_{ij} – faktorske uteži in e_i – napaka, ki vključuje merilno napako ter unikatno varianco spremenljivke X_i .

Podatkovna osnova za izračun faktorjev so povprečne mesečne temperature podzemne vode.



Slika 1: Povprečna letna temperatura podzemne vode v aluvialnih vodnosnikih v obdobju 2015–2023 (avtorica: U. Pavlič)

Figure 1: Average annual groundwater temperature in alluvial aquifers in the period 2015–2023 (Source: U. Pavlič)

PORAZDELITEV IN NIHANJE VIŠINE TEMPERATURE PODZEMNE VODE

Temperatura podzemne vode se v medzrnskih vodonosnikih Slovenije giblje med 8 in 15 °C. Najnižje povprečne letne temperature podzemne vode so bile v obdobju 2015–2023 značilne za posamezne globlje vodonosnike Ljubljanske kotline (Kranjsko polje, Tržiška Bistrica, Sorško polje, Radoveljsko polje in Bled – Ribno), najvišje pa za vodonosnike Čateško, Vrtojbenko in Ljubljansko polje (slika 1).

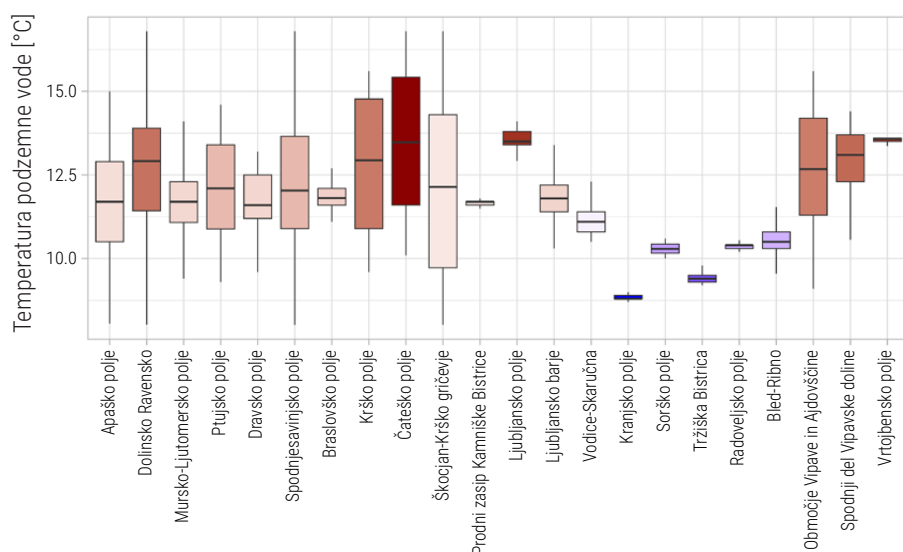
Omenjena prostorska porazdelitev vrednosti kaže, da na višino povprečne letne temperature vpliva razsežnost vodonosnika in z njim povezana globina do podzemne vode. Temu med drugim pritrjuje nižja vrednost povprečne temperature podzemne vode globljega vodonosnika Dravskega polja, ki se približa naboru vodonosnikov Ljubljanske kotline, za katere sta značilni večja globina in nižja povprečna obdobjna vrednost temperature podzemne vode. Večja izjema med vodonosniki Ljubljanske kotline je vodonosnik Ljubljanskega polja, ki bi ga glede na globino in lego v prostoru sicer uvrstili med vodonosnike z nižjo povprečno letno temperaturo podzemne vode, vendar ni tako. Pojav si lahko razlagamo z učinkom mestnega toplotnega otoka, ki povzroča zviševanje temperature tudi pod površjem tal (Taylor in Stefan, 2009). V urbanih območjih so zaradi človekovih dejavnosti na splošno temperature višje kot na podeželju. Nprepustna tla, malo vegetacije, odpadna toplota, pa tudi podzemne instalacije, kot so kanalizacijski sistemi, cevi daljinskega ogrevanja, kleti, predori in geotermalni energetski sistemi, krepijo učinek mestnega toplotnega otoka.

Na povprečno dolgoletno temperaturo podzemne vode lahko vpliva tudi povprečna letna temperatura zraka (Kurylyk in sod., 2014) s čimer si lahko razlagamo višjo temperaturo vodonosnikov na območju Vipave, Ajdovščine in Vrtojbenkega polja, kjer je tudi temperatura zraka v povprečju višja kot v preostali Sloveniji (Cegnar, 2024). Na temperaturo podzemne vode lahko vplivata tudi geotermalni gradient in toplotna prevodnost kamnin ter sedimentov (Kurylyk in sod., 2014).

Povprečne mesečne vrednosti temperature podzemne vode v obdobju meritev 2015–2023 kažejo na različno variabilnost po vodonosnikih, ponekod pa tudi po posameznih lokacijah merjenja. Povprečna mesečna temperatura podzemne vode tako ponekod izraziteje, ponekod pa manj izrazito do neizrazito niha v odvisnosti od časa (slika 2). Največji razpon med prvim in tretjim kvartilom nihanja povprečne mesečne temperature podzemne vode je v obdelovalnem obdobju značilen za vodonosnike Škocjan-Krško gričevje, Krško in Čateško polje, najmanjši pa za vodonosnike Kranjsko, Sorško in Radoveljsko polje, Prodni zasip Kamniške Bistrice, Tržiška Bistrica in Vrtojbenko polje.

Na podlagi nihanja povprečnih mesečnih temperatur podzemne vode med letoma 2015 in 2023 smo merilne lokacije razvrstili v tri razrede glede na standardni odklon (variabilnost), pri čemer smo mejno vrednost za visoko variabilnost določili pri standardnem odklonu ≥ 2 °C, nizko pa pri standardnem odklonu <1 °C.

