

TRENDI TEMPERATUR POVRŠINSKIH IN PODZEMNIH VODA DO LETA 2015 V SLOVENIJI

TEMPERATURE TRENDS IN SURFACE AND GROUNDWATERS IN SLOVENIA UP TO 2015

Andrej Draksler

andrej.draksler27@gmail.com

Peter Frantar

dr., Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje, Vojkova 1b, Ljubljana, peter.frantar@gov.si

Vlado Savić

vlado.savicc@gmail.com

Povzetek

Temperatura vode je ena najpomembnejših značilnosti vode in eden glavnih kazalcev vpliva podnebnih sprememb. Analiza trendov temperature vode je bila opravljena na dolgoletnih nizih vodomernih postaj na površinskih vodah, jezerih, podzemnih vodah in morju. Prvi del analize je zajemal presojo ustreznosti podatkov primernosti postaj in ustreznosti časovnih vrst podatkovnih nizov. Izbranih je bilo 66 postaj, od tega 48 na površinskih vodah (med njimi dve na jezerih ter ena na morju) in 18 na podzemnih vodah. Izvedli smo homogenizacijo podatkov, ki je nujna za odpravo merskih anomalij in izrednih odstopanj podatkov. Obdobje homogenizacije je bilo 1953–2015 za površinske vode, jezera in morje ter 1969–2015 za podzemne vode. Izvedena je bila analiza linearnih trendov in statistične značilnosti trendov za celotno obdobje. Rezultati analize trendov povprečnih letnih temperatur vode kažejo naraščajoče trende, ki so vsi statistično značilni, kar je skladno z analizami podnebnih sprememb, ki kažejo na segrevanje Zemlje.

Abstract

Water temperature is one of the most important characteristics of water, and one of the key indicators of climate change impacts. An analysis of water temperature trends was conducted on the basis of long-term data sets gathered from gauging stations on surface waters, lakes, groundwater and the sea. The first part of the analysis comprised assessments of the adequacy of the data, the gauging stations, and the time series of data sets. Sixty-six stations were selected, of which 48 were located in surface waters (including two in lakes and one in the sea) and 18 in groundwater. Homogenisation of the data was carried out, which is essential for the elimination of measurement anomalies and extreme data deviations. The homogenisation periods were 1953-2015 for surface waters, lakes and the sea, and 1969-2015 for groundwater. An analysis of the linear trends and the statistical characteristics of the trends for the entire period was also carried out. The results of the analysis of average annual water temperature show upward trends, which are all statistically typical and in line with climate change analyses indicating global warming.

Uvod

Temperatura vode je poleg količine in kakovosti vode ena najpomembnejših značilnosti vode in je pomemben element pri mnogih procesih in dejavnostih, povezanih z rekami, jezeri, morji in podzemnimi vodami. Od temperature vode so odvisni ekološki, biokemični in hidravlični procesi ter najrazličnejše dejavnosti, kot so na primer hladilna voda, ogrevalna voda, rekreacijske dejavnosti itn. (Frantar, 2012; Leize in sod., 2017 po Webb 2008). Temperatura vode je odvisna od različnih dejavnikov, ki nanjo vplivajo v različnih geografskih in časovnih razsežnostih. Najbolj nanjo vpliva sama količina vode, širši vpliv pa ima podnebje, relief, hidromorfologija in njeno porečje. Na dnevni ravni ima največji

vpliv temperatura zraka ter odprtost oziroma osenčenost struge in obvodno rastlinje, vedno večji vpliv pa imajo antropogeni posegi (Baron in sod., 2003; Essig, 1998; Frantar, 2012; Richter in sod., 1997; Rivers-Moore in Jewitt, 2004). Med posegi človeka oziroma družbe lahko omenimo posege v hidromorfologijo in porečje (»urejanje« vodotokov, zajezitve, spremembe rabe tal v porečju) do neposrednih sprememb temperature vode v reki zaradi tehnološke rabe vode. Med posredne antropogene posege lahko štejemo tudi vplive podnebnih sprememb (Houghton in sod., 2003; Frantar, 2004).

Temperature vode rek, jezer in morja v širšem izažajo spremembe v porečju, na katere ima dolgoročno največji

vpliv sprememba podnebnih razmer. Spremembe globalnega podnebnja oziroma segrevanje so potrdile tudi različne analize na območju Slovenije, od naraščanja temperatur zraka, krčenja Triglavskega ledenika, zmanjševanja pojava ledu na Bohinjskem jezeru (Gabrovec, 1998; Nadbath 1999; Frantar, 2004; Frantar, 2006; Frantar, 2012; Draksler in sod., 2017 in drugi). Glede na pomembno povezavo med temperaturo zraka in vode lahko pričakujemo tudi zviševanje temperature vode zaradi globalnega segrevanja.

