

UDK/UDC: 551.448:556.342(497.4)

Prejeto/Received: 09.04.2020

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 26.05.2020

KRAŠKI IZVIRI V SLOVENIJI: ANALIZA TRENDOV

KARST SPRINGS IN SLOVENIA: TREND ANALYSIS

Maja Jelen¹, Matjaž Mikoš², Nejc Bezak^{2,*}

¹ Direkcija Republike Slovenije za vode, Hajdrihova ulica 28 c, Ljubljana, Slovenija

² Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova 2, Ljubljana, Slovenija

Izvleček

Kraški izviri in vodonosniki so pomemben vir pitne vode, zato je poznavanje dinamike sprememb hidroloških značilnosti kraških izvirov še kako pomembno. V prispevku predstavljamo analizo hidroloških trendov, ki smo jo izvedli za 14 izbranih kraških izvirov na območju Slovenije. Za obdobje od leta 1961 do 2013 so bili analizirani trendi najmanjših, srednjih in največjih letnih pretokov. Dodatno smo analizirali trende padavin, temperature vode in temperature zraka. Preučili smo tudi odvisnost med padavinami in pretoki ter temperaturo vode in zraka. Ugotovili smo, da se najmanjši in srednji letni pretoki zmanjšujejo. Pri analizah največjih letnih pretokov ni bilo mogoče zaznati izrazitega padajočega ali naraščajočega trenda. Za temperaturo zraka so bili rezultati trenda pozitivni in statistično značilni z izbrano stopnjo značilnosti. Na nekaterih padavinskih postajah se je pokazalo izrazito upadanje letne količine padavin. Ker je odvisnost med letno količino padavin in povprečnimi letnimi pretoki relativno visoka, je ravno zmanjševanje padavin ob višji temperaturi lahko razlog za zmanjševanje malih in srednjih pretokov. Poleg tega so zadrževalni časi kraških izvirov relativno kratki. Ker so obravnavani kraški izviri v večji meri na območjih, kjer v poletnih mesecih pogosto prihaja do težav s preskrbo s pitno vodo, lahko ob podobni dinamiki procesov tudi v prihodnosti pričakujemo težave s pomanjkanjem vode, kar nakazujejo tudi izračuni podnebnih modelov.

Ključne besede: kraški izviri, Slovenija, trendi, pretoki, Mann-Kendallov test.

Abstract

Karst springs and aquifers are important sources of drinking water, so knowledge about the dynamics of changes in the hydrological characteristics of karst springs is especially important. This paper presents a hydrological trend analysis conducted for 14 karst springs in Slovenia. The trends of low, mean, and high annual flows were analyzed for the period from 1961 to 2013. Additionally, changes in annual rainfall, air temperature, and water temperature were investigated. The relationship between precipitation and discharges was also examined, as well as that between water and air temperature. Results indicate that low and mean flows in the selected springs are decreasing. In the case of high flows, no significant decreasing or increasing trend could be detected. For air temperature, the trend results were positive and statistically significant with the selected significance level. Some precipitation stations showed a significant decrease in the annual rainfall. Because the relationship between annual precipitation and mean flows is relatively high, the rainfall decrease

* Stik / Correspondence: nejc.bezak@fgg.uni-lj.si

© Jelen M. et al.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0.](#)

© Jelen M. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – NonCommercial – ShareAlike 4.0 Licence.](#)

could be the main reason for the decrease in low and mean flows. Moreover, the retention times of karst springs are relatively short. Some of the investigated springs are located in the Mediterranean part of the country where issues with drinking water supply occur commonly in the summer. If a similar dynamic continues, water scarcity problems can be expected in the future. The climate change models also predict such dynamics.

Keywords: karst springs, Slovenia, trends, discharge, Mann-Kendall test.

1. Uvod

Kras ima pomemben vpliv na hidrološki krog, saj pokriva približno 25 % celotne površine Zemlje (Bonacci, 1987), v Sloveniji kar 43 % površine (Gams, 2004). V Sloveniji so kraški izviri, ki se pojavljajo na stikih neprepustnih in prepustnih kamninskih plasti, relativno pogosti in pomembni z vidika vodooskrbe, ki je na območju slovenske Istre še posebej občutljiva na vpliv podnebnih sprememb na elemente hidrološkega kroga (npr. Krajnc in Kryžanowski, 2019). Zato je pomembno imeti vedenje o spremembah v hidroloških značilnostih teh izvirov (Bonacci et al., 2017). Dodatno je lahko za razumevanje hidroloških procesov na kraških območjih uporabno tudi hidrološko modeliranje (npr. Sezen et al., 2018). Razumevanje vplivov podnebnih sprememb na kraške vodonosnike, ki so na morebitne spremembe še posebej občutljivi, je relativno omejeno (npr. Ravbar et al., 2017). Bertalanič et al. (2018) podajajo oceno vpliva podnebnih sprememb na posamezne elemente vodne bilance v Sloveniji. Sapač et al. (2019) so se osredotočili na izbrana porečja s kraškimi značilnostmi, kjer so uporabili izračune različnih podnebnih modelov, poudarek je bil na analizah malih in velikih pretokov. Ugotovili so, da bi lahko manjše količine padavin v poletnih mesecih povzročile še manjše male pretoke, kar bi posledično vplivalo na ranljivost kraškega območja (Sapač et al., 2019). V omenjeni študiji so bili za oceno sprememb v prihodnosti uporabljeni izračuni podnebnih modelov. Pri drugem pristopu za preučevanje sprememb uporabljamo podatke meritev (npr. Bonacci et al., 2017). Na ta način je Oblak (2017) ugotovil, da se srednji letni pretoki v Sloveniji v glavnem zmanjšujejo. Pregled vrednotenja sprememb v hidrometeoroloških ekstremih v Sloveniji so naredili še Šraj et al. (2019), dodaten pregled literature in objavljenih študij je naredila Jelen (2019). Nobena od preteklih

študij ni posebej sistematično obravnavala kraških izvirov. Kraški izviri Slovenije so sicer že bili predmet obsežnega raziskovanja, o posameznih izvirihih je bilo objavljenih veliko rezultatov raziskav in terenskih študij: npr. o strukturno-geoloških in hidrogeoloških razmerah izvirov Moznice (Čar in Janež, 1992), o hidrogeološkem sistemu reke Timave (Civita et al., 1995), o hidrologiji kraškega izvira Gradole v Istri (Bonacci, 1996), o geoloških razmerah in hidrogeoloških značilnostih kraških izvirov Vipave (Janež in Čar, 1997), o velikih kraških izvirihih v zgornjem Posočju (Janež, 2002), o hidrogeoloških razmerah v napajalnem zaledju izvirov Kroparice pod Jelovico (Brenčič, 2003), o upravljanju kraških voda v Sloveniji v okviru kartiranja občutljivosti (Ravbar in Kovačič, 2006) in o sekvenčni analizi trendov pretokov izvirov Vipave (Pavlič in Brenčič, 2011). Navedeni prispevki niso obravnavali pretokov (izdatnosti izvirov) kot glavni raziskovalni problem.