Visoko variabilnost nihanja povprečne mesečne temperature podzemne vode imajo vodonosniki Dolinsko Ravensko, Ptujsko polje, Škocjan-Krško



Slika 2: Razpon nihanja povprečne mesečne temperature podzemne vode v medzrnskih vodonosnikih v obdobju 2015–2023 (avtorica: U. Pavlič)

Figure 2: Average monthly groundwater temperature range in alluvial aquifers in the period 2015–2023 (Source: U. Pavlič)

gričevje, Čateško polje, Krško polje in Spodnjesavinjsko polje. Srednja variabilnost je značilna za vodonosnike Apaško polje, Mursko polje ter območje Vipave in Ajdovščine. Preostali vodonosniki, kamor spadajo vodonosniki Ljubljanske kotline, Dravsko, Braslovško in Vrtojbenko polje ter spodnji del Vipavske doline, izkazujejo nizko variabilnost parametra. Rezultati tako kažejo, da je variabilnost precej odvisna od globine vodonosnika, pri čemer obstajajo tudi izjeme, kot je na primer Braslovško polje.

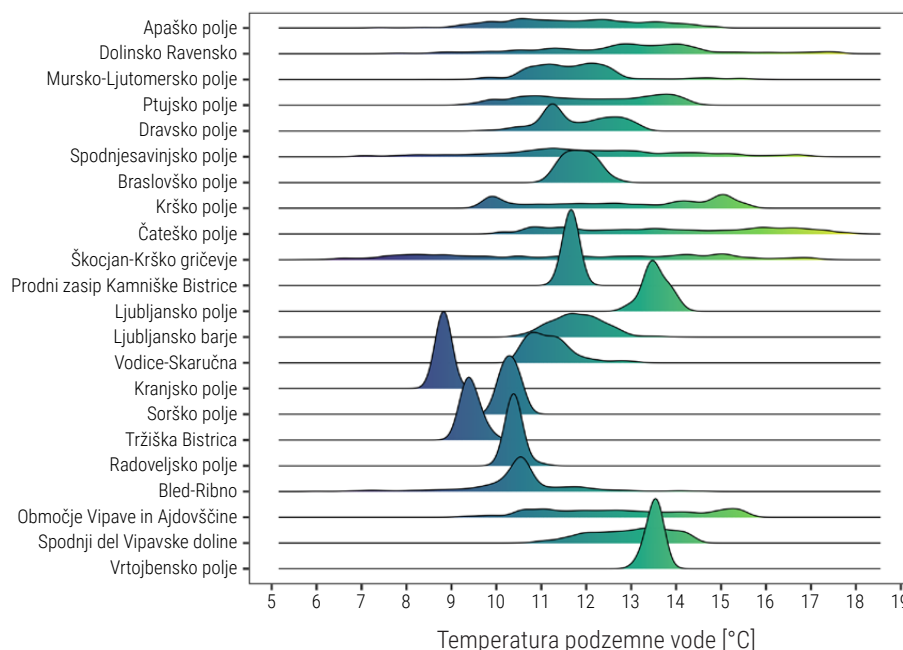
Če ocenimo variabilnost po posameznih merilnih lokacijah, vidimo, da je razlika v variabilnosti lahko precejšnja tudi med merilnimi lokacijami istega vodonosnika. Na merilnih lokacijah Črnci na Apaškem polju in Gornji Lakoš v vodonosniku Dolinsko Ravensko je na primer ugotovljena nizka variabilnost nihanja povprečne mesečne temperature podzemne vode, čeprav je za ta dva vodonosnika sicer značilna visoka (Dolinsko Ravensko) oziroma srednja (Apaško polje) variabilnost nihanja vrednosti. Razloge za tovrstna odstopanja lahko iščemo v bližini oziroma odsotnosti lokalnih virov toplote, razlikah v globini do podzemne vode na posameznih lokacijah (npr. plitvejši obrobni ali globlji osrednji deli vodonosnika), v bližini virov napajanja (npr. vpliv reke), pa tudi v kakovosti merilnega objekta (npr. v starih kopanih vodnjakih voda lahko zastaja in je zato bolj podvržena nihanju temperature zraka v okolici).

Na merilnih mestih z ugotovljeno visoko variabilnostjo nihanja povprečne mesečne temperature podzemne vode je temperatura najnižja najpogosteje

februarja in marca, najvišja pa septembra. To kaže na velik vpliv temperature zraka na nihanje temperature podzemne vode, ki se pojavi z nekim časovnim zaostankom. Najvišja vrednost povprečne mesečne temperature podzemne vode se na merilnih mestih s srednjo variabilnostjo vrednosti najpogosteje beleži oktobra, najnižja pa marca in aprila, kar kaže na daljši zakasnitveni čas temperature vode v primerjavi s temperaturami zraka v okolici vodonosnika. Ekstremnih povprečnih mesečnih vrednosti temperature podzemne vode za merilna mesta z ugotovljeno nizko variabilnostjo zaradi majhnih sprememb vrednosti nismo ocenjevali.

Nekateri vodonosniki, predvsem v Pomurju, Podravju, Krški kotlini, Vipavi in Ajdovščini ter spodnjem delu Vipavske doline, kažejo na bimodalno porazdelitev temperature podzemne vode (slika 3). Bimodalna porazdelitev temperature podzemne vode pomeni, da se v podatkih pojavljata dva izrazita temperaturna vrhova oziroma frekvenčna maksimuma. To lahko nakazuje na prisotnost dveh različnih skupin meritev, ki jih lahko z izvzetjem antropogenih vplivov razlagamo predvsem s sezonskim vplivom, pri čemer zimski meseci ustvarijo svoj frekvenčni vrh, poletni pa svojega. Drugi verjetni razlog je napajanje vodonosnika iz različnih virov, na primer iz površinskih voda, iz globljih struktur ali neposredno infiltracijo padavin.