Analiza spreminjanja posamezne naravne spremenljivke temelji na dobrih in dolgotrajnih podatkovnih nizih. Za zanesljivo analizo trendov temperature vode potrebujemo čim daljše, polne in reprezentativne podatkovne nize večjega števila vodomernih postaj na površinskih vodah, morju in podzemnih vodah, ki jih je treba homogenizirati. Homogenizacijo podatkovnih nizov in analizo trendov temperature vode smo na Agenciji RS za okolje izvedli v okviru projekta oCena podnebnih sprememb do konca 21. stoletja (ARSO, 2016). Na temelju podatkov državne hidrološke baze (ARSO, 2017) smo opravili nabor vodomernih postaj, primernih po merilih podatkovnega niza in reprezentativnosti vodomerne postaje na površinskih vodah, podzemnih vodah ter na morju. Homogenizirane podatke smo uporabili za analizo trendov temperature vode.

Homogenizacija podatkov

Homogenizacija je postopek, s katerim s statističnimi metodami iz podatkovnih nizov odpravimo tisti del izmerjenih vrednosti, ki niso izraz podnebnih (hidroloških) značilnosti: morebitne merske napake, način merjenja, spremembe v okolici postaj, morfološke spremembe vodotokov, prelomi v nizih, ki so posledica izrednih dogodkov na merilnih postajah (npr. sprememba lokacije, drug opazovalec, menjava termometra ...) (Draksler in sod., 2017). S homogenizacijo smo v našem primeru dosegli, da podatkovni niz izraža dejansko hidrološko spremenljivost.

Postopek homogenizacije smo izvedli s programom HOMER, ki je bil razvit v okviru projekta COST ES0601 v obdobju 2007–2011 in združuje več različnih homogenizacijskih metod, uporabljen pa je bil že pri homogenizaciji podnebnih podatkov za Slovenijo (COST, 2011; Vertačnik in sod., 2015). Za homogenizacijo podatkovnih nizov smo izbrali vodomerne postaje na podlagi naslednjih meril:

- najmanj 20 let meritev temperature vode. Zapolnjeni niz meritev ni potreben;
- popolni letni nizi za 20-letno obdobje;
- čim boljše ujemanje obsega podatkovnih nizov med postajami, začetno leto ima vsaj pet postaj;
- za površinske vode in morje smo izbrali obdobje 1953–2015;
- za podzemne vode smo izbrali obdobje 1969–2015.

Začetni nabor vodomernih postaj na površinskih vodah, ki merijo temperaturo vode, je obsegal 156 postaj, na podzemnih vodah 243 in na morju pet postaj.

Po pregledu podatkov smo za homogenizacijo naredili naslednji nabor:

- 47 vodomernih postaj na površinskih vodah, ki so enakomerno geografsko razporejene po vodotokih in porečjih Slovenije;
- 18 vodomernih postaj na podzemnih vodah na Brežiškem, Krškem, Prekmurskem in Murskem polju ter na Ljubljanskem barju;
- ena vodomerne postaja na morju.

Homogenizacija temperature vode je bila narejena na mesečni ravni, zato smo iz nizov dnevni podatki izračunali povprečne mesečne vrednosti temperature vode. Pri tem smo pri postajah na površinskih vodah in morju izračunali povprečne mesečne vrednosti temperature za tiste mesece, ki so imeli podatke o temperaturi za vsaj 90 % dni v mesecu. Mesece, ki tega pogoja niso dosegli, smo obravnavali kot manjkajoče podatke. Pri podzemnih vodah smo zaradi manjših temperaturnih nihanj in manjše pogostosti rednih meritev izračunali povprečne mesečne temperature tudi za mesece, ki so imeli manj podatkov. Za izbrane postaje so bili pripravljene metapodatki, ki so nujni za kakovostno homogenizacijo. Seznam metapodatkov za posamezno postajo je obsegal: koordinate merilne postaje, lokacija postaje glede na del vodotoka/območje podzemne vode, vrste merjenja, merilni instrumenti, prekinitve merjenj, spremembe lokacij postaj in drugi zabeleženi dogodki. Pred začetkom homogenizacije smo v programu HOMER ponovno kontrolirali podatkovne nize. Pri tem smo ugotovili slabšo kakovost podatkov v preteklih obdobjih na nekaterih vodomernih postajah, zato smo izstopajoče vrednosti dodatno preverili in po potrebi izločili iz postopka homogenizacije.

Homogenizacijo v programu HOMER smo izvedli z različnimi homogenizacijskimi metodami v več krogih, da smo odpravili bolj in manj izrazite prelome v podatkovnih nizih. Rezultat celotnega postopka homogenizacije izbranih vodomernih postaj površinskih voda, morja in podzemnih voda so popravljeni in dopolnjeni podatkovni nizi za celotno obdobje 1953–2015 za površinske vode in morje ter za obdobje 1969–2015 za podzemne vode.

Trendi temperatur vode

Homogenizirani podatkovni nizi kažejo realnejšo sliko poteka temperaturnih sprememb in trendov v obravnavanem časovnem obdobju. Za vsako merilno mesto smo izračunali linearne trende in njihovo statistično značilnost. Linearni trend je bil izračunan za letna povprečja in sezonske vrednosti.

Na vseh obravnavanih vodomernih postajah imamo statistično značilen trend (Kendallov test $< 0,05$) rasti

temperature vode na letni ravni, na večini postaj pa je zaznan tudi statistično značilen trend po posameznih sezonah. Opazili smo tudi regionalne in sezonske razlike v jakosti trendov.