Glavni namen tega prispevka je bila analiza in vrednotenje sprememb v hidroloških podatkih izbranih kraških izvirov v Sloveniji z razpoložljivimi podatki večletnih meritev. Analizirali smo trende malih, srednjih in velikih pretokov ter temperature vode in padavin na pripadajočih padavinskih postajah. Prispevek povzema rezultate magistrske naloge, ki jo je izdelala Jelen (2019).

2. Material in metode

V Sloveniji so kraški izviri najpogostejši na porečjih Soče in Save in njunih podporečjih Idrijce, Vipave, Tolminke, Ljublanice, Savinje, Krke, Kolpe (Gams, 2004). Po virih, ki jih citira Jelen (2019), naj bi bilo v Sloveniji več kot 10.000 izvirov. V okviru raziskave smo izvedli analize trendov pretokov in temperature vode izbranih kraških izvirov v Sloveniji, kjer smo imeli na voljo podatke meritev. V okviru državnega hidrološkega monitoringa, ki ga

izvaja Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO), se meritve pretokov in vodostajev na samih izvirih le redko izvajajo, zato smo v raziskavo vključili izvire, kjer so vodomerno postaje v neposredni bližini in odražajo lastnosti zaledja izvirov. Izbrani kraški izviri s pripadajočo vodomerno postajo in reprezentativno meteorološko postajo so prikazani v preglednici 1 in prostorsko na sliki 1. Obravnavali smo časovno obdobje 1961–2013, pri čemer so imeli nekateri izviri nekoliko krajši niz podatkov: Bistrica v Bohinjski Bistrici od leta 1969, Rižana od leta 1966 in Stržen od leta 1962. Uporabili smo podatke srednjih dnevnih pretokov, le za izvire Bistra, Bistrica v Ilirski Bistrici, Stržen in Malenščica smo uporabili podatke o srednjem dnevnem vodostaju. Z izjemo Stržena imajo ostale omenjene postaje na voljo tudi podatke o pretokih, a imajo ti večji delež manjkajočih vrednosti kot podatki o vodostajih. Treba je poudariti, da se je način izvajanja meritev v izbranem obdobju spreminjal in da to lahko vpliva tudi na dnevne vrednosti pretokov oziroma vodostajev, ki smo jih uporabili. V preteklosti so bile dnevne vrednosti na primer določene na podlagi trenutnih opazovanj, kasneje na podlagi povprečja zveznih meritev v enem dnevu. Kljub temu smo v okviru tega prispevka predpostavili, da sprememba načina meritev bistveno ne vpliva na rezultate trendov, saj smo se osredotočili na male, srednje in velike letne pretoke. V nekaterih primerih je lahko razlika med dnevno vrednostjo ob izbrani uri in povprečno dnevno vrednostjo na podlagi zveznih meritev relativno velika. Takšen primer so hudourniki ob nastopu hudourniških poplav. Uporabili smo podatke, ki so javno dostopni na spletni strani ARSO (Hidrološki arhiv) in ki so opredeljeni kot dnevne vrednosti. V omenjeni kategoriji so podani tako podatki o vodostajih (cm) kot o pretokih (m^3/s). Dodatne informacije o načinu določanja pretokov za različna obdobja so na voljo na spletni strani ARSO (Mesečne statistike). Na meritve vodostajev lahko vplivajo tudi morebitne spremembe v okolici merilnega mesta, kot so

postavitve talnih ali prečnih pragov in erozijski procesi v strugi. Ti vplivi so lahko bolj izraziti v primeru malih pretokov, medtem ko je v primeru velikih pretokov vpliv manjši. Ker s takšnimi informacijami nismo razpolagali, smo predpostavili, da bi morebitne večje vplive lahko zaznali v okviru izvajanja analiz. Dodatno smo za sedem od 14 izvirov analizirali tudi podatke o temperaturi vode za enotno razpoložljivo obdobje od leta 1982 do 2007 (preglednica 1). Enotno razpoložljivo obdobje je bilo določeno na podlagi upoštevanja razpoložljivosti podatkov na vseh postajah, kjer se meri tudi temperatura vode. Manjkajoče podatke smo z metodo linearne korelacije (Jelen, 2019) nadomestili s podatki z najbližje sosednje postaje.

Pri analizi podatkov smo se osredotočili na naslednje spremenljivke: najmanjši letni pretoki (najmanjši pretok v letu), srednji letni pretoki, največji letni pretoki (največji pretok v letu), najnižje letne vrednosti temperature vode, srednje letne vrednosti temperature vode, najvišje letne vrednosti temperature vode, srednje letne vrednosti temperature zraka in letne vsote padavin (Jelen, 2019). Za analize trendov smo uporabili linearno regresijo in Mann-Kendallov statistični test (Jelen, 2019). Mann-Kendallov statistični test je eden najpogosteje uporabljenih testov za zaznavanje sprememb v hidroloških podatkih (npr. Burn in Hag Elnur, 2002; Kundzewicz in Robson, 2004; Morlot et al., 2019). V vseh primerih je bila za zaznavanje statistično značilnih trendov uporabljena stopnja značilnosti 0,05. Dodatno smo za določitev t. i. prelomnih točk v časovnih vrstah uporabili Pettittov test (Jelen, 2019). Test smo uporabili na podatkih o srednjih letnih pretokih. Z uporabo tega testa smo določili leto, ki časovno vrsto podatkov najbolje razdeli v dve podvrsti. Zato lahko sklepamo, da je v tem letu morda prišlo do spremembe (antropogene ali naravne), ki vpliva na značilnosti podatkov. Dodatne informacije in več literature o uporabljenem testu podaja Jelen (2019).