Bimodalne porazdelitve temperatur podzemne vode, opažene predvsem v plitvih medzrnskih vodonosnikih z večjo sezonsko variabilnostjo (npr. v Pomurju, Savinjski in Krški kotlini ter Vipavski dolini), lahko



Slika 3: Porazdelitev povprečnih dnevni vrednosti temperature podzemne vode na izbranih merilnih mestih hidrološkega monitoringa podzemnih voda v obdobju 2015–2023 (avtorica: U. Pavlič)

Figure 3: Distribution of mean daily groundwater temperature at selected measuring points of hydrological groundwater monitoring in the period 2015–2023 (Source: U. Pavlič)

nakazujejo vpliv sezonskih sprememb temperature zraka. Dravskega in Ljubljanskega polja ne vključujemo sem, saj se zaradi večje povprečne globine in manjše amplitude mesečnih nihanj kaže drugačna temperaturna dinamika. Možno pojasnilo za zaznano bimodalnost temperaturne porazdelitve v teh dveh vodonosnikih je vpliv različnih virov napajanja, kot so padavine, reka Sava (Ljubljansko polje) in Pohorski potoki (Dravsko polje), kar pa bi bilo treba v prihodnje preveriti z dodatnimi podatki o robnih pogojih napajanja vodonosnikov.

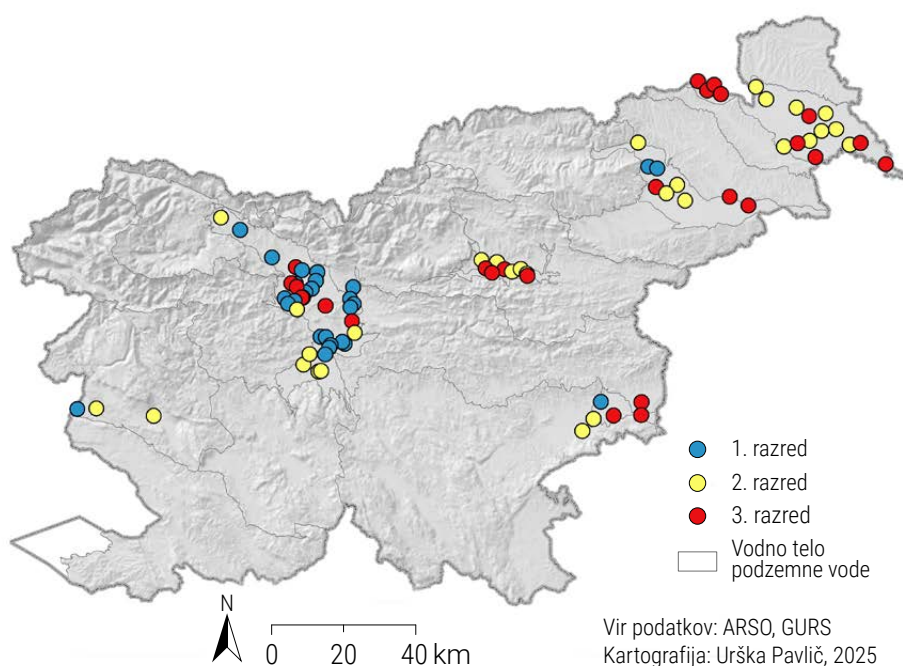
TEMPERATURNI REŽIMI

Na podlagi povprečne mesečne temperature podzemne vode na posameznih merilnih lokacijah smo podatke z metodo faktorske analize razvrstili v razrede. Podatke je bilo smiselno razdeliti v tri razrede, kar prikazuje slika 4. V ločen razred je po tej metodi uvrščen večji del merilnih mest na območju vodonosnikov Ljubljanske kotline, Vrtojbenskega polja in severnega dela Dravskega polja ter del Krškega polja (Drnovo) (1. razred). Gre pretežno za vodonosnike z večjo globino do podzemne vode, za katere je značilna majhna do zanemarljiva sezonska amplituda temperature. V samostojni razred je uvrščenih več merilnih mest na območju vodonosnikov Pomurja, severni rob Spodnjėsavinjskega polja, plitvi del Ljubljanskega barja, območje Vipave in Ajdovšćine, spodnji del Vipavske doline ter Škocjan-Krško grićevje (2. razred). Ti vodonosniki so praviloma plitvejši in

odzivnejši na sezonsko nihanje temperature zraka. Preostala merilna mesta so bila uvrščena v samostojno skupino (3. razred). Gre za merilna mesta na območju Apaškega polja, delov vodonosnika Dolinsko Ravensko in Mursko-Ljutomersko polje, vodonosniki Ljubljanske kotline ob reki Savi in Kokri, južni del Spodnjėsavinjskega polja in deli vodonosnikov Krške kotline (slika 4). Na podlagi ugotovljenega lahko rećemo, da po rećimu nihanja lahko v svoj razred razvrstimo merilna mesta globokih in plitvih medzrnskih vodonosnikov ter vodonosnikov, ki so v pretećnem vplivnem rećimu nihanja posameznih rek.

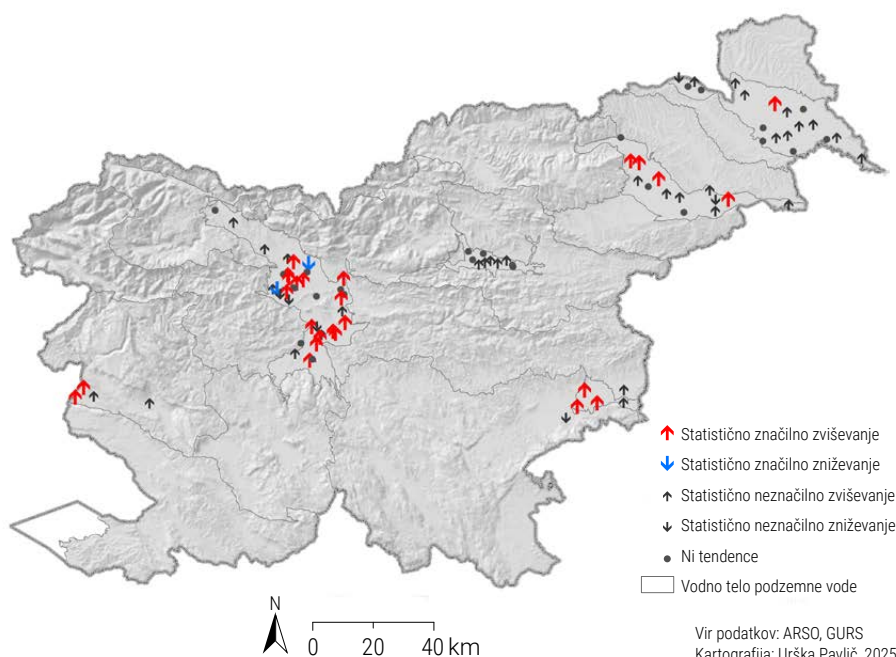
TENDENCE NIHANJA POVPREĆNE LETNE IN SEZONSKE TEMPERATURE PODZEMNE VODE V OBDOBJU 2015–2023