Trendi temperatur vode rek, jezer in morja

Temperatura vode v **rekah in jezerih** narašča. Na obravnavanih lokacijah v rekah in jezerih po Sloveniji je povprečno segrevanje v obdobju 1953–2015 +1,9 °C/100 let. Za trend povprečne letne temperature na površinskih vodah v obdobju 1953–2015 je značilno, da se segrevanje vode veča od zahoda proti vzhodu Slovenije. Naraščanje temperature se giblje med +1,1 °C/100 let na vodomerni postaji Cerkvenikov mlin na Reki in +2,6 °C/100 let na vodomerni postaji Podbočje na Krki.

Statistično značilni sezonski trendi v obdobju 1953–2015 kažejo največjo rast temperatur voda rek in jezer v poletnem in pomladnem obdobju (v obeh letnih časih za več kot +2 °C/100 let), v zimskem in jesenskem obdobju pa je trend nižji (okrog +1,5 °C/100 let). Geografska razporeditev sezonskih trendov je podobna kot pri letnem trendu in narašča praviloma v smeri od

zahoda proti vzhodu. Izjema je jesen, ko imamo večji porast na posameznih rekah zahodne Slovenije.

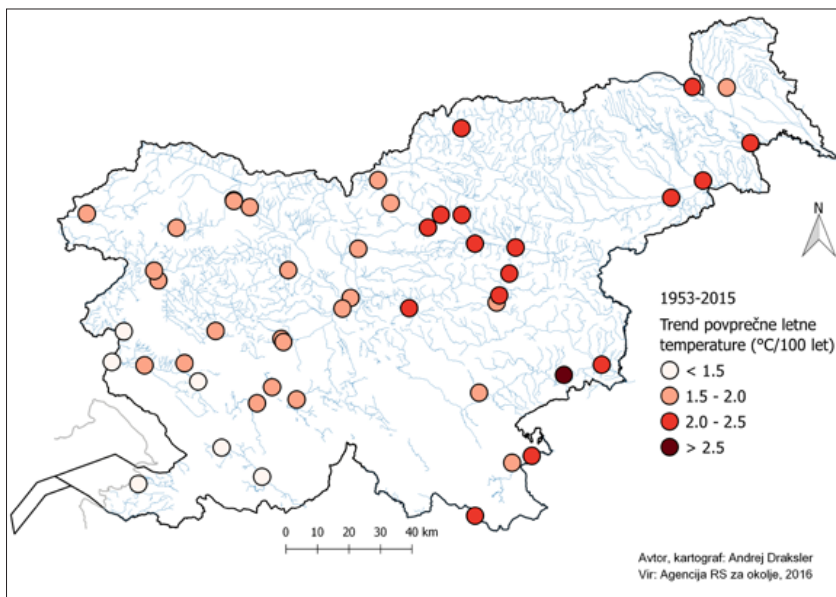
Temperatura **morja** na vodomerni postaji v Kopru kaže na trend rasti povprečne letne temperature +1,1 °C/100 let. Sezonsko segrevanje morja kaže na podoben trend rasti povprečne jesenske, zimske in poletne temperature med +1,3 °C/100 let in +1,4 °C/100 let, pomladni trend je po izračunu nižji (+2,1 °C/100 let), ni pa statistično značilen.

Trendi temperatur podzemne vode

Vodotok	Leto	Zima	Pomlad	Poletje	Jesen
Povprečje – površinske vode	+1,9	+1,6	+2,1	+2,6	+1,4
Povprečje – morje	+1,1	+1,3	ni stat. značilen	+1,3	+1,4

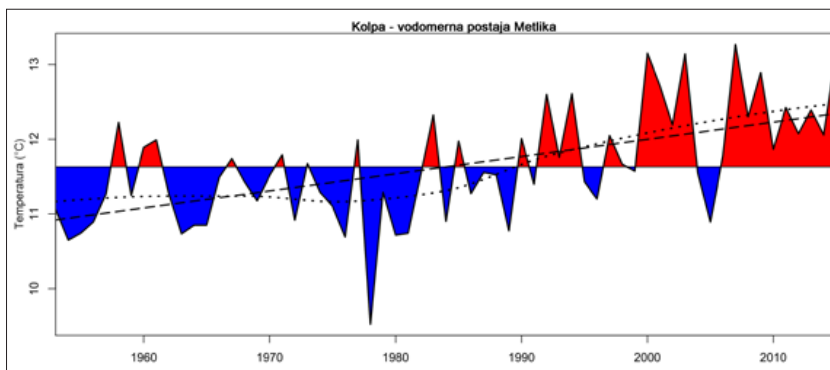
Preglednica 1: Povprečni trendi temperature vode (°C/100 let) na površinskih vodah (reke in jezeri) in morju

Table 1: Average water temperature trends (°C/100 years) for surface waters (rivers and lakes) and the sea



Slika 1:
Trendi povprečnih letnih temperatur na rekah, jezerih in morju v obdobju 1953–2015

Figure 1:
Average annual temperature trends for rivers, lakes and the sea over the period 1953–2015