Preglednica 1: Obravnavani kraški izviri in njihove značilnosti (povzeto po Jelen, 2019).

Table 1: Analysed karst springs and their characteristics (Adopted from Jelen, 2019).

Izvir	Vodomerna postaja	Nadmorska višina [m. n. m]	Površina zaledja [km ²]	Podatki o temp. vode	Met. postaja
Hubelj	Ajdovščina I	81,15	93,14	DA	Postojna
Vipava	Vipava I	43,55	131,9	DA	Postojna
Idrija	Podroteja I	327,05	112,84	DA	Postojna
Bistrica	Bohinjska Bistrica	507,5	13,52	NE	Radovljica, Lesce
Rižana	Kubed II	61,13	204,66	NE	Kubed, Letališče Portorož
Bistrica	Ilirska Bistrica	396,7	23,92	NE	Postojna
Stržen	Gorenje Jezero	545,99	ni določena	NE	Postojna
Ljubljana	Vrhnika	285,93	1135,12	DA	Ljubljana Bežigrad
Ljubija	Verd I	286,28	ni določena	DA	Ljubljana Bežigrad
Bistra	Bistra I	286,63	ni določena	NE	Ljubljana Bežigrad
Malenščica	Malni	444,86	ni določena	NE	Postojna
Unica	Hasberg	444,88	ni določena	DA	Postojna
Krka	Podbukovje	259,22	348,06	NE	Novo mesto
Prečna	Prečna	163,82	295,19	DA	Novo mesto



Slika 1: Obravnavani kraški izviri na karti Slovenije (povzeto po Jelen, 2019).

Figure 1: Analysed karst springs on a map of Slovenia (Adopted from Jelen, 2019).

3. Rezultati in razprava

3.1 Trendi srednjih letnih pretokov ali vodostajev

Slika 2 prikazuje rezultate Mann-Kendallovega testa za srednje letne pretoke oziroma vodostaje. V primeru izvira Bistre smo ugotovili, da zaradi spremembe nulte kote vodomerne postaje (Jelen, 2019) ne moremo ustrezno določiti trenda, zato rezultati za to postajo niso prikazani. Skoraj v vseh primerih se srednji letni pretoki zmanjšujejo. Za 12 od 13 izvirov je izračunani trend tudi statistično značilen z izbrano stopnjo značilnosti 0,05. Na podlagi predstavljenih rezultatov lahko zaključimo, da se srednji letni pretoki oziroma vodostaji večinoma zmanjšujejo. Ti rezultati so skladni z ugotovitvami, ki jih je dobil Oblak (2017), ki je analiziral srednje letne pretoke na več vodomernih postajah po Sloveniji. Dodatno smo analizirali spremembe med dvema podvrstama, in sicer med obdobjema od leta 1961 do 1982 in od leta 1983 do 2013 (preglednica 2). Podobne analize so izvedli tudi Bonacci et al. (2017). Leto delitve niza podatkov v dva dela je bilo določeno na podlagi Pettittovega testa (Jelen, 2019), kjer je bilo leto 1982 največkrat določeno oziroma zaznano kot točka nenadne spremembe. Rezultati Pettittovega testa v preglednici 2 potrjujejo rezultate Mann-Kendallovega testa.

3.2 Trendi največjih letnih pretokov ali najvišjih vodostajev

Rezultati Mann-Kendallovega testa za največje letne pretoke oziroma najvišje vodostaje so prikazani na sliki 3. Za devet od 13 obravnavanih izvirov je trend negativen, za ostale pa pozitiven. Za šest postaj z negativnim trendom je trend tudi statistično značilen z izbrano stopnjo značilnosti 0,05. Dve postaji (Bohinjska Bistrica in Prečna) imata statistično značilen naraščajoči trend pri stopnji značilnosti 0,05. Za največje letne pretoke oziroma vodostaje tako ne moremo določiti enoznačnega trenda. Podobne ugotovitve je pri analizi največjih letnih pretokov z več kot 50 postaj v Sloveniji dobila tudi Šraj et al. (2016). Razlog za takšne rezultate je morda dejstvo, da so izbrane postaje vseeno precej oddaljene, do največjih letnih

pretokov pogosto pride zaradi relativno lokalnih padavinskih dogodkov.

3.3 Trendi najmanjših letnih pretokov ali najnižjih vodostajev

Pri najmanjših letnih pretokih oziroma najnižjih vodostajih smo dobili padajoči trend za 12 od 13 postaj (slika 4). V 11 primerih je trend tudi statistično značilen z izbrano stopnjo značilnosti 0,05. Za en izvir (Stržen) je bil zaznan pozitiven, a statistično neznačilen trend. Rezultati kažejo, da se najmanjši letni pretoki oziroma najnižji vodostaji v kraških izvirovih večinoma zmanjšujejo, kar je možna posledica zmanjševanja količine padavin in dviga temperature zraka. Do podobnih ugotovitev je prišel tudi Oblak (2017), ki je obravnaval male pretoke na več vodomernih postajah po Sloveniji. Ugotovitve teh analiz so pomembne, saj lahko kraški vodonosniki v poletnih mesecih predstavljajo pomemben vir pitne vode (Ravbar, 2010). Kot je bilo omenjeno že v uvodnem delu, so nekatera območja, kjer so pomemben vodni vir kraški izviri, še posebej ogrožena (npr. Krajnc in Kryžanowski, 2019). Tudi v prihodnosti lahko pričakujemo zmanjševanje najmanjših letnih pretokov, torej zmanjševanje izdatnosti potencialnih vodnih virov v poletnih mesecih, saj tako nakazujejo tudi rezultati hidrološkega modeliranja z upoštevanjem izračunov globalnih in regionalnih podnebnih modelov (Sapač et al., 2019).