Povprećne letne temperature podzemne vode med letoma 2015 in 2023 kaćejo splošno tendenco naraščanja. Statistićno znaćilno zviševanje temperature (na 95-odstotni ravni zaupanja) je bilo ugotovljeno na večjem številu merilnih mest, predvsem v globljih vodonosnikih na območju Ljubljanske kotline, Vrtojbenskega polja ter Dravskega in Krškega polja. Povišanje temperatur se pojavlja tudi v nekaterih plitveje lećećih vodonosnikih po Sloveniji, vendar tam trend ni statistićno znaćilen. Statistićno znaćilno zniževanje temperature podzemne vode je bilo redko, opaćeno le na merilnih mestih Trata (Sorško polje) in Cerklje (Kranjsko polje).



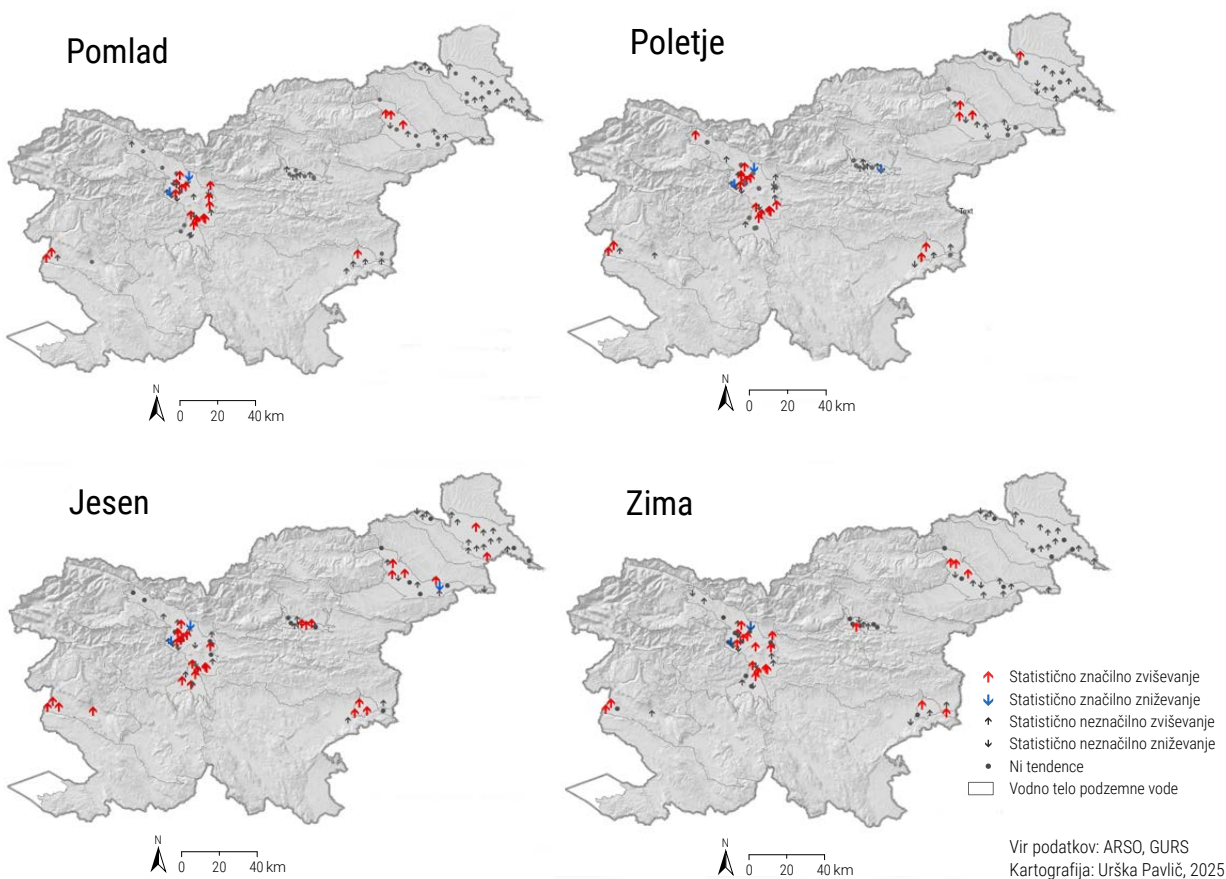
Slika 4: Razvrstitev temperaturnih rećimov podzemne vode z uporabo faktorske analize (avtorica: U. Pavlić)

Figure 4: Classification of groundwater temperature regimes using factor analysis (Source: U. Pavlić)



Slika 5: Trend nihanja povprečne letne temperature podzemne vode v obdobju 2015–2023 na merilnih mestih hidrološkega monitoringa podzemnih voda (avtorica: U. Pavlič)

Figure 5: Trend of mean annual groundwater temperature fluctuations in the period 2015–2023 at the measuring stations of hydrological groundwater monitoring (Source: U. Pavlič)