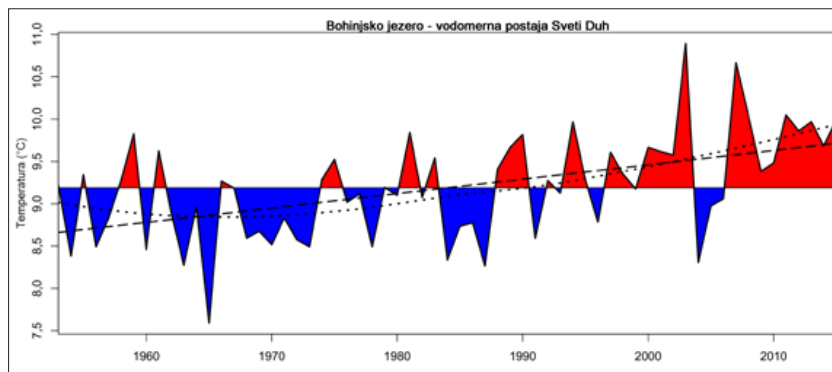


Slika 2:
Trend povprečnih letnih temperatur vode na Kolpi pri Metliki, ki je pomembna kopalna voda

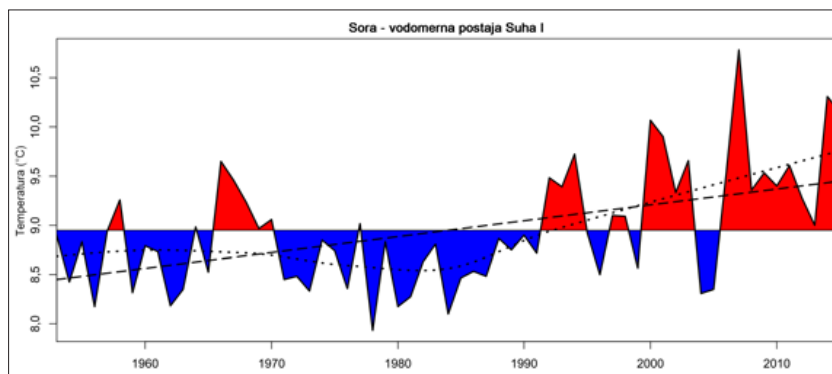
Figure 2:
Average annual water temperature trend for the river Kolpa near Metlika, which is important bathing water

Analiza trenda temperature podzemne vode zaradi praktičnih razlogov temelji na krajših podatkovnih nizih na območjih prodatih (aluvialnih) vodonosnikov s plitvejšo gladino podzemne vode. Dolgoletne meritve temperature so se namreč zaradi težav z opremo izvajale zgolj na vodonosnikih z globino vode do največ 10 m. Analiza trendov homogeniziranih podatkov je pokazala, da se povprečna letna temperatura podzemne vode

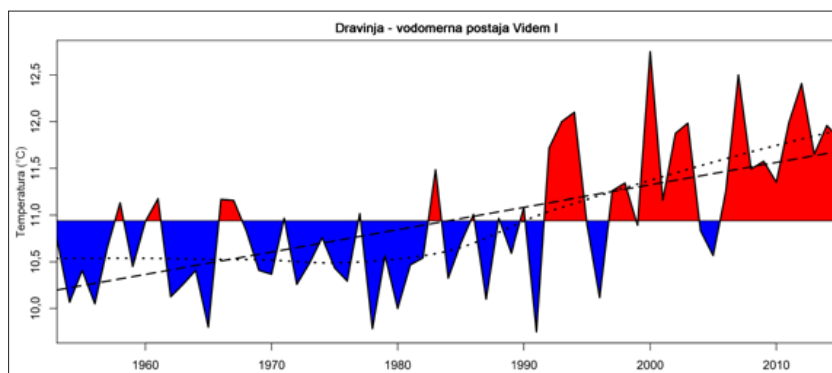
v obdobju 1969–2015 dviga za $+2,8\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ let}$. Podzemna voda ima trend rasti temperature v razponu od $+2,3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ let}$ (Ključarovci na Murskem polju) do $+3,2\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ let}$ (Brezovica na Ljubljanskem barju). Zaradi postaj, ki so povezane le s tremi vodonosniki (Prekmurje, Krško polje, Barje) opredelitev geografske razporeditve trendov širše po Sloveniji ni mogoča. Same skupine postaj na posameznih območjih pa potrjujejo,



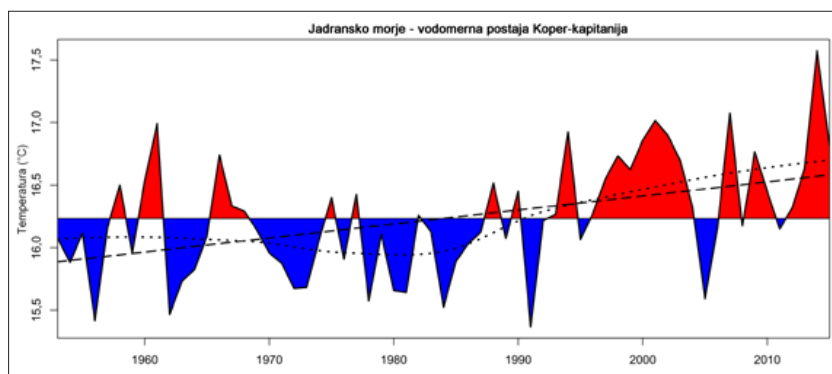
Slika 3:
Trend povprečnih letnih temperatur vode Bohinjskega jezera
Figure 3:
Average annual water temperature trend for Lake Bohinj