3.4 Trendi temperature vode

Analizo trendov temperature vode smo izvedli za obdobje od leta 1982 do 2007 za postaje, kjer so bili podatki o temperaturi vode na voljo. Rezultati Mann-Kendallovega testa za srednje, najvišje in najnižje letne temperature vode so prikazani v preglednici 3. Vidimo, da se srednje letne temperature vode v obravnavanem obdobju povečujejo v petih od sedmih izvirov. V treh primerih je zaznan trend tudi statistično značilen z izbrano stopnjo značilnosti 0,05. Podobni rezultati so tudi za najnižje letne temperature vode, kjer je bil za štiri postaje zaznan statistično značilen pozitiven trend (preglednica 3). Pri najvišjih letnih temperaturah vode rezultati niso enoznačni, in sicer je bil za štiri postaje zaznan negativen trend, za tri

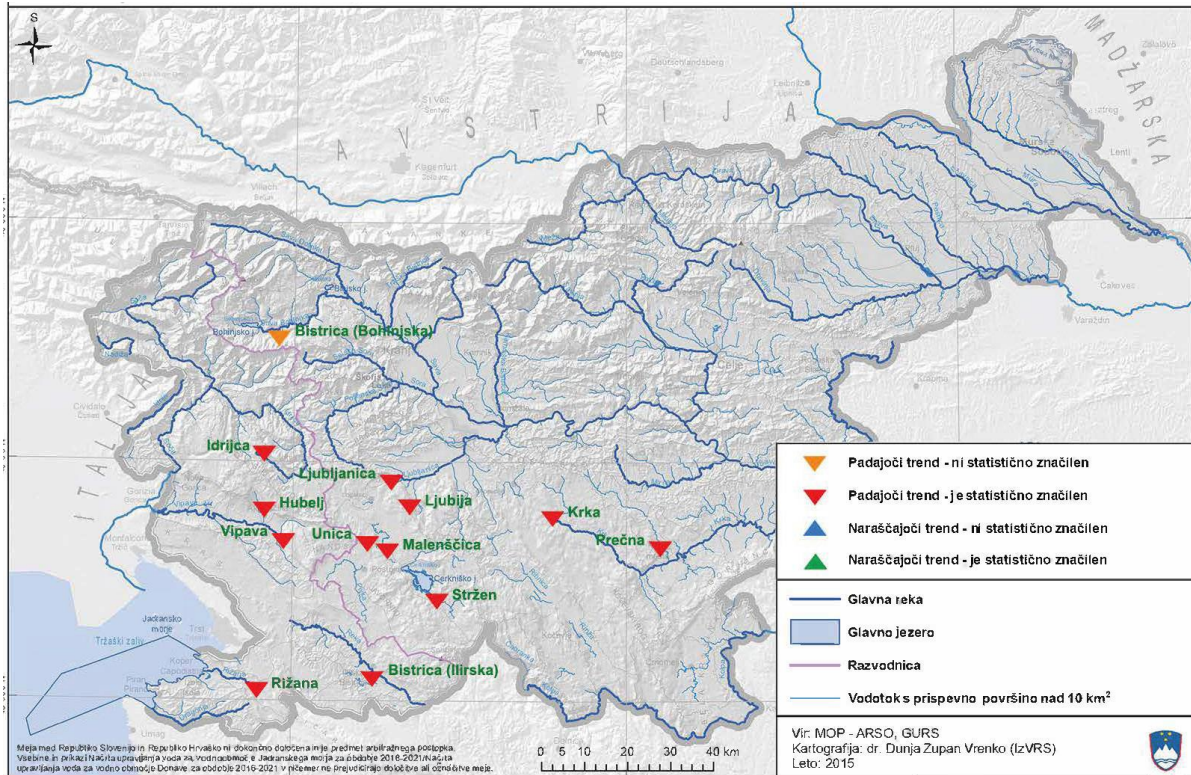
postaje pa pozitiven. Skoraj vsi trendi so bili statistično značilni z izbrano stopnjo značilnosti 0,05. V preglednici 3 so prikazane tudi vrednosti trenda srednjih letnih temperatur vode na desetletje, ki so z izjemo dveh postaj (na Ljubiji in Unici) povsod pozitivne. Povprečna vrednost trenda srednje letne temperature vode obravnavanih postaj znaša 0,23 °C na desetletje, kar pomeni, da se voda izvirov segreva. Razlog za takšne rezultate je verjetno zviševanje temperature zraka.

3.5 Trendi padavin in temperature zraka ter vpliv na kraške izvire

Dodatno smo analizirali trende temperature zraka in letnih padavin za obdobji kot pri temperaturi vode oziroma pretoku (preglednica 4) ter preučili odvisnosti med padavinami in pretoki kraških izvirov ter med temperaturo zraka in temperaturo vode. Za vse postaje so trendi srednje letne temperature zraka pozitivni in statistično značilni z izbrano stopnjo značilnosti 0,05. Podobne trende ugotavljajo Bertalanč et al. (2018) v drugih delih države, tudi podnebni modeli za prihodnost napovedujejo dvig temperature zraka (Bertalanč et al., 2018). Pri analizi letne količine padavin opazamo, da se ta na dveh postajah rahlo povečuje, na treh pa zmanjšuje. To zmanjševanje je relativno izrazito (preglednica 4), še posebej za postaji Portorož in Postojna, torej za območje slovenske Istre, ki ima v poletnih časih težave z oskrbo s pitno vodo (npr. Krajnc in Kryžanowski, 2019).