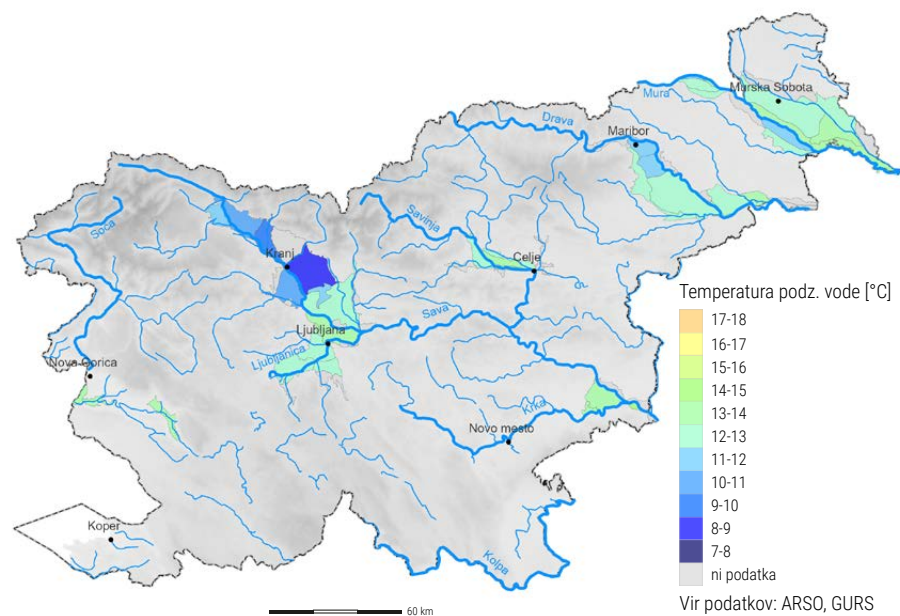


Slika 6: Trend nihanja povprečne temperature podzemne vode v obdobju 2015–2023 v posameznih letnih časih (avtorica: U. Pavlič)

Figure 6: Trend of mean groundwater temperature fluctuations in the individual seasons of the period 2015–2023 (Source: U. Pavlič)

Statistično analizo trendov smo v nadaljevanju izvedli tudi ločeno za posamezne letne čase v obdobju 2015–2023. Rezultati kažejo podobne vzorce kot pri analizi letnih povprečij, in sicer prevladujoč trend naraščanja temperature podzemne vode, zlasti v

globljih medzrnskih vodonosnikih po Sloveniji (slika 6). V vseh sezonah je bilo največ statistično značilnih naraščajočih trendov ugotovljenih na merilnih mestih znotraj vodonosnikov Ljubljanske kotline – prodni zasip Kamniške Bistrice, Ljubljansko polje in barje



Slika 7: Kazalnik povprečne temperature podzemne vode v medzrnskih vodonosnikih leta 2024 (avtorica: U. Pavlič)

Figure 7: Mean groundwater temperature indicator in intergranular aquifers in 2024 (Source: U. Pavlič)

ter Kranjsko in Sorško polje. Najizrazitejša sezonska odstopanja od letnih povprečij so bila ugotovljena jeseni, ko se statistično značilno povišanje temperature pojavlja tudi v plitvejših vodonosnikih Savinjske kotline ter na območju Vipave in Ajdovščine.

Statistično značilno zniževanje temperature podzemne vode se tudi na sezonski ravni pojavlja le redko. Poleg merilnih mest v osrednji Sloveniji, ki izražata negativni trend že na letni ravni, je bil tak trend ugotovljen poleti na merilnem mestu Levec (Spodnjėsavinjsko polje) in jeseni na lokaciji Sobotinci (Ptujsko polje). Poleti je v Pomurju zaznani večje število negativnih trendov v primerjavi z drugimi letnimi časi oziroma z analizo letnih povprečnih vrednosti (sliki 5 in 6).

ZNAČILNOSTI VIŠINE TEMPERATURE PODZEMNE VODE LETA 2024

Prostorska porazdelitev povprečne letne temperature podzemne vode leta 2024

Na podlagi reprezentativnih merilnih postaj smo za leto 2024 analizirali povprečne temperature podzemne vode v aluvialnih vodonosnikih po Sloveniji. Skupna analiza vseh lokacij je pokazala, da so se temperature gibale med 8,4 °C in 14,1 °C, s povprečno vrednostjo 12,37 °C in standardnim odklonom 1,2 °C. Prostorska porazdelitev temperatur ni enakomerna (slika 7).

Najnižje povprečne letne temperature podzemne vode so bile leta 2024 izmerjene na severozahodu države

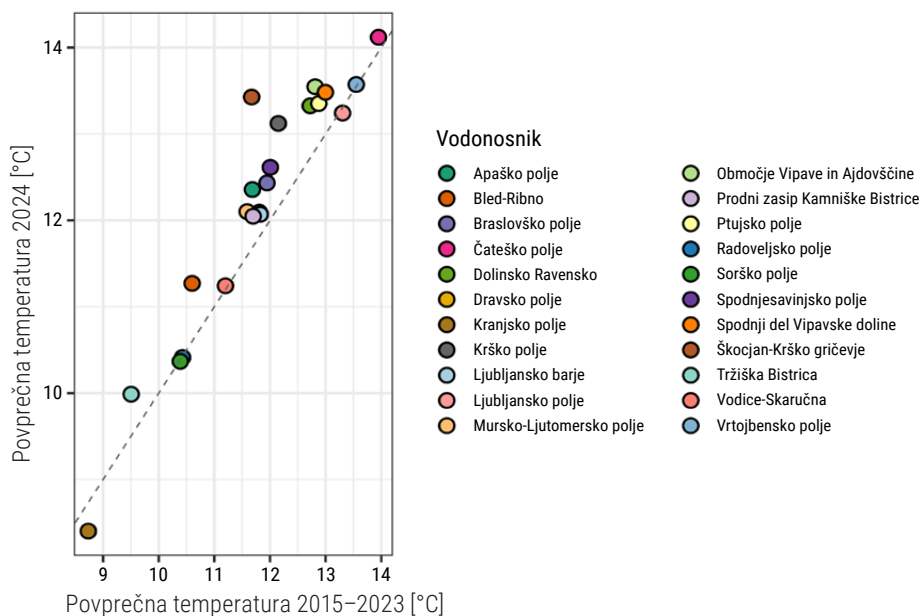
– na območju Kranjskega, Sorškega in Radoveljskega polja, Tržiške Bistrice, Vodice–Skaručne, Bleda–Ribnega, prodnega zasipa Kamniške Bistrice in Ljubljanske barja. Najvišje vrednosti pa so bile zabeležene na območju Čateškega polja ter delih vodonosnikov Dolinsko Ravensko in Spodnjėsavinjsko polje.