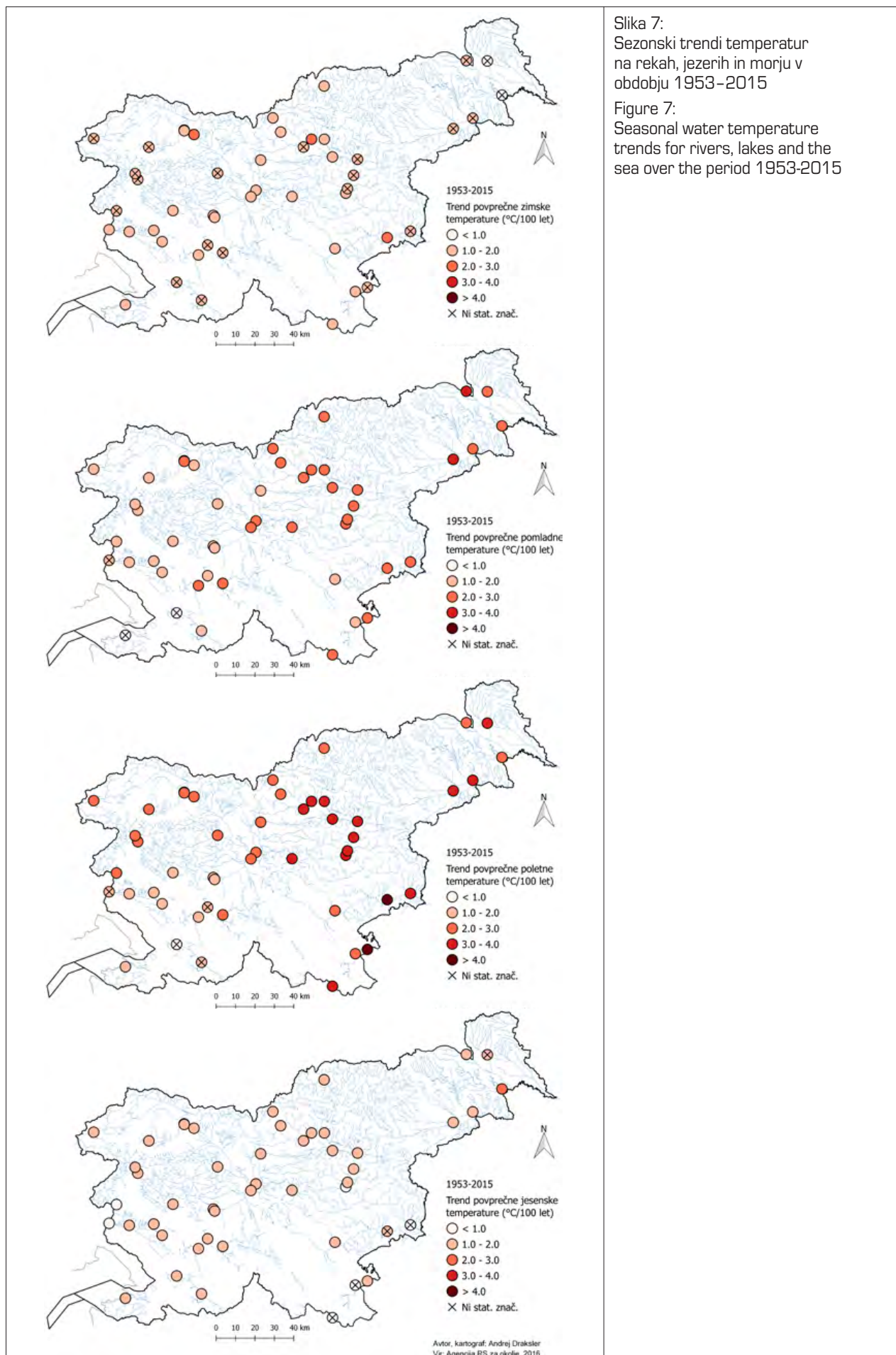
Slika 4:
Trend povprečnih letnih temperatur morja na Sori pri Suhi
Figure 4:
Average annual water temperature trend for the river Sora near Suha