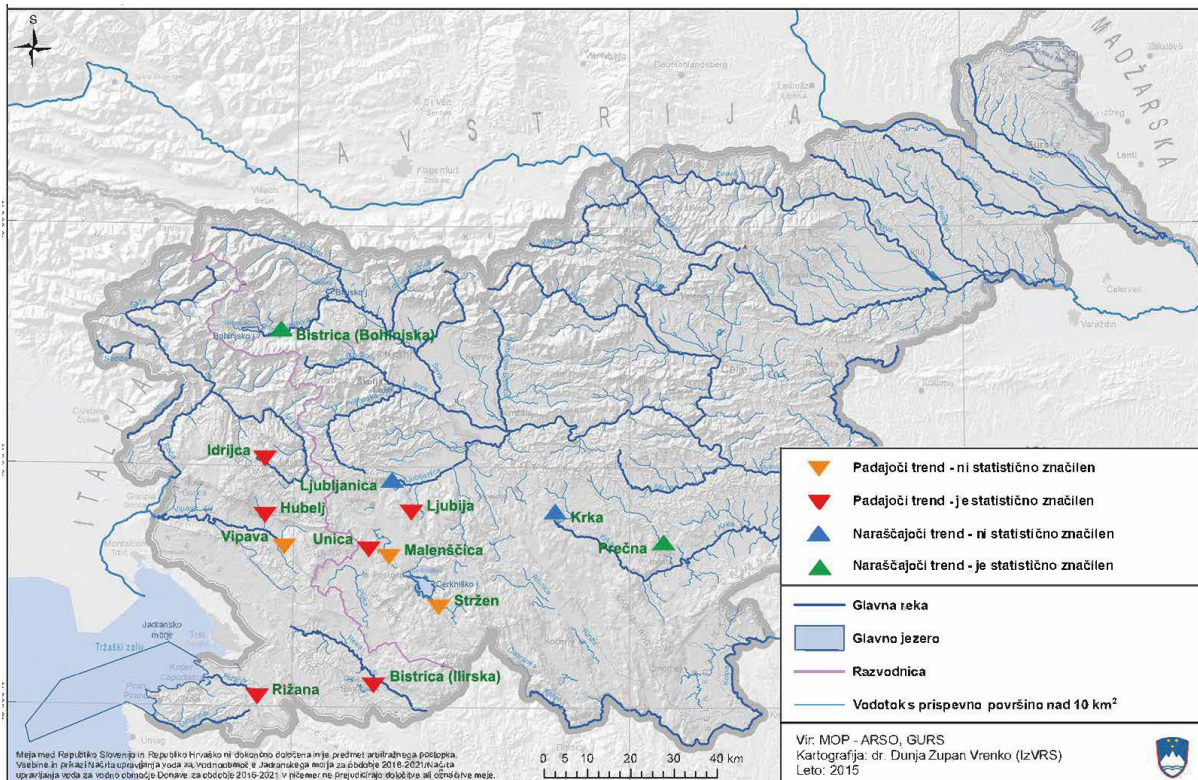
Analize odvisnosti med letnimi količinami padavin in povprečnimi letnimi pretoki so pokazale relativno visoko odvisnost med tema dvema spremenljivkama, kjer so vrednosti Pearsonovega koeficienta korelacije znašale tudi do 0,8. Primer takšne odvisnosti je prikazan za izvir Hubelj in

meteorološko postajo Postojna (slika 5). Ti rezultati nakazujejo na dejstvo, da hidrološke razmere na kraških izviri v veliki meri pogojujejo meteorološke razmere. Relativno visoka odvisnost tudi pomeni, da padavinske razmere v določenem letu vplivajo na količino vode v tem letu. Posledično kraške lastnosti terena (npr. relativno hitro podpovršinsko gibanje vode v primerjavi z medzrnskimi vodonosniki) pripeljejo do relativno kratkih zadrževalnih časov, kar je potrdila analiza na podlagi izotopskih meritev (Rusjan et al., 2019). Izotopske analize so namreč pokazale, da so zadrževalni časi znašali med 0,34 in 0,74 leta za obravnavane kraške izvire in ponore na porečju Ljubljance (Rusjan et al., 2019). Treba je poudariti, da niso bili obravnavani vsi izviri, ki so analizirani v tej študiji. To pomeni, da so zadrževalni časi za izbrane kraške izvire, ki so prikazani v preglednici 1, lahko nekoliko krajši ali daljši. Iz tega izhaja, da se manjša letna količina padavin v nekaterih primerih odrazi v manjši količini vode v kraških izviri še v istem koledarskem letu. V primeru daljših zadrževalnih časov se manjša količina padavin odraža na manjših pretokih v naslednjih letih, kar bi lahko pokazale analize. Za primer izvira Hubelj in postaje Vrhnika smo izračunali 1-, 2-, 3-, 4-, 5- in 10-letno drseče povprečje povprečnih letnih pretokov in padavin za postaji Postojna in Vrhnika. Ugotovili smo, da se v teh dveh primerih odvisnost med pretoki in padavinami zmanjšuje z daljšanjem obdobja, ki ga upoštevamo pri izračunu drsečega povprečja. V primeru izvira Hubelj je tako odvisnost v primeru uporabe 10-letnega povprečja v primerjavi z uporabo letnih podatkov pribl. 50 % manjša, v primeru postaje Vrhnika pa pribl. 30 % manjša.



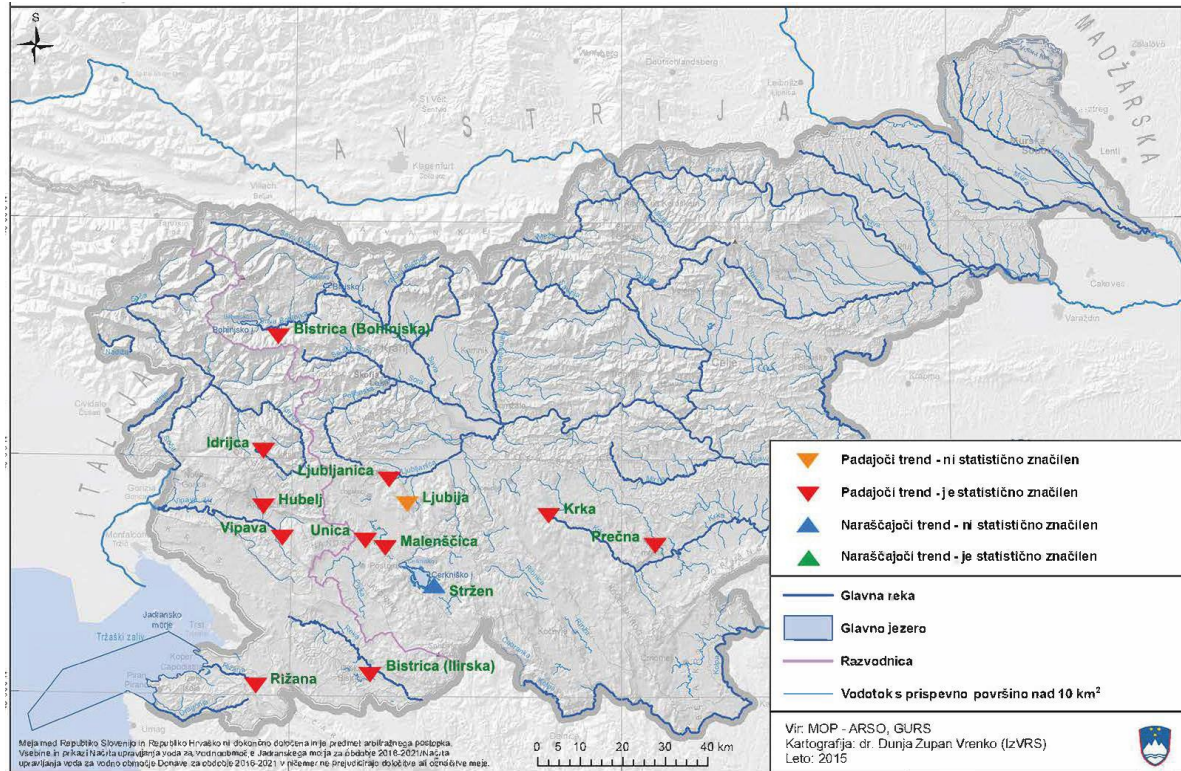
Slika 2: Trendi srednjih letnih pretokov za analizirane izvire (povzeto po Jelen, 2019).

Figure 2: Trend results for the mean annual flow of the selected karst springs (Adopted from Jelen, 2019).



Slika 3: Trendi največjih letnih pretokov za izbrane izvire (povzeto po Jelen, 2019).

Figure 3: Trend results for the annual maximum flows of the selected karst springs (Adopted from Jelen, 2019).



Slika 4: Trendi najmanjših letnih pretokov za izbrane izvire (povzeto po Jelen, 2019).

Figure 4: Trend results for the minimal annual flows of the selected karst springs (Adopted from Jelen, 2019).

Preglednica 2: Razlika v srednjih letnih pretokih ali vodostajih za dve podvrsti (1961–1982 in 1983–2013) (povzeto po Jelen, 2019).

Table 2: Differences between two sub-series of mean annual discharge/water level (1961–1982 in 1983–2013) (Adopted from Jelen, 2019).

Izvir	Absolutna razlika v Q_s oz. H_s med obdobjema 1961–1982 in 1983–2013	Relativna razlika v Q_s oz. H_s med obdobjema 1961–1982 in 1983–2013 [%]
Hubelj	-0,43 m ³ /s	-13,6
Vipava	-0,80 m ³ /s	-11,4
Idrija	-1,96 m ³ /s	-19,6
Bistrica v Bohinjski Bistrici*	-0,10 m ³ /s	-3,1
Rižana*	-1,39 m ³ /s	-29,5
Bistrica pri Ilirski Bistrici	-14,6 cm	-12,5
Stržen*	-27,83 cm	-17,6
Ljubljana	-3,79 m ³ /s	-14,5
Ljubija	-0,84 m ³ /s	-11,6
Malenščica	-14,86 cm	-3,3
Unica	-3,95 m ³ /s	-16,5
Krka	-1,58 m ³ /s	-17,8
Prečna	-0,43 m ³ /s	-9,4

* krajše obdobje podatkov

Preglednica 3: Rezultati trendov z uporabo Mann-Kendallovega testa za temperaturo vode (povzeto po Jelen, 2019).

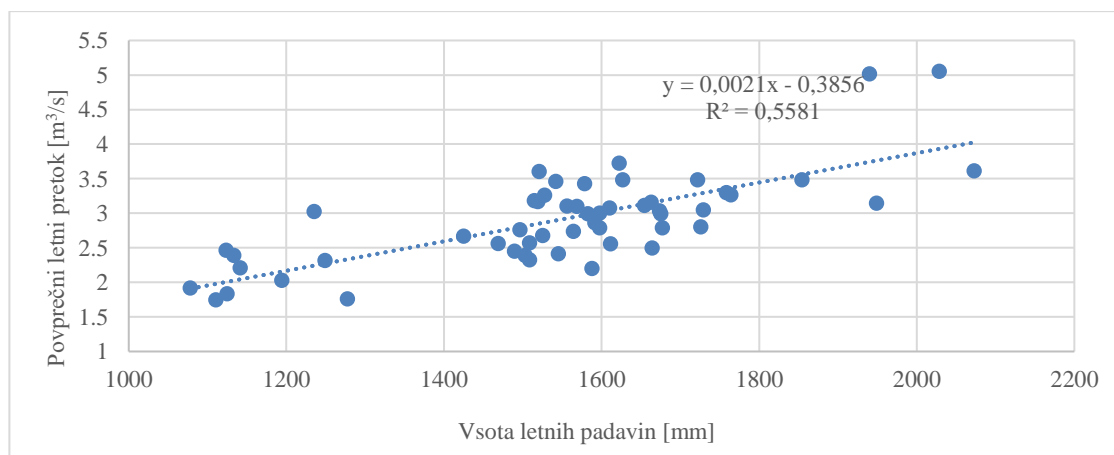
Table 3: Mann-Kendall trend test results for the water temperature data (Adopted from Jelen, 2019).

Izvir	Srednje letne vrednosti		Največje letne vrednosti		Najmanjše letne vrednosti		Trend srednje letne vrednosti [°C/desetletje]
	Rezultat testa	Stat. značilnost	Rezultat testa	Stat. značilnost	Rezultat testa	Stat. značilnost	
Ljublanica	Pozitiven	NE	Negativen	NE	Pozitiven	DA	0,12
Hubelj	Pozitiven	DA	Pozitiven	DA	Negativen	DA	0,16
Idrijca	Pozitiven	DA	Pozitiven	DA	Pozitiven	NE	0,22
Ljubija	Negativen	NE	Negativen	DA	Pozitiven	DA	-0,02
Prečna	Pozitiven	NE	Negativen	DA	Pozitiven	NE	0,06
Unica	Negativen	NE	Negativen	DA	Pozitiven	NE	-0,19
Vipava	Pozitiven	DA	Pozitiven	DA	Pozitiven	DA	1,29

Preglednica 4: Trendi srednje letne temperature zraka za obdobje 1982–2007 in trendi letnih količin padavin (povzeto po Jelen, 2019).

Table 4: Mean air temperature data trends for the 1982–2007 period along with annual precipitation trends (Adopted from Jelen, 2019).

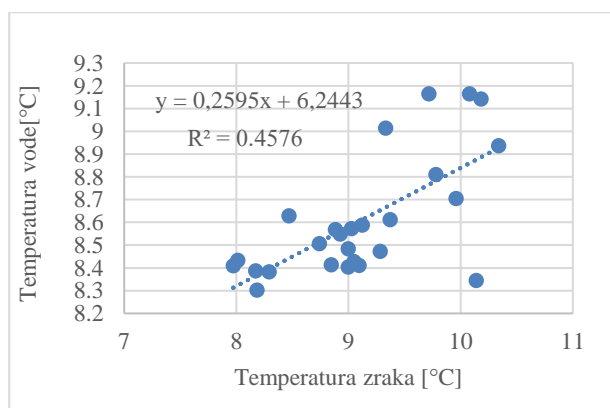
Postaja	Trend srednje letne temperature zraka [°C/desetletje]	Rezultat trenda za srednjo letno temperaturo zraka	Trend letne količine padavin in uporabljeno obdobje podatkov [mm/desetletje]
Postojna	0,38	Pozitiven in statistično značilen trend	-30,1 (1961–2013)
Radovljica_Lesce	0,27		4,1 (1969–2013)
Ljubljana Bežigrad	0,45		-14,1 (1961–2013)
Novo mesto-Gotna vas	0,47		2,8 (1961–2013)
Letališče Portorož	0,6		-93,3 (1966–2013)



Slika 5: Odvisnost med srednjimi letnimi pretoki izvira Hubelj in letnimi količinami padavin za postajo Postojna (povzeto po Jelen, 2019).

Figure 5: Relationship between mean flows for the Hubelj spring and the annual amount of precipitation for the Postojna station (Adopted from Jelen, 2019).

Analiza odvisnosti med povprečnimi letnimi temperaturami zraka in temperaturami vode je pokazala, da se Pearsonov koeficient korelacije giblje med -0,19 in 0,67 (Jelen, 2019). Slika 6 prikazuje primer takšne odvisnosti za izvir Idrijce. Ker so zadrževalni časi na kraških območjih relativno kratki v primerjavi z medzrnskimi vodonosniki, je ugotovitev, da obstaja določena odvisnost med temperaturo zraka in vode, pričakovana. Vendar v nekaterih primerih (npr. Ljubija, Unica, Ljubljana) ni bilo mogoče ugotoviti izrazite odvisnosti. Poleg tega je razpon izmerjenih vrednosti temperature vode na teh izviri večji kot v primeru ostalih izvirov (Jelen, 2019). To bi lahko bilo posledica dejstva, da je vodomerna postaja v nekaterih primerih postavljena nekaj kilometrov dolvodno od samega izvira. Poleg tega bi razlog lahko bil, da smo za reprezentativno meteorološko postajo vzeli postajo, ki ne opiše dobro meteoroloških razmer na zaledju kraškega izvira ali pa gre za kraški izvir, kjer je zaledje relativno veliko in so posledično zadrževalni časi nekoliko daljši (npr. Ljubljana), kar sklepamo po zadrževalnem času za postajo Hasberg, ki znaša okrog 0,7 leta (Rusjan, et al., 2019). Dodatno na izmerjeno temperaturo vode vplivajo tudi lokalne razmere na merilnem mestu (npr. sončna ali senčna lega).



Slika 6: Odvisnost med povprečno letno temperaturo vode izvira Idrijce in povprečno temperaturo zraka za postajo Postojna (povzeto po Jelen, 2019).

Figure 6: Relationship between mean annual water temperature for the Idrijca spring and mean annual air temperature for the Postojna station (Adopted from Jelen, 2019).

4. Zaključki

Prispevek prikazuje rezultate hidrološke analize trendov izbranih 14 kraških izvirov v Sloveniji. Za večino izvirov smo za pretoke oziroma vodostaje obravnavali obdobje med letoma 1961 in 2013. Podatki o temperaturi vode so bili na voljo za obdobje od 1982 do 2007. Na podlagi predstavljenih rezultatov lahko zaključimo:

– Srednji in mali letni pretoki se v večini obravnavanih izvirov zmanjšujejo, pri čemer je to zmanjševanje pogosto tudi statistično značilno. Odvisnost med letnimi količinami padavin in povprečnimi letnimi pretoki je za nekatere izbrane postaje relativno izrazita in ker se padavine na najbližjem merilnem mestu zmanjšujejo, to nakazuje na potencialno ranljivost kraških izvirov. To potrjujejo tudi relativno kratki zadrževalni časi v primerjavi z medzrnskimi vodonosniki, kar so pokazale nekatere druge študije (Rusjan et al., 2019). Treba je poudariti, da so imele nekatere postaje tudi nizko odvisnost med letno vsoto padavin in povprečnimi letnimi pretoki.

– Pri analizi največjih letnih pretokov ne moremo določiti enoznačnega trenda, kar je v skladu z ugotovitvami nekaterih drugih raziskav, ki so obravnavale več vodomernih postaj v Sloveniji (Šraj et al., 2016; Oblak, 2017; Šraj et al., 2019).

– Temperatura zraka se na vseh obravnavanih meteoroloških postajah statistično značilno povečuje. Najbolj izrazito je naraščanje za postajo Portorož, kjer je najbolj izrazito upadanje letnih padavin. Za nekatere izvire smo ugotovili tudi relativno visoko odvisnost med temperaturo zraka in temperaturo vode na izviru.

– Analize najnižjih in srednjih letnih temperatur vode na izviri, kjer se izvajajo meritve temperature vode, kažejo, da se temperatura vode zvišuje.

Zahvala

Raziskava je potekala v okviru dela na raziskovalnem programu P2-0180 Vodarstvo in geotehnika, ki ga financira Agencija za raziskovalno dejavnost Slovenije (ARRS). Prva avtorica je raziskavo opravila v okviru samostojnega dela na magistrski nalogi na UL FGG.

Viri

- Bertalanich, R., Dolinar, M., Draksler, A., Honzak, L., Kobold, M., Kozjek, K., Lokošek, N., Medved, A., Vertačnik, G., Vlahovič, Ž., Žust, A. in sod. (2018). Ocena podnebnih sprememb do konca 21. stoletja. Sintezno poročilo – prvi del. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje: 156 str. Dostopno na: https://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/publications/OPS21_Porocilo.pdf (Pridobljeno: 1. 4. 2019).
- Brenčič, M. (2003). Hidrogeološke razmere v napajalnem zaledju izvirov Kroparice pod Jelovico – Hydrogeological conditions of the Kroparica recharge area, Jelovica, Slovenia. *Geologija*, **46/2**, 281–306. <https://doi.org/10.5474/geologija.2003.025>.
- Burn, H. D., Hag Elnur, M. A. (2002). Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of Hydrology* **255(1-4)**, 107–122. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00514-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00514-5).
- Bonacci, O. (1987). Karst hydrology and water resources—Past, present and future. In Water for the Future: Hydrology in Perspective, Proceedings of the Rome Symposium, Rome, Italy, 27–29 April 1987; IAHS Publication: Wallingford, UK, 1987; 205–213.
- Bonacci, O. (1996). Hydrology of the Gradole karst spring (Istria – Croatia) = Hidrologija kraškega izvira Gradole (Istra – Hrvaška). *Acta Carsologica*, **25**, 45–55.
- Bonacci, O., Oštrić, M., Roje- Bonacci, T. (2017). Prilog hidrologiji krškog izvora Rječine. Zagreb, *Hrvatske vode* **25(100)**, 99–108.
- Civita, M., Cucchi, F., Eusebio, A., Garavoglia, S., Maranzana, F., Vigna, B. (1995). Hidrogeološki sistem Timave: pomemben dodatni vodni vir, ki mora biti uporabljen in zaščiten = The Timavo hydrogeologic system: an important reservoir of supplementary water resources to be reclaimed and protected. *Acta Carsologica*, **24**, 169–186.
- Čar, J., Janež, J. (1992). Strukturno-geološke in hidrogeološke razmere izvirov Možnice – Structural-geological and hydrogeological conditions at the Možnica springs. *Acta Carsologica*, **21**, 77–96.
- Gams, I. (2004). Kras v Sloveniji v prostoru in času. 2. pregledana izdaja. Ljubljana, Založba ZRC SAZU: 508 str.
- Janež, J. (2002). Veliki kraški izviri v zgornjem Posočju – Karst Springs in the Upper Soča Valley. *Geologija*, **45/2**, 393–400. <https://doi.org/10.5474/geologija.2002.038>.
- Janež, J., Čar, J. (1997). Geological conditions and some hydrogeological characteristics of the Vipava karst springs. *Acta Carsologica*, **26/1**, 86–91.
- Jelen, M. (2019). Hidrološka analiza kraških izvirov v Sloveniji. Unpublished master thesis. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 106 p. (in Slovenian). Dostopno na: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110377&lang=slv>.
- Krajnc, U., Kryžanowski, A. (2019). Vroče poletje 2019 znova opozorilo na problem oskrbe z vodo slovenske obale. Mišičev vodarski dan 2019. 106–113. Dostopno na: <http://www.mvd20.com/LETO2019/R15.pdf>.
- Kundzewicz, Z. W., Robson, A. J. (2004). Change detection in hydrological records—a review of the methodology. *Hydrological Sciences Journal*, **49(1)**, 7–19. <https://doi.org/10.1623/hysj.49.1.7.53993>.
- Morlot, M., Brilly, M., Šraj, M. (2019). Characterisation of the floods in the Danube River basin through flood frequency and seasonality analysis. *Acta hydrotechnica*, **32(57)**, 73–89. <https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2019.06>.
- Oblak, J. (2017). Analiza sezonske spremenljivosti pretokov rek v Sloveniji. Unpublished Master Thesis. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 91 p. (in Slovenian). Dostopno na: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=94355&lang=slv>.
- Pavlič, U., Brenčič, M. (2011). Application of sequential trend analysis for discharge characterisation of Vipava Karstic springs, Slovenia = Uporaba sekvenčne analize trendov za ugotavljanje značilnosti odtoka kraških izvirov Vipave, Slovenija. *Acta Carsologica*, **40/2**, 283–291. <https://doi.org/10.3986/ac.v40i2.13>.
- Ravbar, N. (2010). Lokalna vodooskrba na Krasu. *Razgledi, Dela* **34**, 223–233.
- Ravbar, N., Kovačič, G. (2006). Karst water management in Slovenia in the frame of vulnerability mapping = Upravljanje s kraškimi vodami v Sloveniji v okviru kartiranja občutljivosti. *Acta Carsologica*, **35/2**, 73–80. <https://doi.org/10.3986/ac.v35i2-3.230>.
- Ravbar, N., Kovačič, G., Petrič, M., idr. (2017). Climatological trends and anticipated karst spring quantity and quality: case study of the Slovene Istria. *Geological Society, Special Publications*, **466**, 295–305. <https://doi.org/10.1144/SP466.19>.

Rusjan, S., Sapač, K., Petrič, M., Lojen, S., Bezak, N. (2019). Identifying the hydrological behavior of a complex karst system using stable isotopes. *Journal of Hydrology*, **577**, 123956. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123956>.

Sapač, K., Medved, A., Rusjan, S., Bezak, N. (2019). Investigation of Low- and High-Flow Characteristics of Karst Catchments under Climate Change. *Water* **11**(925), 19. <https://doi.org/10.3390/w11050925>.

Sezen, C., Bezak, N., Šraj, M. (2018). Hydrological modelling of the karst Ljubljanica River catchment using lumped conceptual model. *Acta hydrotechnica*, **31**(55), 87–100. <https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2018.06>.

Šraj, M., Mikoš, M., Bezak, N. (2019). Hidrometeorološki ekstremi in vrednotenje njihovih sprememb na osnovi merjenih podatkov. Mišičev vodarski dan 2019. 75–81. Dostopno na: <http://www.mvd20.com/LETO2019/R11.pdf>.

Šraj, M., Menih, M., Bezak, N. (2016). Climate variability impact assessment on the flood risk in Slovenia. *Physical Geography* **37**, 73–87. <https://doi.org/10.1080/02723646.2016.1155389>.