Primerjava temperatur podzemne vode v medzrnskih vodonosnikih po Sloveniji leta 2024 z dolgoletnim obdobjem 2015–2023 kaže, da so bile v večini vodonosnikov temperature leta 2024 višje (slika 8). Izjema je Kranjsko polje, na katerem je bila temperatura podzemne vode nekoliko nižja od dolgoletnega povprečja. V večini vodonosnikov Ljubljanske kotline pa so bile temperature leta 2024 primerljive s tistimi iz referenčnega obdobja.

Časovno nihanje temperature podzemne vode leta 2024

Povprečna mesečna temperatura podzemne vode je leta 2024 na nekaterih območjih izraziteje, drugje pa manj izrazito oziroma skoraj nespremenjeno nihala skozi leto (slika 9).

Analiza časovnega nihanja povprečnih mesečnih temperatur na posameznih merilnih mestih kaže, da so vzorci variabilnosti podobni tistim, ugotovljenim za obdobje 2015–2023. Najizrazitejša sezonska nihanja, z maksimumi septembra in minimumi v prvih treh mesecih leta, so bila opažena v delih vodonosnikov severovzhodne Slovenije ter v Krški in Savinjski kotlini (slika 9). Na drugih lokacijah znotraj teh vodonosnikov je bila variabilnost nekoliko manjša, vendar še vedno opazna.



Slika 8: Odstopanje povprečne letne temperature podzemne vode v medzrnskih vodonosnikih leta 2024 od primerljivih vrednosti referenčnega obdobja 2015–2023 (avtorica: U. Pavlič)

Figure 8: Deviation of the mean annual groundwater temperature in intergranular aquifers in year 2024 from the reference period, 2015–2023 (Source: U. Pavlič)

V skupino s srednjo variabilnostjo nihanja temperature podzemne vode leta 2024 uvrščamo tudi večino merilnih postaj na območju Vipave in Ajdovščine. Na teh mestih so bile najvišje povprečne mesečne temperature najpogosteje izmerjene oktobra, najnižje pa februarja ali marca.

Preostale merilne lokacije – med njimi Vrtojbenško polje, večina merilnih mest v vodonosnikih Ljubljanske kotline (razen Bleda–Ribnega), Dravskega polja (razen Rač) ter posamezna druga merilna mesta – so leta 2024 izkazovale nizko ali zanemarljivo sezonsko variabilnost. Gre predvsem za globlje medzrnske vodonosnike ali vodonosnike s stabilnejšimi hidrogeološkimi razmerami, v katerih ima temperatura podzemne vode malo ali nič povezave z letnimi nihanji temperature zraka.

SKLEPNE MISLI

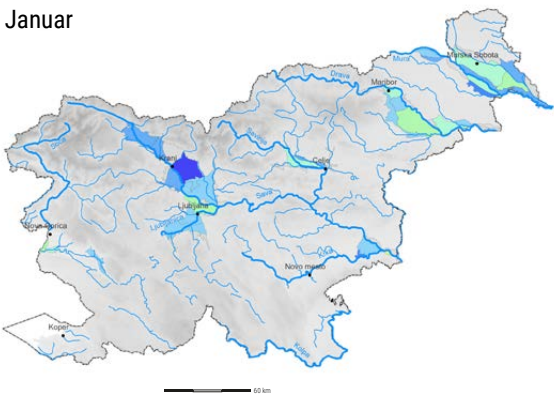
Povprečna temperatura podzemne vode v Sloveniji je zelo odvisna od globine vodonosnika, kar potrjujejo nižje vrednosti v globljih vodonosnikih Ljubljanske kotline in Dravskega polja. Izjema je vodonosnik Ljubljanskega polja, pri katerem lahko višjo temperaturo kljub globini pripišemo vplivu mestnega toplotnega otoka. K temperaturi podzemne vode prispevajo tudi povprečne letne temperature zraka, kar se kaže z višjo temperaturo podzemne vode na območjih Vipave, Ajdovščine in Vrtojbenškega polja. Poleg tega imata lahko pomemben vpliv na povprečno temperaturo podzemne vode tudi geotermalni gradient in toplotna prevodnost kamnin.

Podzemna voda se segreva na globalni ravni (razen območij permafrosta) (Benz in sod., 2024) in v Sloveniji (Frantar in Draksler, 2022). Ugotovljeno je bilo, da bo do leta 2100 povprečna temperatura podzemne vode po svetu višja za približno 2,1 °C v okviru srednjega scenarija emisij. Vzorci segrevanja plitve podzemne vode pa se regionalno precej razlikujejo zaradi prostorske raznolikosti podnebnih značilnosti in globine do vodne gladine.

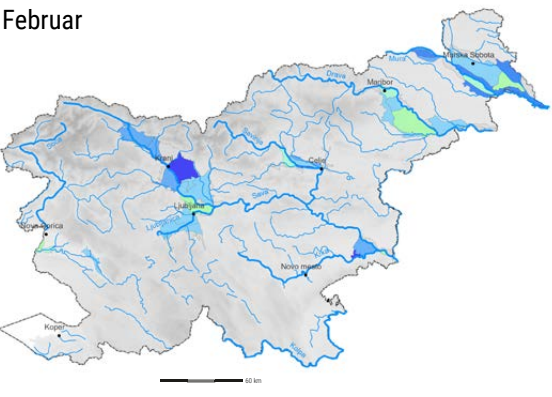
Trend zviševanja temperature podzemne vode je bil v obdobju 2015–2023 splošno prisoten, in sicer tako na letni kot sezonski ravni. S 95-odstotno stopnjo zaupanja se statistično značilno zvišujejo povprečne letne temperature predvsem v globljih vodonosnikih Ljubljanske kotline, Vrtojbenškega in Krškega polja ter ponekod tudi Dravskega polja. Jeseni je trend opaznejši tudi v plitvejših vodonosnikih Savinjske kotline ter območja Vipave in Ajdovščine. Ob stabilnem podnebjju naj bi sezone temperature spremembe zraka vplivale na temperaturo podzemne vode do globine približno 20 metrov (Taylor in Stefan, 2009), vendar sodobne raziskave kažejo, da zaradi dolgotrajnega površinskega segrevanja vpliv temperature zraka lahko seže celo do 100 metrov globine (Benz in sod., 2024). To potrjujejo tudi rezultati te študije, saj so trendi naraščanja temperature podzemne vode zaznani tudi na merilnih mestih, kjer globina do vode presega 20 metrov.