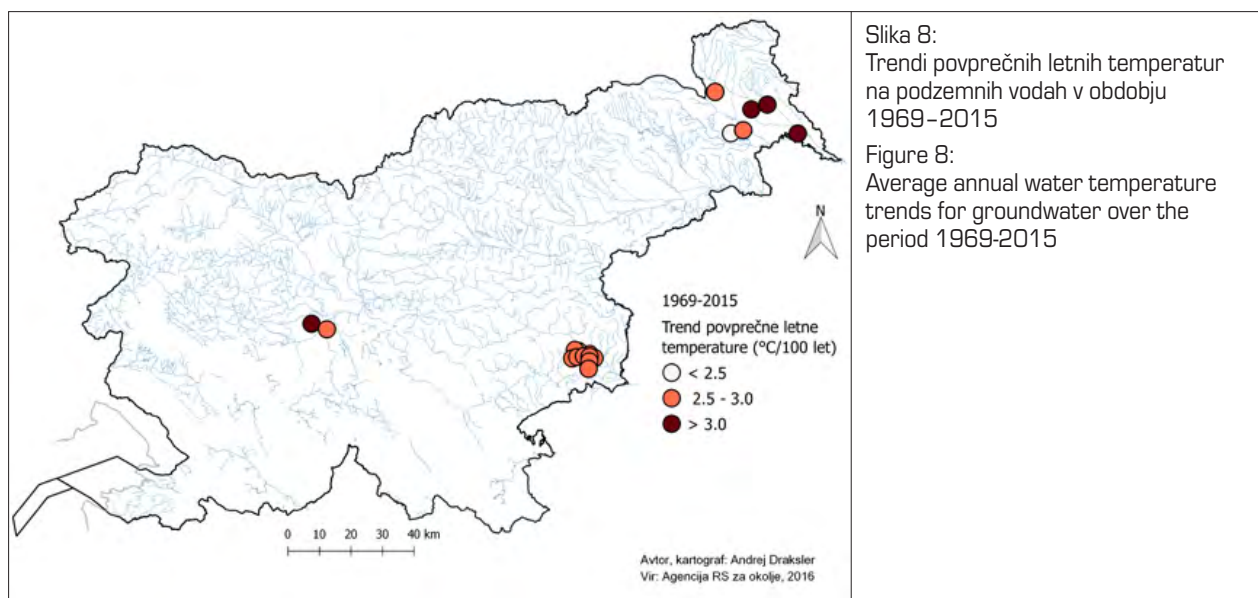
Slika 5:
Trend povprečnih letnih temperatur morja na Dravinji v Vidmu
Figure 5:
Average annual water temperature trend for the river Dravinja in Videm



Slika 6:
Trend povprečnih letnih temperatur morja v Kopru
Figure 6:
Average annual sea temperature trend in Koper



Slika 7:
Sezonski trendi temperatur
na rekah, jezerih in morju v
obdobju 1953–2015
Figure 7:
Seasonal water temperature
trends for rivers, lakes and the
sea over the period 1953–2015



da so prav zaradi podobnih trendov na posameznih območjih podatki pravilni in da so na teh območjih trendi zanesljivi. V povprečju imajo postaje na severovzhodu Slovenije (Prekmursko in Mursko polje) nekoliko višji trend (+2,9 °C/100 let) kot postaje na Krškem in Brežiškem polju (+2,7 °C/100 let). Na Ljubljanskem barju dve postaji izkazujeta dokaj različne trende, saj spremljata tudi različne horizonte podzemne vode. Postaja Črna vas beleži trend +2,6 °C/100 let, postaja Brezovica pa +3,2 °C/100 let. Natančnejši vzrok za to pa bo treba še dodatno raziskati.

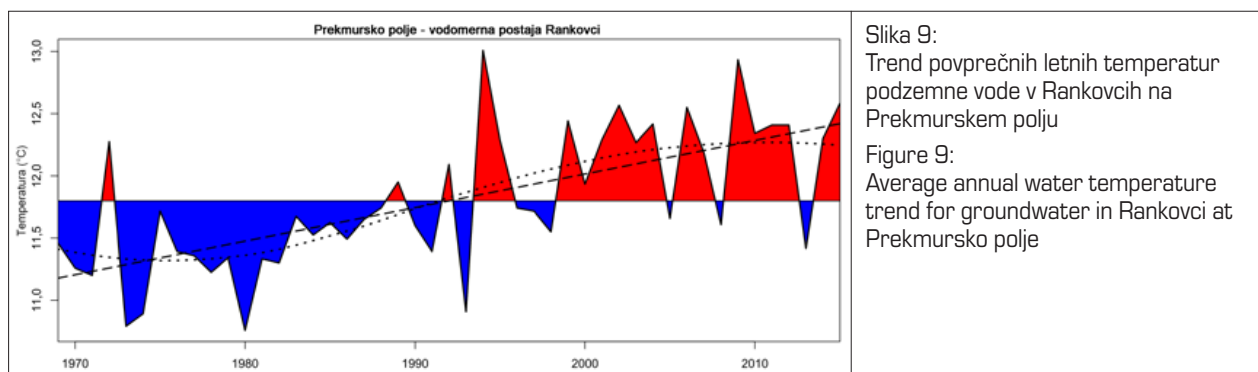
Statistično značilni sezonski trendi vseh postaj kažejo na precej močnejši trend rasti temperatur v poletnem in jesenskem obdobju kot v zimskem in pomladanskem obdobju.