Sezonska nihanja temperature podzemne vode so navadno zglajena in zapoznena v primerjavi z zračnimi temperaturami, pri čemer amplituda nihanja z globino upada. Poleg tega je analiza temperaturnih režimov poudarila pomembno vlogo površinskih voda, saj

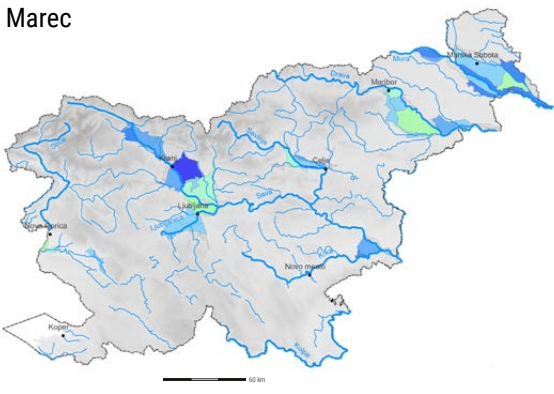
Januar



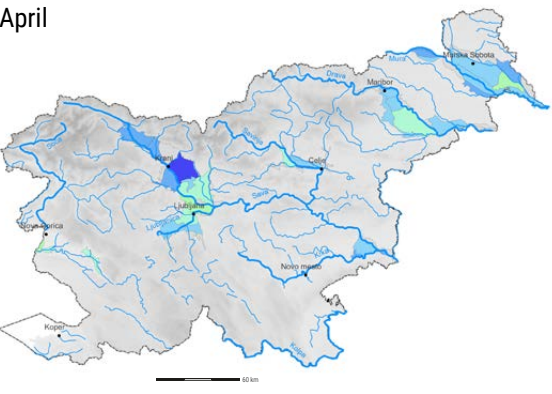
Februar



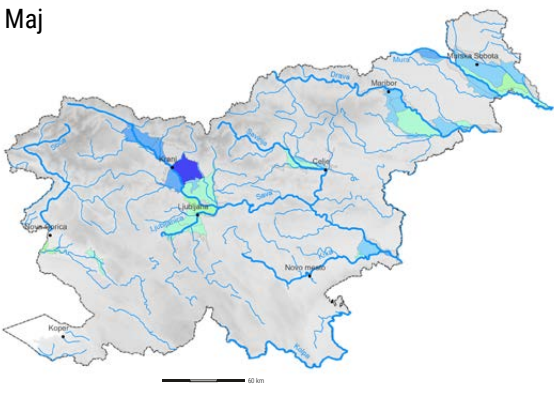
Marec



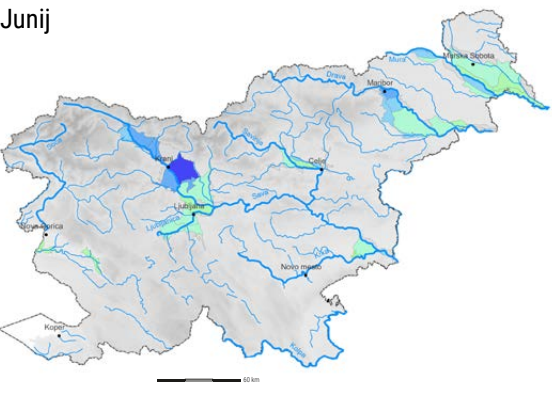
April



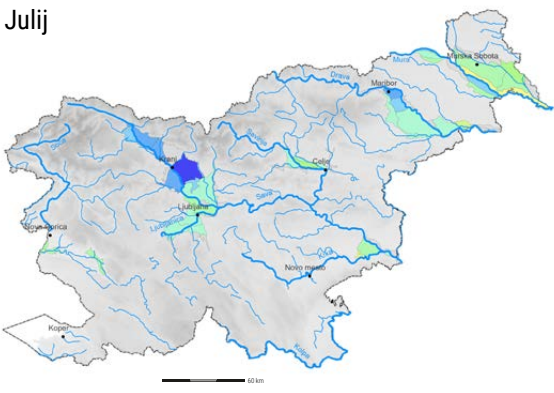
Maj



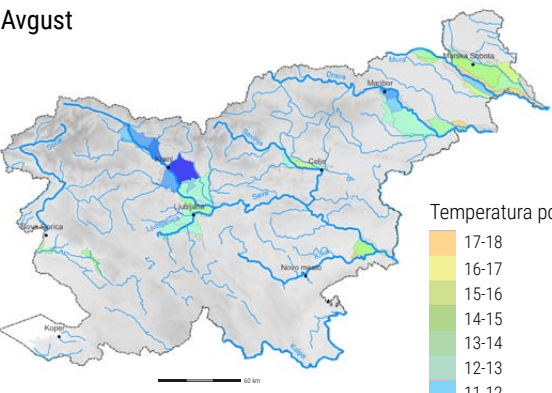
Junij



Julij



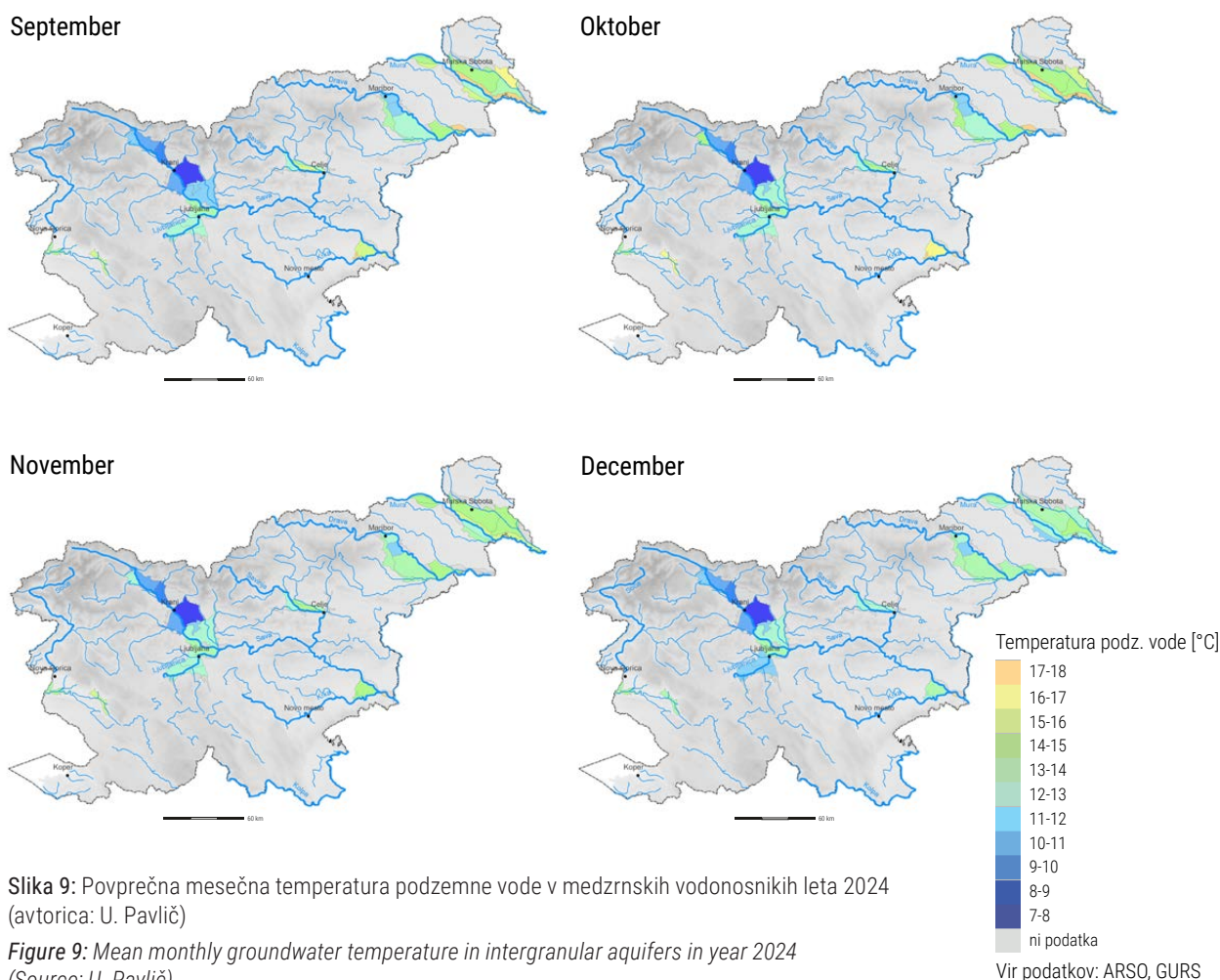
Avgust



Temperatura podz. vode [°C]

17-18
16-17
15-16
14-15
13-14
12-13
11-12
10-11
9-10
8-9
7-8
ni podatka

Vir podatkov: ARSO, GURS



Slika 9: Povprečna mesečna temperatura podzemne vode v medzrnskih vodonosnikih leta 2024 (avtorica: U. Pavlič)

Figure 9: Mean monthly groundwater temperature in intergranular aquifers in year 2024 (Source: U. Pavlič)

merilna mesta v njihovem vplivnem območju kažejo značilne odklone in posebne temperaturne vzorce.

Tudi leta 2024 so se potrdile pretekle ugotovitve glede trenda in variabilnosti nihanja temperature podzemne vode v medzrnskih vodonosnikih. Temperature podzemne vode so bile večinoma višje kot v dolgotermnem povprečju, sezonska nihanja pa v plitvih vodonosnikih izrazitejša kot v globokih.

Dvig temperature podzemne vode lahko v prihodnosti pomembno vpliva na kakovost pitne vode, zmanjšano prezračevnost, razmnoževanje mikroorganizmov, občutljivost ekosistemov, odvisnih od podzemne vode, in dolgoročno vzdržnost geotermalnih sistemov, zato sta prostorsko in časovno spremljanje temperaturnih sprememb zelo pomembni za učinkovito upravljanje vodnih virov.

Viri in literatura

1. Benz, S. A., Irvine, D. J., Rau, G. C., Bayer, P., Menberg, K., Blum, P., Jamieson, R. C., Griebler, C., Kurylyk, B. L., 2024. Global groundwater warming due to climate change. *Nature Geoscience*, 17, 545–551.
2. Cegnar, T., 2023. Podnebne razmere v Sloveniji leta 2023. *Ujma*, št. 38, Ljubljana. <https://ojs-gr.zrc-sazu.si/ujma/article/view/9381>.
3. Frantar, P., Draksler, A., 2022. Vpliv podnebnih sprememb na temperaturo vode v Sloveniji v 21. stoletju. *Geografski vestnik*, 94(2), 46–80. <https://ojs-gr.zrc-sazu.si/gv/article/view/8206>.
4. Kundzewicz, Z. W., Robson, A. (Eds.), 2000. Detecting trend and other changes in hydrological data. *World Climate Programme Data and Monitoring – Water*, WMO/TD-No. 1013, World Meteorological Organization, Geneva, 158. <https://water.usgs.gov/osw/wcp-water/detecting-trend.pdf>.
5. Kurylyk, B. L., MacQuarrie, K. T. B., McKenzie, J. M. (2014). Shallow groundwater thermal sensitivity to climate change and land cover disturbances: derivation of analytical expressions and implications for stream temperature modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 3725–3738. <https://hess.copernicus.org/articles/19/2469/2015/hess-19-2469-2015.pdf>.
6. Tabachnick, B. G., Fidell, L. S., 2019. *Using Multivariate Statistics* (7th ed.). Pearson Education.
7. Taylor, C. A., Stefan, H. G. (2009): Shallow groundwater temperature response to climate change and urbanization, *Journal of Hydrology*, 375(3–4), 601–612.