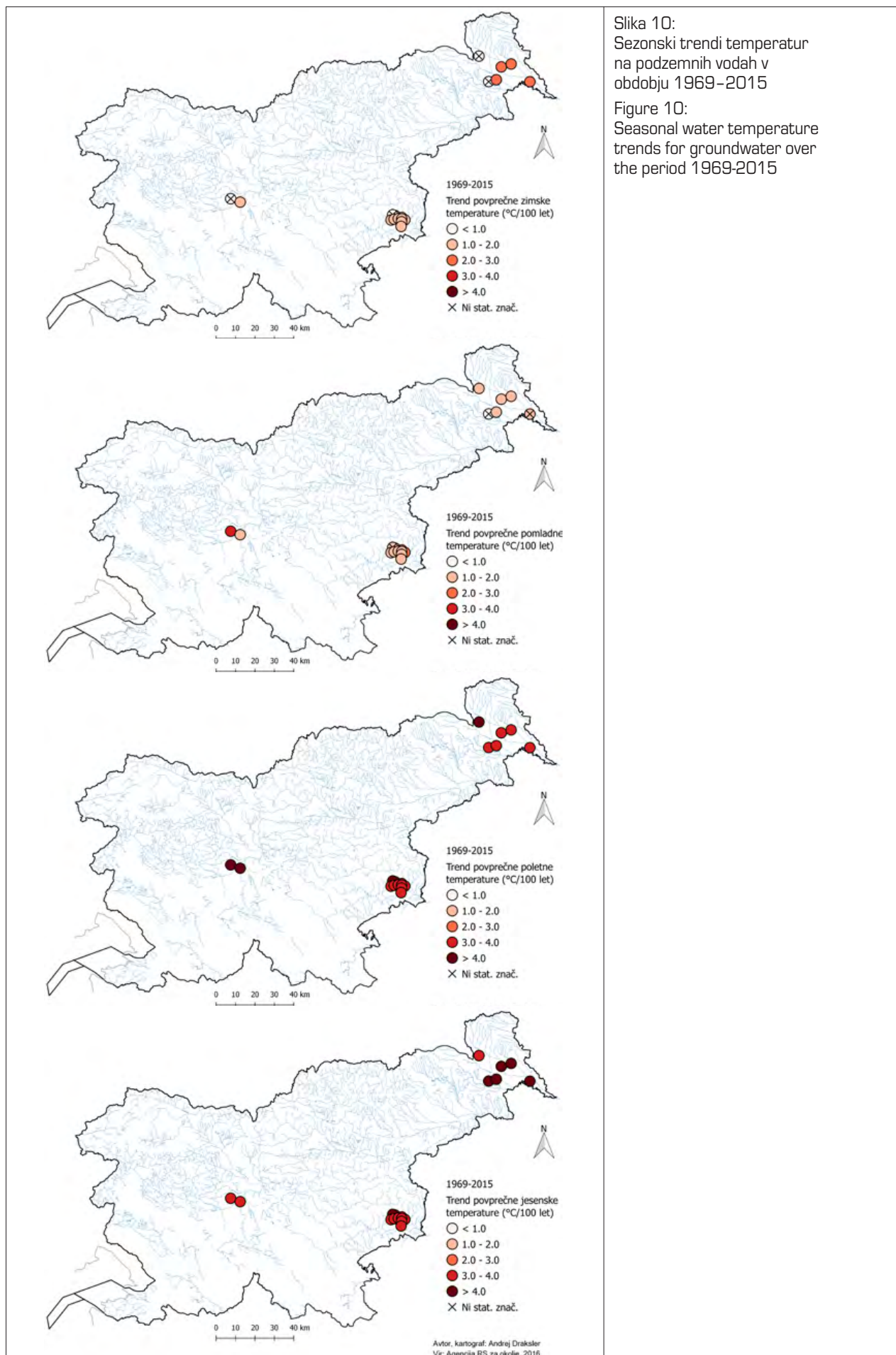
Trendi pozimi kažejo najvišjo rast temperatur vode na severovzhodu Slovenije na štirih postajah Prekmurskega in Murskega polja, kjer je trend zimskih temperatur višji od +2 °C/100 let. Na postajah Krškega in Brežiškega polja je trend med +1,6 in +1,8 °C/100 let, na Ljubljanskem barju pa +1,3 °C/100 let. Pomladni meseci kažejo na večini postaj trend med +1,6 in +2 °C/100 let. Po jakosti trenda od drugih postaj močno izstopa postaja za podzemne vode Brezovica na Ljubljanskem barju, ki ima v pomladni sezoni

statistično značilen trend rasti temperature za kar +3,2 °C/100 let. Podzemna voda na Brezovici na Ljubljanskem barju ima tudi daleč najvišji trend v poletnih mesecih (+5,3 °C), še tri postaje beležijo trend nad +4 °C/100 let (Rankovci na Prekmurskem polju, Žadovinek na Krškem polju in Črna vas na Ljubljanskem barju). Postaji za podzemne vode na Ljubljanskem barju izrazito, med +0,8 in +1,3 °C/100 let, odstopata od povprečja trenda poletnih mesecev na drugih območjih. Nasprotno pa imata postaji Ljubljanskega barja v jesenskih mesecih z rastjo povprečne temperature podzemne vode +3,4 °C/100 let nižji trend v primerjavi z drugimi območji. Podzemna voda na Brežiškem in Krškem polju ima v obdobju 1969–2015 v jeseni povprečni trend rasti temperature +3,7 °C/100 let, na Prekmurskem in Murskem polju pa kar +4,2 °C/100 let.

Sklepne misli

Temperatura vode slovenskih rek, jezer, morja in podzemne vode narašča. To potrjujejo statistično značilni trendi temperatur vode. Na obravnavanih lokacijah se v povprečju najbolj segrevajo podzemne vode, z letnim trendom v obdobju 1969–2015 +2,8 °C/100 let. Višje segrevanje na podzemnih vodah lahko pripišemo





Slika 10:
Sezonski trendi temperatur
na podzemnih vodah v
obdobju 1969–2015

Figure 10:
Seasonal water temperature
trends for groundwater over
the period 1969–2015

krajšemu obdobju analize (1969–2015), v katerem je bilo segrevanje Zemlje izrazitejše. Na površinskih vodah je analizirano obdobje 1953–2015, v katerem imajo reke z jezeri nižji trend za slabo stopinjo, in sicer + 1,9 °C/100 let, trend segrevanja morja pa je +1,1 °C/100 let.

Geografska razporeditev jakosti trendov površinskih voda kaže na splošno sliko naraščanja temperature vode od zahoda proti vzhodu Slovenije.

Avtorji se zavedamo, da je predstavljena analiza podlaga za nadaljnje delo in odpira vrsto vprašanj. V prihodnje bi bilo treba odpraviti nekatere pomanjkljivosti analiz, kot je različno obdobje površinskih in podzemnih voda. Analizo bi bilo smiselno nadgraditi z izračunom povezanosti vode s temperaturo zraka in izdelati analizo na podlagi podnebnih scenarijev, po možnosti vključiti čim širšo mrežo na podzemnih vodah, seveda z mnogo krajšimi podatkovnimi nizi, in opraviti analizo vpliva sprememb na ekosisteme.

Viri in literatura

1. ARSO – Agencija RS za okolje, 2016: Projekt Ocena podnebnih sprememb v 21. stoletju. Interno gradivo. Ljubljana.
2. ARSO – Agencija RS za okolje, 2017: Baza hidroloških podatkov.
3. Baron, J. S., LeRoy Poff, N., Angermeier P. L., Dahm C. N., Gleick P. H., Hairston N. G., Jackson, R. B., Johnston, C. A., Richter B. D., Steinman A. D., 2003. Sustaining Healthy Freshwater Ecosystems. Issues in Ecology, Number 10, Winter 2003. Ecological Society of America. Watershed Academy Web, US Environmental Protection Agency. Medmreže: <http://www.epa.gov/watertrain> (6/1/2005).
4. Draksler, A., 2016. Poročilo izvedbe 5. sklopa nalog v okviru »Homogenizacije podatkovnih nizov temperatur vode ter analize trendov na površinskih vodah, podzemnih vodah in morju«, interno poročilo. Agencija RS za okolje, Ljubljana.
5. Draksler, A., Frantar, P., Savič, V., Vertačnik, G., 2017. Trendi temperatur vode v Sloveniji. V: Drugi slovenski kongres o vodah 2017, zbornik, ur.: Globevnik L., Širca, A., str. 285–290. http://www.kongresvode2017.si/zbornik/zbornik_sklop_2.pdf (10/2/2018)
6. Essig, D. A., 1998. The dilemma of applying uniform temperature criteria in a diverse environment: an issue analysis. Idaho Division of Environmental Water Quality. Boise. Medmrež je: http://www.deq.idaho.gov/water/data_reports/surface_water/monitoring/temp_criteria_analysis.pdf (15. 5. 2008).
7. Frantar, P., 2004. Analiza temperaturnega režima in pojava ledu na Bohinjskem jezeru. Ujma 17–18. Ljubljana. <http://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/2004/analiza.pdf>
8. Frantar, P., 2012. Temperaturni režimi rek v Sloveniji v obdobju 1976–1990 in spremembe režimov v obdobju 1991–2005. V: Geografski vestnik 84–2, 2012, str. 11–28. http://zgs.zrc-sazu.si/Portals/8/Geografski_vestnik/gv_84-2_frantar.pdf.
9. Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C. A., 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge, Cambridge University Press. Povzeto po: http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/ (21. 2. 2003)
10. Leize, C. L. R., Meredith, C. B., Dunbar, M. J., Hannah, D. M., 2017. Climate and basin drivers of seasonal river water temperature dynamics. Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 3231–3247, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-21-3231-2017>.
11. Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Wigington, R., Braun, D. P., 1997. How much water does a river need? Freshwater Biology 37. Oxford. DOI: 10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x
12. Rivers-Moore, N. A., Jewitt, G. P. W., 2004. Intra-annual thermal patterns in the main rivers of the Sabie Catchment, Mpumalanga, South Africa. Water SA 30. <http://www.ajol.info/in dex.php/wsa/ar tic le/view File/5096/12686> (17. 3. 2009).
13. Vertačnik, G., Vičar, Z., Bertalančič R., 2015. Podnebna spremenljivost Slovenije v obdobju 1961–2011. 2. Kontrola in homogenizacija podnebnih podatkov. Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje.