

UDK/UDC: 556.167:532.533(497.4)Ljubljana

Prejeto/Received: 14.01.2019

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 08.03.2019

## VPLIV RAČUNSKIH KRITERIJEV NA VREDNOSTI RECESIJSKIH KONSTANT NIZKIH PRETOKOV V NEHOMOGENEM POREČJU V SLOVENIJI

## INFLUENCE OF CALCULATION CRITERIA ON THE VALUES OF LOW-FLOW RECESSSION CONSTANTS IN A NON-HOMOGENOUS CATCHMENT IN SLOVENIA

Klaudija Sapač<sup>1,\*</sup>, Simon Rusjan<sup>1</sup>, Mojca Šraj<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova 2, Ljubljana, Slovenija

### Izvleček

V prispevku smo analizirali vpliv izbire treh kriterijev na vrednost recesijskih konstant nizkih pretokov, in sicer vpliv izbire metode izračuna, vpliv izbire dolžine segmenta recesijske krivulje (4, 5, 6 ali 7 dni) in vpliv izbire obdobja (celotno obdobje, mesečno, sezonsko), na podlagi katerega se določi začetni pretok, ki določa mejo za vključitev padajočih delov hidrograma v recesijsko analizo. Analiza je izdelana na dnevni podatkih pretokov 11 vodomernih postaj hidrogeološko nehomogenega porečja Ljubljane. Za vsako od obravnavanih postaj smo z različno kombinacijo kriterijev izračunali 24 vrednosti recesijskih konstant, na podlagi katerih smo s statističnimi testi in grafičnimi pristopi določili vpliv posameznega kriterija na končni rezultat. Analiza je pokazala, da se rezultati, dobljeni po različnih metodah, statistično značilno razlikujejo na vseh obravnavanih postajah. Vrednosti recesijskih konstant po metodi posameznih recesijskih segmentov (IRS) so v povprečju za 3,1 dan višje od vrednosti po metodi glavne recesijske krivulje (MRC). Vpliv ostalih dveh kriterijev, tj. dolžine segmenta in izbire obdobja, ni tako enoznačen, saj je najverjetneje pogojen z lastnostmi porečja, ki vplivajo na časovno dinamiko odtoka.

**Ključne besede:** recesijska analiza, recesijska konstanta, nizki pretoki, porečje Ljubljane, Ifstat.

### Abstract

In this paper we analyse the influence of three different calculation criteria on the values of low-flow recession constants, namely the influence of the calculation method, recession curve segment length (4, 5, 6, or 7 days) and of the selected period (whole period, monthly, seasonally) for the calculation of the initial discharge, which determines the threshold on the falling limb of the hydrograph for the recession analysis. The analysis is based on daily discharge data of 11 gauging stations in the hydrogeologically non-homogenous Ljubljana River catchment. For each of the stations, we calculated 24 values of recession constants using a different combination of criteria. Based on these values we determined the influence of each criterion on the final result using statistical tests and graphical approaches. Analysis showed that the recession constants calculated using various methods are statistically significantly different for all gauging stations. The recession constants

---

\* Stik / Correspondence: [klaudija.sapac@fgg.uni-lj.si](mailto:klaudija.sapac@fgg.uni-lj.si)

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

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

<https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2019.01>

obtained using the individual recession segment method (IRS) are on average 3.1 days higher than those calculated using the master recession curve method (MRC). The influence of the other two criteria, namely the length of the segment and the period for calculating the initial discharge, is not so obvious, since it is most likely conditioned by catchments' characteristics influencing the time dynamics of the runoff.

**Keywords:** recession analysis, recession constant, low-flows, Ljubljanica River catchment, Ifstat.

## 1. Uvod

Krivulje padajočega dela hidrograma odtoka ali recesijske krivulje in njihova analiza so pomemben del hidroloških raziskav, hkrati pa so široko uporabne pri upravljanju vodnih virov (Tallaksen, 1995; Berhail et al., 2012; Gregor in Malik, 2012), saj vsebujejo informacijo o vplivih različnih dejavnikov na proces oblikovanja odtoka s porečja (Tallaksen, 1995). Recesijske krivulje se uporabljajo v hidroloških modelih, pri študijah baznega odtoka, hidrogeoloških raziskavah, napovedovanju nizkih pretokov in ocenah količin podzemnih virov vode (Vogel in Kroll, 1996; Berhail et al., 2012). Doctor et al. (2005) so z recesijsko analizo izvirov na kraškem območju jugozahodnega dela Slovenije proučevali celo zvezo med pretočnim režimom in kemijsko sestavo vode. Analiza padajočega dela hidrograma je pomemben del analize nizkih pretokov, saj nam poda odgovor na vprašanje, kako hitro bo upadal pretok vodotoka, če ne bo padavin.

Odtok s porečja je v splošnem sestavljen iz treh delov: površinskega odtoka, medtoka in baznega odtoka, pri tem pa ima vsaka komponenta svojo značilno obliko upadanja. Posamezne komponente se lahko med seboj prekrivajo, saj meje med njimi najpogosteje niso točno določljive. Oblika padajočega dela hidrograma (recesijska krivulja) oziroma hitrost upadanja sta odvisni predvsem od geologije porečja in oddaljenosti vodotoka od razvodnice (Smakhtin, 2001). Začetni del recesijske krivulje je najstrmejši, saj se v njem odraža površinski tok in/ali medtok. Zaradi zaloga vode v globljih, podpovršinskih delih porečja, ki z zamikom prispevajo k hidrogramu, se krivulja počasi izravnava. V primerih, ko je zagotovljeno stalno vzdrževanje toka bodisi iz podtalnice ali ledenikov, lahko krivulja postane celo konstantna (Smakhtin, 2001). Ti spodnji deli krivulje upadanja

pretoka so osnova za recesijsko analizo nizkih pretokov.

Zametki recesijske analize segajo v konec 19. in začetek 20. stoletja, v čas Boussinesqa in Mailleta, ko je bila ta povezana predvsem s teorijo podzemnega toka. Boussinesq in Maillet sta namreč predlagala enačbo, ki pretok na izviru definira kot funkcijo volumna zaloge vode v porečju (Tallaksen, 1995). Metoda temelji na teoriji delitve hidrograma na naraščajoči del, v katerem se odraža odziv vodotoka na padavine, in na padajoči del, ki opisuje zvezo med zalogo vode v porečju in tokom podzemne vode v strugo vodotoka v času z malo ali brez padavin. Hitrost upadanja hidrograma izrazimo z recesijskimi konstantami v enotah časa (npr. dan, ura). V splošnem velja, da je hitrejšo upadanje (nižje recesijske konstante) hidrograma značilno za hudourniške vodotoke s prevladujočo manj prepustno geološko sestavo, medtem ko je počasnejše upadanje (višje recesijske konstante) tipično za vodotoke v porečjih s prepustno geološko sestavo (WMO, 2008).

Sprva je analiza recesijskih krivulj potekala z grafičnimi postopki, katerih slabost je bila predvsem v vplivu subjektivnosti ocene avtorja na rezultat recesijske konstante (Thomas et al., 2015). Z razvojem računalnikov in njihovih zmogljivosti so se metode avtomatizirale, postale bolj objektivne in široko uporabne (Tallaksen, 1995). Kljub temu je še danes pri določanju recesijskih konstant in medsebojni primerjavi rezultatov veliko negotovosti, ki izhajajo predvsem iz naslednjih vprašanj (Tallaksen, 1995):

- S katerim analitičnim izrazom opisati funkcijo odtoka?
- Katero metodo uporabiti, da dobimo značilno upadanje z nekega porečja?
- Katero metodo uporabiti za optimizacijo recesijskih parametrov?

- Kako upoštevati veliko spremenljivost v posameznih segmentih upadanja recesijske krivulje?

Številni avtorji so podrobneje proučevali metode za določanje recesijskih konstant in se poleg zgoraj nešteti vprašanj ukvarjali še s proučevanjem vplivov različnih dejavnikov na rezultat izračunane recesijske konstante. Tallaksen (1991) je ugotovila, da na vrednost recesijske konstante, izračunane na podlagi enostavne eksponentne enačbe, vplivata začetek in dolžina padajočega segmenta. Chen et al. (2012) so v raziskavi kraškega območja na jugozahodu Kitajske ugotovili pomembno zvezo med velikostjo porečja (porečja do 1000 km<sup>2</sup>) in vrednostjo recesijske konstante; z večanjem površine porečja vrednost recesijske konstante narašča. Demuth in Schreiber (1994) sta analizirala podatke o pretokih na jugozahodu Nemčije in primerjala sezonsko spremenljivost recesijskih krivulj. Študija je pokazala, da so za poletne pretoke značilnejše strmejšje recesijske krivulje (manjše vrednosti recesijskih konstant) v primerjavi z zimskimi, kar avtorja pripisujeta višji poletni evapotranspiraciji in vplivu taljenja snega na zalogo vode v porečju.

Glavni cilj študije je bil analizirati in določiti vplive izbranih kriterijev izračuna na vrednosti recesijskih konstant, in sicer a) vpliv izbrane metode izračuna, b) vpliv dolžine segmenta padajočega dela hidrograma in c) vpliv izbranega obdobja za izračun začetnega pretoka (v našem primeru Q<sub>70</sub> iz krivulj trajanja) kot praga za določitev začetka analize recesijske krivulje. Za analizo smo izbrali 11 vodomernih postaj v hidrogeološko nehomogenem porečju Ljubljani.

## 2. Opis obravnavanega območja in podatki

V raziskavi smo obravnavali porečje reke Ljubljani, ki obsega osrednji in južni del Slovenije vse do meje s Hrvaško (slika 1), njegova velikost pa je zaradi nedoločenosti kraške razvodnice ocenjena na 1.890 km<sup>2</sup> (Kolbezen in Pristov, 1998). Na območju prevladujejo karbonatne kamnine, predvsem apnenec in dolomit, s kraško in razpoklinsko poroznostjo (Kranjc, 2007). Na območju Ljubljanske kotline se nahajajo

debeli kvartarni gramozni sloji in konglomerati (Pavlovec, 1961), na območju Polhograjskega hribovja na severozahodnem delu porečja pa najdemo manj prepustne kamnine (Kolbezen in Pristov, 1998). Hidrogeološke lastnosti porečja so podrobneje predstavljene v Kogovšek (2001; 2004), Gabrovšek et al. (2010), Petrič (2010), Ferk (2016) in Kovačič in Ravbar (2016). Območje je hidrogeološko zelo kompleksno, zaradi česar so površinski odseki rek zelo kratki, vodotoki pa na svoji poti večkrat poniknejo in tečejo pod površjem. To je tudi razlog, da ima reka Ljubljani od svojega izvira do izliva v Savo sedem različnih imen (Šušteršič, 1994).

Povprečna letna količina padavin na porečju znaša od 1400 mm na Ljubljanskem barju do več kot 2000 mm na območju Sneznika. Na območju Polhograjskega hribovja letno pade 1600–1800 mm, na kraškem območju porečja pa 1800–2000 mm padavin (Bat et al., 2008). Nadmorska višina porečja Ljubljani je med 300 in 1800 m n. v. (slika 1). Povprečna gostota rečne mreže na obravnavnem porečju znaša 0,98 km/km<sup>2</sup>, na območju reke Pivke (kraško območje) se gostota zmanjša na 0,55 km/km<sup>2</sup> (Kolbezen in Pristov, 1998).

Analiza vplivov računskih kriterijev na vrednosti recesijskih konstant je bila narejena na podatkih dnevnih pretokov za 11 vodomernih postaj (ARSO, 2018) (preglednica 1) v porečju Ljubljani. Lokacije obravnavanih vodomernih postaj so označene na sliki 1. Kriteriji za vključitev posamezne postaje v analizo so bili: delovanje postaje v letu 2016 (zadnje leto, za katerega so bili v času analize dostopni podatki), delovanje postaje vsaj od leta 1991 in da v obravnavnem obdobju iz preglednice 1 podatki ne manjkajo za več kot 5 let zaporedoma. Izjema je postaja Borovnica (5330), kjer podatki manjkajo za več kot 5 let zaporedoma, vendar smo jo zaradi dolgega niza podatkov (62 let) kljub temu vključili v analizo.

## 3. Metode dela

Osnovna ideja recesijske analize je modeliranje recesijske krivulje tako, da se čim bolj prilega analitičnemu izrazu funkcije  $Q_t$ , prikazane z enačbo

1. Če je  $Q_t$  modeliran kot odtok iz zaloge vode v porečju brez dotoka, potem stopnja recesije sledi eksponentni enačbi 1. reda (linearni Dupuit-Boussinesqovi enačbi) (Tallaksen, 1995):

$$Q_t = Q_0 e^{-\frac{t}{C}} \quad (1)$$

kjer je  $Q_t$  pretok v času  $t$ ,  $Q_0$  je začetni pretok in  $C$  je recesijska konstanta (modelirani parameter). V nadaljevanju sta podana kratka opisa dveh najpogostejše uporabljenih metod za parametrizacijo in identifikacijo lastnosti upadanja hidrograma, in sicer metoda glavne recesijske krivulje (angl. *master recession curve*, MRC) ter metoda z izračunom parametrov za posamezne segmente padajočega dela hidrograma (angl. *individual recession segment*, IRS). Metoda MRC je bila razvita z namenom izključitve problema spremenljivosti v posameznih segmentih upadanja hidrograma, saj padavine pogosto prekinjajo recesijska obdobja, kar je značilno predvsem za vlažna podnebja (WMO, 2008). Obstaja več različnih tehnik za izdelavo glavne recesijske krivulje MRC, npr. metoda ujemanja (angl. *matching strip*), tabelarična metoda (angl. *tabulating method*), metoda valčne transformacije (angl. *wavelet transform*) in korelacijska metoda (angl. *correlation method*). Pri metodi ujemanja se vsi recesijski segmenti prikažejo na enem grafu. Vsak segment je nato premaknjen in prilagojen v vodoravni smeri tako, da nastane prekrivajoče zaporedje, ki predstavlja eno glavno recesijsko krivuljo (Tallaksen, 1995). Slabost uporabe te metode je predvsem v tem, da je zelo subjektivna (Lamb in Beven, 1997). Tabelarična metoda obsega tabeliranje obdobj recesije, ki se jih nato premika toliko časa, dokler se pretoki približno ne skladajo. Za vsak časovni korak v obdobju je izračunan povprečni pretok (Tallaksen, 1995). Metoda analize z valčno transformacijo je tehnika razbijanja signala na njegove komponente (Morlet et al., 1982). Največ se uporablja na področjih procesiranja fotografij in v geofiziki, lahko pa tudi za analizo recesijskih krivulj. Slednje izhaja iz dejstva, da padajoči del hidrograma visokovodnega vala sestavljajo različne komponente odtoka (površinski tok, medtok in bazni odtok), kar se odraža tudi v recesijski krivulji posamezne komponente. Nato se

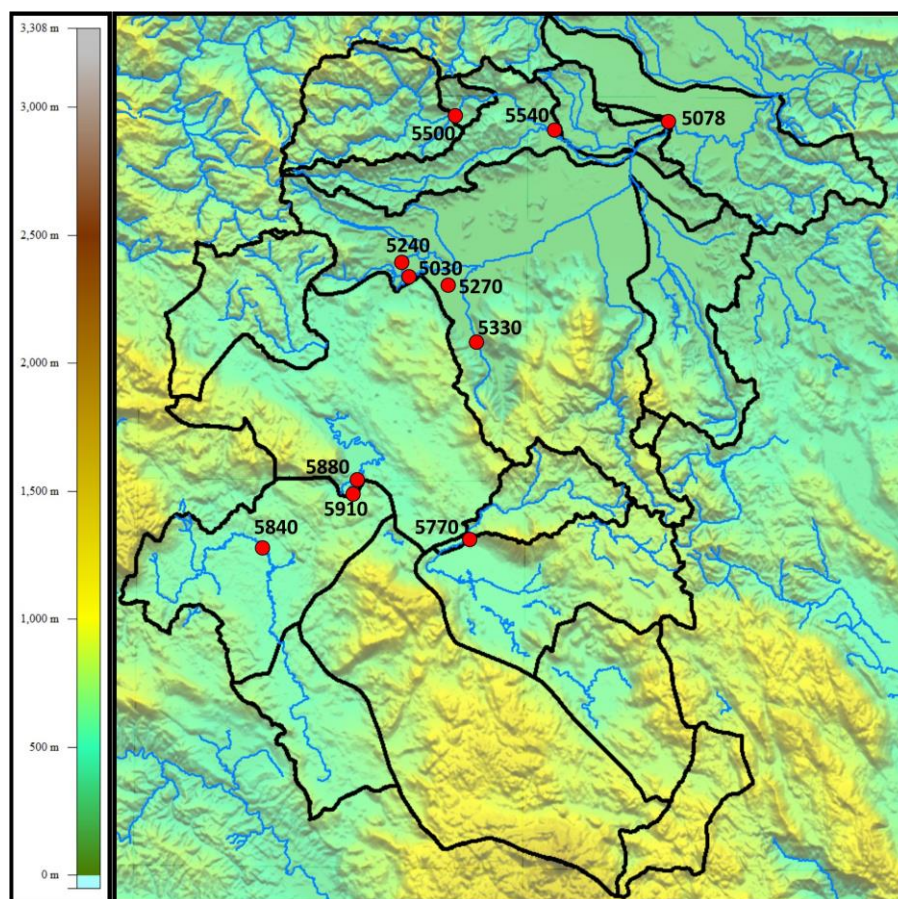
določi frekvenca segmenta baznega odtoka, na podlagi katere se izračuna recesijska konstanta (Berhail et al., 2012). Korelacijska metoda, ki smo jo uporabili tudi v naši raziskavi, je ena najpogostejše uporabljenih. Pri tej metodi se zrišejo pari  $Q_{t-1}$  in  $Q_t$  (Langbein, 1938). Skozi točke se po metodi najmanjših kvadratov zriše premica z naklonom  $k$  in presečiščem vertikalne osi v izhodišču (slika 2). Recesijska konstanta  $C$ , ki ima časovno enoto (npr. dan, ura), se nato izračuna kot (WMO, 2008):

$$C = \frac{\Delta t}{\ln(k)} \quad (2)$$

V nasprotju z metodo MRC pa je pri metodi IRS poudarek na upoštevanju individualnih segmentov upadanja hidrograma. Postopek je sicer enak tistemu za MRC, vendar z razliko, da je izveden za vsak segment upadanja posebej, kar pomeni, da je za vsak posamezni segment  $i$  izračunana recesijska konstanta  $C_i$ . Končno recesijsko konstanto  $C$  predstavlja srednja vrednost individualnih vrednosti konstant  $C_i$ . Za izračun recesijskih konstant nizkih pretokov smo uporabili paket *lfstat* (Koffler et al., 2016), ki je vključen v programsko orodje R (R Core Team, 2018) in omogoča izračun recesijske konstante tako po metodi MRC kot IRS (Petek et al., 2015).

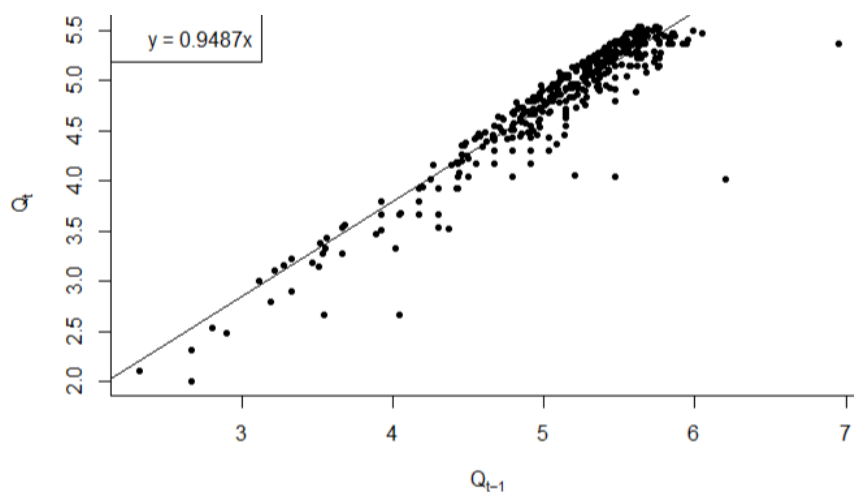
V raziskavi smo med seboj primerjali recesijske konstante za pretoke 11 vodomernih postaj v porečju Ljubljane, ki smo jih izračunali z različnimi vhodnimi parametri oziroma kriteriji, in sicer po dveh različnih metodah izračuna recesijske konstante MRC in IRS, z upoštevanjem različnih dolžin segmentov upadanja hidrograma (4, 5, 6 in 7 dni) in za različna obdobja (celo obdobje, mesečno, sezonsko), za katera se izračuna prag  $Q_{70}$ , ki predstavlja začetek analize recesijske krivulje. Pri izračunu praga  $Q_{70}$  po sezonah smo leto razdelili na dve različni dolgi sezoni, in sicer 1. april–30. november in 1. december–31. marec. Tako delitev sta v analizi nizkih pretokov v sosednji Avstriji izbrala tudi Laaha in Blöschl (2006).

S kombinacijo naštetih kriterijev smo za posamezno postajo izračunali 24 vrednosti recesijskih konstant, od tega 12 po metodi MRC in 12 po metodi IRS (Slika 3).



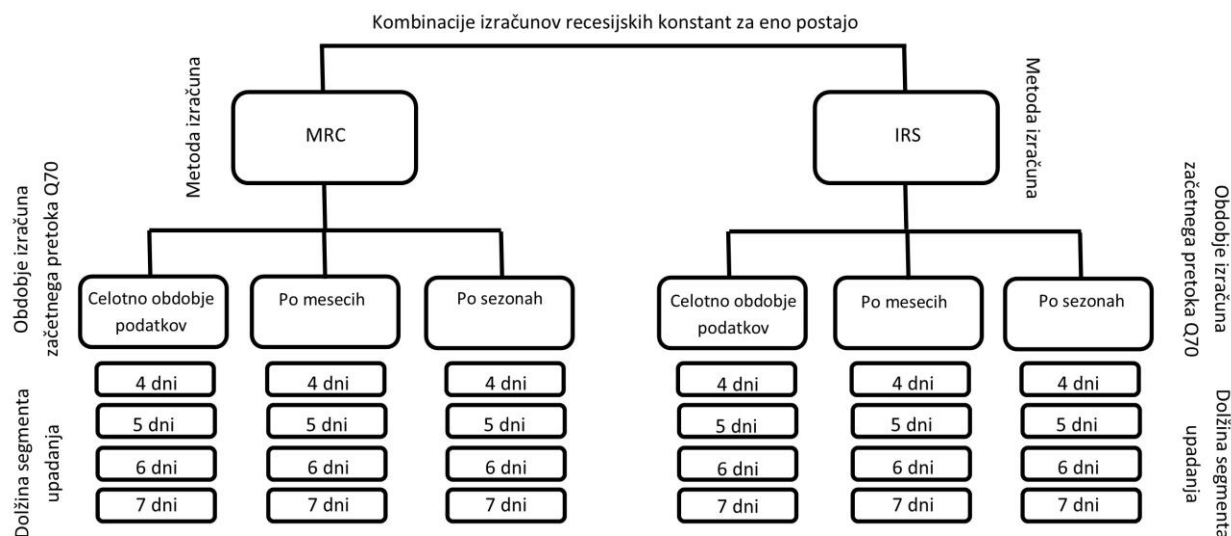
**Slika 1:** Porečje Ljubljaničice s prikazom lokacij analiziranih vodomernih postaj (rdeče pike).

**Figure 1:** The Ljubljana river catchment with locations of the gauging stations included in the study (red dots).



**Slika 2:** Primer glavne recesijske krivulje MRC z dolžino segmenta 5 dni in pragom  $Q_{70}$ , izračunanim na podlagi vseh podatkov za vodomerno postajo Malni (5910).

**Figure 2:** Example of master recession curve MRC with the segment length of 5 days and threshold  $Q_{70}$  calculated on the basis of the entire data set for the Malni (5910) gauging station.



**Slika 3:** Shematski prikaz kombinacij kriterijev za izračune recesijskih konstant za posamezno postajo.

**Figure 3:** Schematic representation of criteria combinations for calculating the recession constant for an individual station.

**Preglednica 1:** Osnovni podatki o vodomernih postajah, vključenih v analizo (ARSO, 2018).

**Table 1:** Basic data on the gauging stations included in the analysis (ARSO, 2018).

Šifra vodomerne postaje/ Gauging station code	Ime postaje/ Gauging station name	Vodotok/River	Obdobje podatkov/ Period of data*	GKX	GKY	Qsr [m <sup>3</sup> /s]**	BFI ***
5030	Vrhnika	Ljubljana	1961–2016	91575	446125	24,00	0,55
5078	Moste I	Ljubljana	1924–2016	101350	465120	55,05	0,56
5240	Verd I	Ljubljana	1952–2016	90583	446781	6,76	0,67
5270	Bistra	Bistra	1970–2016	89720	449150	5,04	0,85
5330	Borovnica	Borovniščica	1954–2016	85981	451480	7,49	0,47
5500	Dvor	Gradaščica	1979–2016	102220	449690	2,31	0,50
5540	Razori	Šujica	1954–2016	100589	456858	1,43	0,47
5770	Cerknica I	Cerkniščica	1954–2016	90583	446781	1,03	0,41
5840	Mali Otok	Nanoščica	1989–2016	70981	436632	1,48	0,22
5880	Hasberg	Unica	1926–2016	76294	443185	22,20	0,63
5910	Malni	Malenščica	1961–2016	75683	442493	6,56	0,91

\*Manjkajoči podatki/Data gaps: 5030 (3. 6.–10. 10. 2014), 5240 (1. 1.–31. 12. 2010), 5270 (4. 9. 2014–20. 4. 2015), 5330 (1. 4.–30. 4. 1979, 1. 6.–30. 6. 1979, 1. 9.–30. 9. 1979, 1. 11.–30. 11. 1979, 1. 1. 1994–1. 4. 1999), 5500 (1. 1.–31. 12. 1980), 5770 (3. 11. 1960–2. 12. 1961, 1. 1.–31. 12. 1996, 1. 5.–10. 9. 2015), 5840 (18. 9.–31. 12. 2014), 5910 (1. 1. 1992–31. 12. 1995)

\*\*mean discharge [m<sup>3</sup>/s]

\*\*\*izračunani indeks baznega odtoka BFI/calculated baseflow index BFI.

Metodologija izračuna je predstavljena v poglavju 3/Calculation methodology is presented in chapter 3.



Rezultate izračunov smo med seboj primerjali in jih analizirali na podlagi omenjenih spreminjajočih vplivnih parametrov izračuna, ne pa tudi glede na druge dejavnike, ki lahko vplivajo na vrednost izračuna, kot so geološke karakteristike in velikost porečja. Ker je recesijska konstanta tako kot indeks baznega odtoka (angl. *baseflow index*, *BFI*) kazalnik lastnosti zaloge vode na porečju (Tallaksen, 1989), smo ju med seboj primerjali. *BFI* je bil za vsako vodomerno postajo posebej izračunan s paketom *lfstat* z uporabo istih podatkov kot recesijske konstante. Vpliv vsakega od omenjenih kriterijev izračuna recesijske konstante smo določili s pomočjo parnega parametričnega *t*-testa, s katerim se primerja srednje vrednosti dveh vzorcev. S testom se določi, ali sta srednji vrednosti dveh nizov podatkov statistično značilno različni med seboj. Pri vseh testih smo postavili ničelno in alternativno hipotezo:

$H_0$  = Srednja vrednost razlik med rezultati recesijskih konstant, izračunanih z različnima računskima kriterijema, je enaka 0.

$H_a$  = Srednja vrednost razlik med rezultati recesijskih konstant, izračunanih z različnima računskima kriterijema, je različna od 0.

Izbrali smo parni *t*-test, ki primerja srednji vrednosti dveh odvisnih vzorcev, saj gre za izračun z istimi vhodnimi podatki, vendar z enim spremenjenim kriterijem, katerega vpliv želimo določiti (npr. vpliv izbire metode izračuna). Uporabili smo dvostranski test s stopnjo značilnosti  $\alpha = 0,05$ .

Pri analizi vplivov izbire metode MRC ali IRS je bil izveden en test (1 kombinacija), pri analizi vplivov dolžine upadanja segmenta je bilo izvedenih šest testov (za šest kombinacij) in pri analizi vplivov izbire obdobja za izračun praga Q70 kot začetnega pretoka za analizo recesijskih krivulj so bili izvedeni trije testi (tri kombinacije). Ker je porečje Ljubljaniče hidrogeološko zelo nehomogeno (Sezen et al., 2018), je pričakovati odraz tega v vrednostih recesijskih konstant. Zaradi tega neposredna primerjava izračunanih konstant z izvedbo izbranega statističnega testa med postajami ni mogoča. Tako smo teste izvajali za vsako postajo posebej, brez postaje Mali Otok (5840), saj je bil zaradi manjkajočih izračunanih vrednosti vzorec

premajhen za objektivno interpretacijo rezultatov testa oz. primerjavo z ostalimi postajami. Verodostojnost testov zaradi na splošno relativno majhnih vzorcev (v primeru testa dolžine segmentov je bilo število parov  $N = 6$ ) ni vprašljiva, saj je po ugotovitvah de Winterja (2013) uporaba parnega *t*-testa na ekstremno majhnih vzorcih ( $N < 5$ ) ustrezna, še posebej, če je med pari velika korelacija.

Poleg statističnih testov, opisanih zgoraj, smo vpliv dolžine segmenta upadanja na rezultat recesijske konstante ugotavljali na podlagi rezultatov vseh postaj, tako da smo za vsako kombinacijo proučevanih kriterijev najprej določili srednjo vrednost recesijske konstante, nato pa smo določili absolutne razlike (v dnevih) med srednjimi vrednostmi glede na metodo MRC ali IRS (npr. »MRC\_4\_C« - »IRS\_4\_C«). Za vsako dolžino segmenta upadanja smo tako dobili tri vrednosti, katerih srednja vrednost je bila na koncu izhodišče za ugotovitev, v katerem primeru dolžine segmenta upadanja prihaja v povprečju do največjih razlik v rezultatih recesijskih konstant.

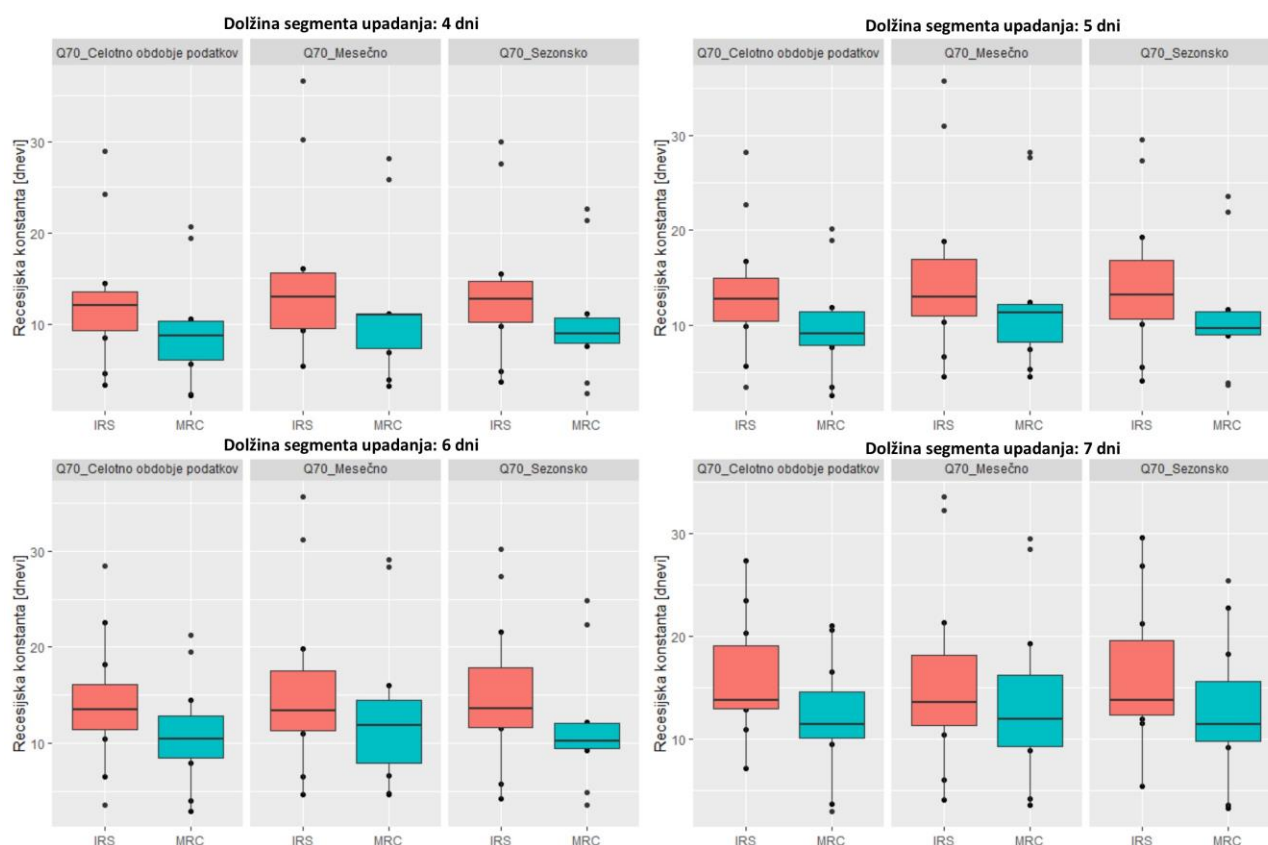
Pri analizi vpliva izbrane metode izračuna MRC oziroma IRS na rezultat smo rezultate statističnega *t*-testa dopolnili še z izračunom korelacij indeksa baznega odtoka (*BFI*) s srednjimi vrednostmi recesijskih konstant po obeh metodah. Ker sta tako *BFI* kot recesijska konstanta kazalnika zaloga vode v porečju, smo na podlagi jakosti povezave med spremenljivkama s koeficientom korelacije želeli določiti ustrežnejšo metodo za izračun recesijskih konstant.

V nadaljevanju smo analizirali vpliv izbire dolžine obdobja na izračun praga Q70. Naključno smo izbrali dve postaji v porečju reke Ljubljaniče, za kateri smo na hidrogramih za eno leto (1. april 2010–31. marec 2011) grafično prikazali vrednosti praga Q70, ki so bile izračunane za različna obdobja. Izračune recesijskih konstant z vsemi 24 kombinacijami kriterijev smo za ti dve postaji ponovili še enkrat in jih poskušali interpretirati z vidika izbranega obdobja za izračun praga Q70.

## 4. Rezultati

Rezultate izračunov recesijskih konstant za 11 vodomernih postaj v porečju Ljubljanice prikazuje preglednica 2. Za vsako postajo je bilo z uporabo različnih kombinacij kriterijev (slika 3) izračunanih 24 recesijskih konstant. Posebej so označene največje (rdeče) in najmanjše (modre) izračunane vrednosti. Pri 8 od 11 postaj je bila najmanjša vrednost recesijske konstante izračunana z metodo MRC, dolžino segmenta upadanja 4 dni in upoštevanim celotnim nizom podatkov za izračun praga Q70 kot začetka recesijske krivulje. Pri postajah Bistra (5270) in Malni (5910) je najmanjšo vrednost dala kombinacija metode MRC, celotnega obdobja podatkov za izračun praga Q70 in dolžino segmenta 5 dni, medtem ko je bila pri Dvoru (5500) minimalna vrednost izračunana z metodo MRC, pragom Q70, izračunanim po sezonah, in dolžino segmenta upadanja 4 dni. Pri najvišjih vrednostih

recesijskih konstant ni take enotnosti, kot je bila ugotovljena pri minimalnih vrednostih. Je pa bila pri vseh postajah razen pri Malem Otoku (5840) maksimalna vrednost izračunana po metodi IRS. Pri tem je treba omeniti, da pri Malem Otoku (5840) s paketom *lfstat* iz neznanega razloga ni bilo mogoče izračunati treh vrednosti recesijskih konstant po metodi IRS. Šest postaj ima najvišjo izračunano vrednost recesijske konstante v kombinaciji metode IRS in dolžine segmenta upadanja 7 dni, pri čemer je pri treh postajah prag Q70 izračunan za celotni niz podatkov (Borovnica, Razori, Cerknica), pri treh pa mesečno (Vrhnika, Bistra in Mali Otok). Moste (5078), Verd (5240), Dvor (5500) in Mali Otok (5840) imajo najvišje vrednosti v primeru dolžine segmenta upadanja 6 dni. Zanimiva je postaja Malni, ki ima edina najvišjo vrednost recesijske konstante pri dolžini segmenta upadanja 4 dni.



**Slika 4:** Prikaz izračunanih recesijskih konstant v dnevih za različne dolžine segmentov upadanja za 11 postaj v porečju Ljubljanice.

**Figure 4:** Calculated recession constants in days for different segment lengths for 11 stations in the Ljubljana River catchment.



**Preglednica 2:** Rezultati izračunov recesijskih konstant v dnevih za 11 vodomernih postaj porečja Ljubljanice z različno kombinacijo kriterijev. Kombinacija kriterijev je sestavljena iz izbrane metode (MRC/IRS), dolžine segmenta upadanja (4/5/6/7 dni) in obdobja, za katerega je izračunan prag Q70 (C = celo obdobje, M = mesečno, S = sezonsko).

**Table 2:** Results of recession constant calculations in days for 11 gauging stations in the Ljubljanica River catchment. The criteria combination consists of the chosen method (MRC/IRS), segment length (4/5/6/7 days), and period for which threshold Q70 is calculated (C = entire period of data, M = monthly, S = seasonal).

Kombinacija kriterijev/ Combination of criteria	Vodometna postaja/Gauging station										
	5030	5078	5240	5270	5330	5500	5540	5770	5840	5880	5910
	Vrhnika	Moste	Verd	Bistra	Borovnica	Dvor	Razori	Cerknica	Mali Otok	Hasberg	Malni
MRC_4_C	7,1	8,7	8,7	20,6	6,5	10,2	5,6	2,2	2,3	10,5	19,4
MRC_4_M	9,3	11,1	11,0	25,9	7,9	11,0	6,9	3,2	4,0	11,0	28,1
MRC_4_S	8,9	10,3	10,2	22,6	7,6	8,5	8,1	2,4	3,5	11,2	21,4
IRS_4_C	10,0	12,1	12,5	29,0	10,7	14,5	8,5	4,6	3,4	12,6	24,3
IRS_4_M	9,3	13,2	14,2	30,2	10,2	16,1	9,3	5,4	NA*	12,8	36,7
IRS_4_S	10,7	12,8	13,9	29,9	11,5	15,5	9,8	4,8	3,6	12,8	27,5
MRC_5_C	7,7	9,6	9,1	20,2	8,0	11,8	8,3	3,5	2,5	10,9	19,0
MRC_5_M	9,6	11,6	12,0	27,7	9,1	12,4	7,4	5,3	4,5	11,3	28,3
MRC_5_S	9,7	11,1	10,7	23,6	9,3	9,1	8,9	3,6	3,8	11,6	21,9
IRS_5_C	9,9	13,1	12,8	28,2	13,1	16,8	10,9	5,6	3,4	12,6	22,7
IRS_5_M	11,7	13,0	15,2	31,1	11,7	18,8	10,4	6,7	4,5	13,0	35,8
IRS_5_S	11,1	13,3	14,4	29,6	12,9	19,3	10,1	5,5	4,1	13,2	27,4
MRC_6_C	8,8	10,4	10,9	21,3	8,0	14,4	9,3	3,9	2,9	11,2	19,5
MRC_6_M	10,1	11,8	13,0	28,4	9,2	16,0	6,6	4,8	4,7	11,8	29,1
MRC_6_S	10,2	11,9	12,0	24,9	10,2	9,2	9,7	3,5	4,9	12,1	22,4
IRS_6_C	10,4	13,8	13,4	28,5	14,0	18,2	12,4	6,5	3,5	12,8	22,6
IRS_6_M	12,0	13,4	15,2	31,2	11,5	19,8	11,0	6,4	4,6	13,6	35,7
IRS_6_S	11,6	14,1	14,2	30,3	13,6	21,6	11,6	5,7	4,2	13,6	27,4
MRC_7_C	9,6	10,7	11,3	21,1	12,6	16,6	11,4	3,7	3,0	11,8	20,6
MRC_7_M	9,9	12,3	13,3	29,5	8,9	19,3	9,8	3,7	4,2	12,0	28,5
MRC_7_S	10,9	11,4	12,9	25,4	10,5	18,3	9,2	3,3	3,6	12,2	22,7
IRS_7_C	11,0	13,9	13,8	27,4	15,7	20,3	12,9	7,2	NA*	13,3	23,5
IRS_7_M	12,3	13,6	15,1	32,2	10,5	21,3	12,2	6,1	4,1	13,7	33,6
IRS_7_S	11,9	13,9	15,0	29,6	13,6	21,3	11,6	5,4	NA*	13,7	26,8
$\sigma_x$ [dnevi]	1,3	1,5	1,9	3,6	2,3	4,1	1,9	1,4	0,7	1,0	5,2
$\sigma_x$ [%]	13	12	15	13	22	26	19	29	18	8	20
*izračun vrednosti recesijske konstante ni uspel/ the calculation of the recession constant value was not successful						Minimalna vrednost/Minimum value		Maksimalna vrednost/Maximum value			

Grafično so rezultati glede na dolžino segmenta upadanja prikazani na sliki 4. Za vsako dolžino segmenta so rezultati prikazani za obe metodi izračuna recesijske konstante MRC in IRS in za vse pragove Q70. Rezultati kažejo na nekoliko višje vrednosti recesijske konstante pri izbiri metode IRS. Z daljšanjem segmenta upadanja se povečuje razpon izračunanih vrednosti recesijskih konstant pri obeh metodah, kar je predvsem posledica višjih izračunanih vrednosti za daljše segmente upadanja. Znano je namreč, da daljši segmenti upadanja

izkazujejo počasnejše upadanje recesijskih krivulj (WMO, 2008). Na podlagi grafičnega prikaza je glede na način izračuna začetnega pretoka Q70 opaziti razliko v raztrosu rezultatov recesijskih konstant pri metodi MRC, in sicer je raztros v primerih mesečno izračunanega Q70 nekoliko večji kot v primeru izračuna Q70 po dveh sezonah.

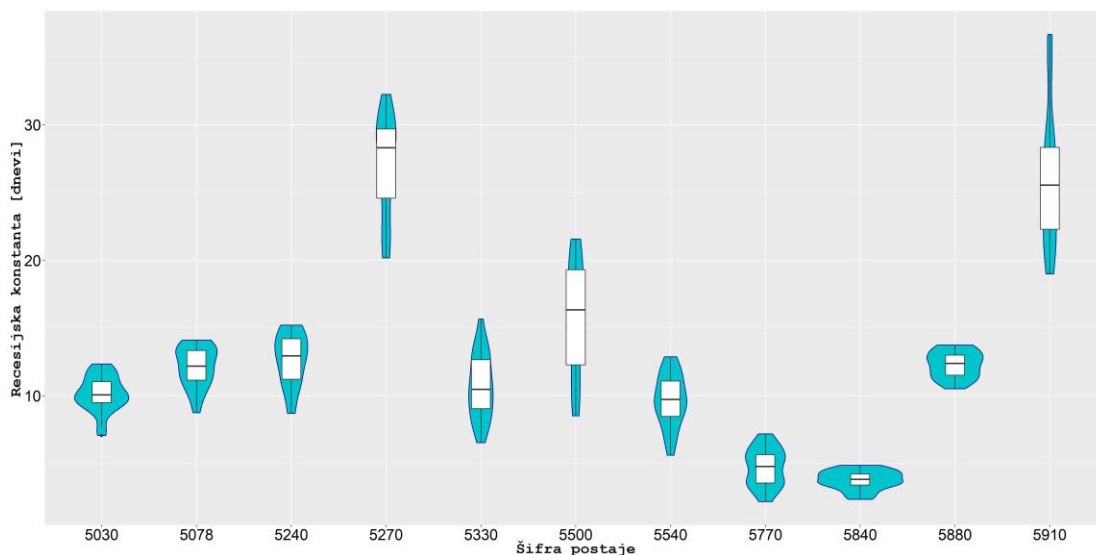
Rezultati po posameznih postajah so prikazani grafično z uporabo violinskih grafov (angl. *violin plot*) (slika 5), ki združuje graf škatle z brki (angl. *box and whiskers plot*) in obrnjeni graf funkcije

gostote verjetnosti na obeh straneh (angl. *probability density function*). V povprečju so najvišje vrednosti recesijskih konstant izračunane za postaji Bistra (5270) in Malni (5910), najnižje pa za Mali Otok (5840) in Cerknico (5770), in sicer povprečne vrednosti v tem zaporedju znašajo 27,0 in 26,0 dni ter 3,8 in 4,7 dni.

Tako indeks baznega odtoka (*BFI*) kot recesijska konstanta se v hidrologiji uporabljata za določanje lastnosti porečij, predvsem v smislu zalog vode. Višje vrednosti *BFI* pomenijo boljšo povezanost med površinsko vodo in zalogami podtalnice, ki v času nizkih pretokov predstavljajo večji del pretoka v vodotoku in s tem višjo vrednost recesijske konstante. Pri nizkih vrednostih *BFI* je ta povezava slabša, posledično so tudi recesijske konstante nižje. Izračunane vrednosti *BFI* obravnavanih postaj so prikazane v preglednici 1. Vidimo, da imata najvišji *BFI* res postaji z najvišjima povprečnima recesijskima konstantama, in sicer Bistra (5270) in Malni (5910). Velja tudi nasprotno, Cerknica (5770) in Mali Otok (5840) imata najnižji *BFI* in najmanjši povprečni recesijski konstanti.

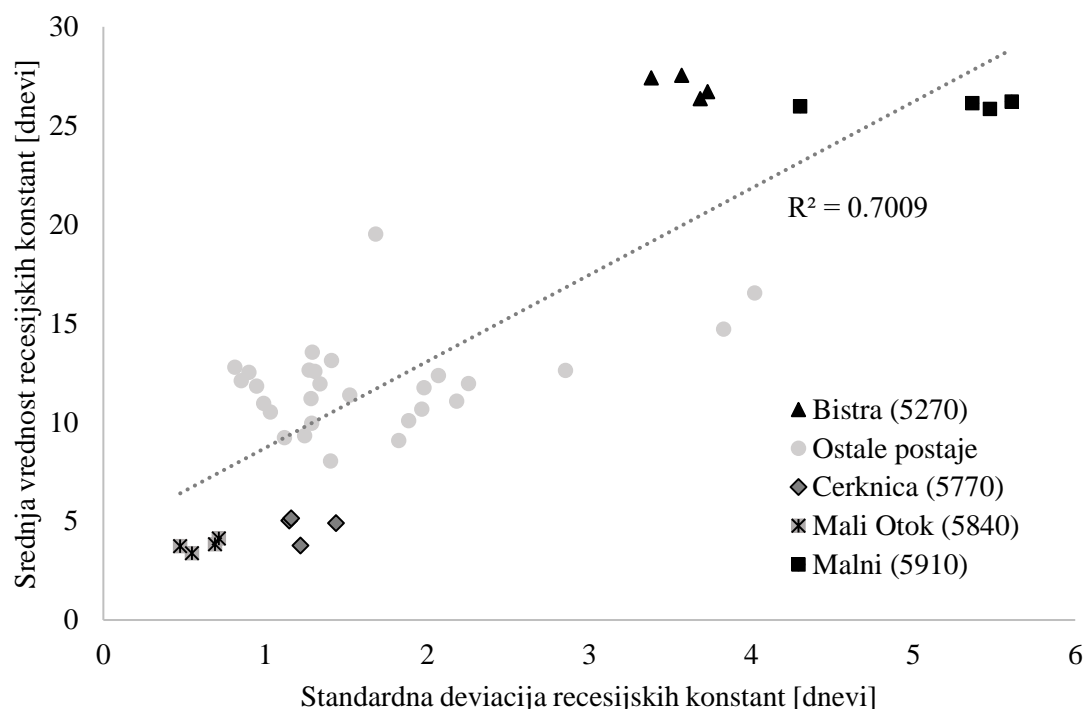
Za vsako od analiziranih postaj smo ločeno za vsako dolžino segmenta (4, 5, 6, 7 dni) izračunali povprečno vrednost recesijskih konstant ter pripadajočo standardno deviacijo, ne glede na izbrano kombinacijo kriterijev metode izračuna in izračuna praga Q70 (slika 6). Z večanjem povprečnih vrednosti recesijskih konstant se izrazito povečuje tudi standardna deviacija. Koeficient determinacije znaša 0,7. To pomeni, da obstajajo največje razlike med izračunanimi vrednostmi recesijskih konstant pri postajah, za katere je značilno počasno upadanje recesijske krivulje, v našem primeru sta to postaji Bistra (5270) in Malni (5910).

Za nadaljnje statistične analize smo preverili ustreznost izbire parnega *t*-testa zaradi relativno majhnih vzorcev. V primeru testiranja vpliva metode izračuna na rezultat znaša povprečni korelacijski koeficient med pari 0,81, v primeru testiranja vpliva izbire obdobja za izračun začetnega pretoka Q70 pa koeficient korelacije znaša celo 0,92, kar potrjuje ustreznost izbire in verodostojnost rezultatov izvedenih testov.



**Slika 5:** Prikaz vrednosti recesijskih konstant v dnevih, izračunanih z različnimi računskimi kriteriji, za 11 vodomernih postaj porečja Ljubljanice.

**Figure 5:** Values of recession constants in days, calculated using different criteria, for 11 gauging stations in the Ljubljana River catchment.



**Slika 6:** Povezava med srednjo vrednostjo recesijske konstante posamezne postaje (4 različne dolžine segmenta upadanja) in pripadajočo standardno deviacijo.

**Figure 6:** Relationship between the mean value of the recession constant (4 different segment lengths) and standard deviation for individual gauging station.

**Preglednica 3:** Rezultati parnega t-testa s stopnjo značilnosti  $\alpha = 0,05$  za preverjanje statistično značilnih razlik med rezultati recesijskih konstant, izračunanih po metodah MRC in IRS.

**Table 3:** Results of paired t-test with significance level  $\alpha = 0.05$ , where statistical significant differences between results of recession constant calculated by using MRC and IRS method were analysed.

Vodomerna postaja/ Gauging station		p-vrednost/ p-value	Statistično značilna razlika med rezultati MRC in IRS/Statistically significant difference between the results of MRC and IRS
5030	Vrhnika	$7,97 \times 10^{-6}$	✓
5078	Moste	$3,35 \times 10^{-7}$	✓
5240	Verd	$3,1 \times 10^{-8}$	✓
5270	Bistra	$1,26 \times 10^{-6}$	✓
5330	Borovnica	$1,16 \times 10^{-6}$	✓
5500	Dvor	$5,69 \times 10^{-5}$	✓
5540	Razori	$1,04 \times 10^{-6}$	✓
5770	Cerknica	$1,27 \times 10^{-8}$	✓
5880	Hasberg	$2,64 \times 10^{-12}$	✓
5910	Malni	$4,86 \times 10^{-7}$	✓

## 5. Statistične in grafične analize ter razprava

### 5.1 Vpliv izbire metode izračuna

Vpliv izbire metode izračuna na vrednost rezultata recesijske konstante smo preverili s parnim oz. odvisnim dvostranskim  $t$ -testom s stopnjo značilnosti  $\alpha = 0,05$ . Ugotovili smo, da je na vseh obravnavanih postajah statistično značilna razlika med rezultati recesijske konstante, izračunane po metodah MRC in IRS (preglednica 3). To pomeni, da ima izbor metode statistično značilen vpliv na rezultat recesijske konstante nizkih pretokov. Vrednosti recesijskih konstant, izračunanih po metodi IRS, so v povprečju za 3,1 dan višje od vrednosti, izračunanih po metodi MRC.

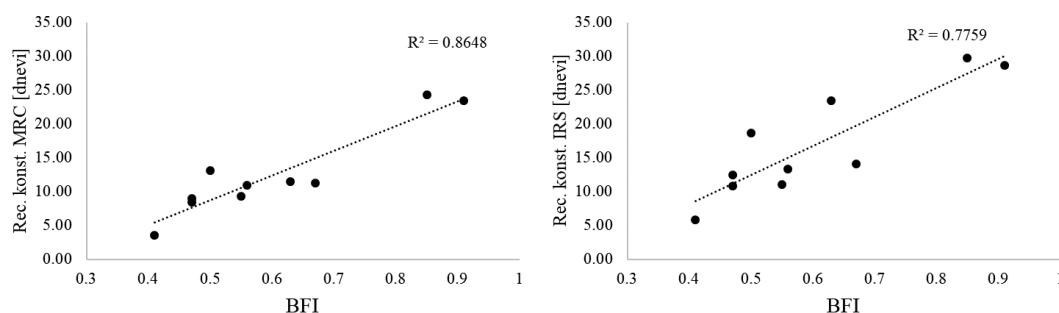
Glede na to, da je recesijska konstanta tako kot indeks baznega odtoka ( $BFI$ ) kazalnik zaloge vode v porečju, smo s korelacijo preverili še razmerje med indeksi  $BFI$  posameznih postaj in pripadajočih povprečnih vrednosti recesijskih konstant po obeh metodah izračuna (slika 7). Ugotovili smo, da obe metodi kažeta relativno dobro ujemanje z indeksom  $BFI$ . Nekoliko višji koeficient determinacije  $R^2 = 0,86$  je pri metodi MRC. Na podlagi tega pa žal ne moremo sklepati o boljši ustreznosti posamezne metode za izračun recesijskih konstant.

Med  $BFI$  in recesijsko konstanto je pozitivna odvisnost, kar pomeni, da višje vrednosti indeksa baznega odtoka praviloma pomenijo tudi višje vrednosti recesijskih konstant in posledično počasnejšo stopnjo upadanja krivulje padajočega dela hidrograma. Ebrahim in Villholth (2016), ki sta v študiji ocene plitvih vodonosnikov majhnih

porečij Južne Afrike prav tako ugotovila dobro povezavo med recesijskimi konstantami in  $BFI$ , v tem celo vidita uporabno vrednost, saj ima določanje recesijske konstante na podlagi  $BFI$  prednost pred recesijsko analizo predvsem z vidika krajšega časa izračuna.

### 5.2 Vpliv izbire dolžine segmentov

Vpliv izbire dolžine segmentov smo preverjali s parnim oz. odvisnim dvostranskim  $t$ -testom. Rezultati statističnega parnega  $t$ -testa, ki je bil izveden za vse kombinacije parov rezultatov, pri katerih se je v izračunu spremenila samo dolžina segmenta upadanja recesijske krivulje, so prikazani v preglednici 4. Ugotovili smo, da je pri osmih od desetih obravnavanih postaj statistično značilna razlika med rezultati recesijskih konstant glede na izbrano dolžino segmenta pri vsaj treh kombinacijah. Izjema sta postaji Bistra (5270) in Malni (5910), kjer pri slednji niso bile ugotovljene statistično značilne razlike v prav nobenem primeru, pri Bistri pa samo v primeru uporabe dolžine segmenta 5 oz. 6 dni. V poglavju 4 Rezultati smo ugotovili, da prihaja do največjih razlik med rezultati recesijskih konstant pri postajah, za katere je značilno počasno upadanje recesijske krivulje. V našem primeru to velja za postaji Bistra (5270) in Malni (5910). Na podlagi tega lahko sklepamo, da na rezultate analiz recesijskih krivulj nizkih pretokov tistih vodotokov, ki imajo dobro povezavo s podzemno vodo oziroma drugimi oblikami zaloge vode v porečju, izbira dolžine segmenta vpliva manj kot pri vodotokih s šibko povezavo ali celo brez nje.



**Slika 7:** Korelacija med  $BFI$  in povprečnimi vrednostmi recesijskih konstant po metodi MRC (levo) in metodi IRS (desno) za posamezne vodomerne postaje v porečju reke Ljubljanice.

**Figure 7:** Correlation between  $BFI$  and average values of the recession constant using the MRC method (left) and IRS method (right) for individual gauging stations in the Ljubljanica River catchment.

**Preglednica 4:** Rezultati parnega *t*-testa s stopnjo značilnosti  $\alpha = 0,05$  za preverjanje statistično značilnih razlik med rezultati recesijskih konstant, izračunanih za različne dolžine segmentov upadanja.

**Table 4:** Results of paired *t*-test with significance level  $\alpha = 0.05$ , where statistically significant differences between the results of the recession constant calculated for different segment lengths were checked.

Kombinacija kriterijev/Combination of criteria	Vodomerna postaja/Gauging station									
	5030 Vrhnik	5078 Moste	5240 Verd	5270 Bistra	5330 Borovnica	5500 Dvor	5540 Razori	5770 Cerknica	5880 Hasberg	5910 Malni
p-vrednost/p-value	0,0994	0,0219	0,0044	0,4292	0,0002	0,0070	0,0268	0,0013	0,0110	0,2775
4 in 5 dni Statistično značilna razlika med rezultati*		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	
p-vrednost/p-value	0,0110	0,0049	0,0059	0,0811	0,0014	0,0031	0,0237	0,0005	0,0019	0,8511
4 in 6 dni Statistično značilna razlika med rezultati*	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	
p-vrednost	0,0062	0,0020	0,0030	0,2089	0,0251	0,0002	0,0062	0,0188	< 0,0001	0,7245
4 in 7 dni Statistično značilna razlika med rezultati*	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	
p-vrednost/p-value	0,0068	0,0012	0,0552	0,0171	0,0938	0,0135	0,0766	0,6502	0,0024	0,1430
5 in 6 dni Statistično značilna razlika med rezultati*	✓	✓		✓		✓			✓	
p-vrednost/p-value	0,0065	0,0013	0,0242	0,1171	0,1851	0,0086	0,0046	0,7677	< 0,0001	0,8362
5 in 7 dni Statistično značilna razlika med rezultati*	✓	✓	✓			✓	✓		✓	
p-vrednost/p-value	0,0225	0,6580	0,0422	0,7303	0,3379	0,0739	0,1041	0,3672	0,0485	0,7492
6 in 7 dni Statistično značilna razlika med rezultati*	✓		✓						✓	

\*Statistically significant difference between the results

**Preglednica 5:** Izračun povprečnih razlik med recesijskimi konstantami glede na dolžino segmenta.

**Table 5:** Calculation of the average differences between recession constants with respect to the segment length.

Kombinacija kriterijev/Combination of criteria	Povprečje [dnevi]/Average [days]	Razlike povprečij (MRC- IRS) [dnevi]/Differences of averages (MRC-IRS) [days]	Povprečja razlik [dnevi]/Average of differences [days]
MRC_4_C	10,0	3,9	
IRS_4_C	13,0		
MRC_4_M	12,6	3,2	3,6
IRS_4_M	15,7		
MRC_4_S	11,1	3,8	
IRS_4_S	14,9		
MRC_5_C	10,8	3,8	
IRS_5_C	14,6		
MRC_5_M	13,5	3,3	3,6
IRS_5_M	16,7		
MRC_5_S	11,9	3,7	
IRS_5_S	15,7		
MRC_6_C	11,8	3,5	
IRS_6_C	15,2		
MRC_6_M	14,1	2,9	3,4
IRS_6_M	17,0		
MRC_6_S	12,6	3,7	
IRS_6_S	16,4		
MRC_7_C	12,9	2,9	
IRS_7_C	15,9		
MRC_7_M	14,7	2,3	2,6
IRS_7_M	17,1		
MRC_7_S	13,7	2,6	
IRS_7_S	16,3		

**Preglednica 6:** Rezultati parnega *t*-testa s stopnjo značilnosti  $\alpha = 0,05$  za preverjanje statistično značilnih razlik med rezultati recesijskih konstant, kjer je prag *Q*70 izračunan za različna obdobja.

**Table 6:** Results of paired *t*-test with significance level  $\alpha = 0.05$ , where statistically significant differences between results of the recession constant calculated using different periods for determination of *Q*70 were analysed.

Kombinacija kriterijev/Combination of criteria		C vs. M		C vs. S		M vs. S	
Vodomerma postaja/ Gauging station		p-vrednost/ p-value	Statistično značilna razlika med rezultati/Statistically significant difference between the results	p-vrednost/ p-value	Statistično značilna razlika med rezultati/Statistically significant difference between the results	p-vrednost/ p-value	Statistično značilna razlika med rezultati/Statistically significant difference between the results
5030	Vrhnika	0,009	✓	< 0,0001	✓	0,72	
5078	Moste	0,035	✓	0,006	✓	0,54	
5240	Verd	< 0,0001	✓	< 0,0001	✓	0,0014	✓
5270	Bistra	0,001	✓	0,0007	✓	0,0014	✓
5330	Ilovnic	0,21		0,9		0,012	✓
5500	Dvor	0,0004	✓	1		0,16	
5540	Razori	0,15		0,93		0,17	
5770	Cerknica	0,14		0,18		0,0009	✓
5880	Hasberg	0,0009	✓	0,0003	✓	0,025	✓
5910	Malni	< 0,0001	✓	< 0,0001	✓	< 0,0001	✓

Z vidika vpliva izbire dolžine segmenta na rezultat recesijske konstante je najmanj razlik ugotovljenih, ko smo primerjali rezultate izbranih dolžin segmentov 6 in 7 dni, 5 in 7 dni ter 5 in 6 dni. Pri primerjavah rezultatov, kjer je bila uporabljena dolžina segmenta 4 dni, so statistično značilne razlike med rezultati pri sedmih oziroma osmih postajah od obravnavanih desetih. Sklepamo lahko, da ima največji vpliv na izračun recesijske konstante izbira dolžine segmenta 4 dni, vendar to ne pomeni, da rezultat v tem primeru ni ustrezen.

Vpliv dolžine segmenta pri analizi recesijskih krivulj je bil dodatno obravnavan na podlagi povprečij med vsemi obravnavnimi postajami (preglednica 5). S tem se izključijo vplivi lastnosti posameznih porečij (npr. geologija, velikost porečja). Najprej smo za vsako kombinacijo kriterijev izračunali povprečje recesijske konstante desetih postaj na porečju Ljubljane (brez postaje Mali Otok, za katerega nismo imeli treh vrednosti recesijskih konstant po metodi IRS). Nato smo izračunali razlike med povprečnima vrednostma po metodi MRC in IRS, vendar za enako dolžino segmenta in enako metodo določitve začetnega pretoka *Q*70. V zadnjem stolpcu preglednice 5 so

podane povprečne vrednosti teh razlik za posamezne dolžine trajanja segmentov, tj. 4, 5, 6 in 7 dni. Ugotovili smo, da so najmanjše razlike med vrednostmi recesijskih konstant, izračunanih z različnimi začetnimi kriteriji, v primeru dolžine segmenta upadanja 7 dni, in sicer povprečje razlik znaša 2,6 dni (4. stolpec preglednice 5).

### 5.3 Vpliv izbire obdobja, za katerega se določi prag *Q*70

Tako kot za presojo ostalih vplivov na rezultat recesijske konstante smo tudi za presojo vpliva izbire obdobja, za katerega se izračuna prag *Q*70 kot začetni pretok recesijske krivulje, izvedli analizo s parnim oz. odvisnim dvostranskim *t*-testom, s stopnjo značilnosti  $\alpha = 0,05$ . Naredili smo tri teste za določitev statistično značilnih razlik med pari rezultatov recesijskih konstant, za vsako obravnavano postajo posebej. Prag *Q*70 je bil izračunan:

- 1) za celotno obdobje podatkov v primerjavi z mesečnimi izračuni (C vs. M),
- 2) za celotno obdobje podatkov v primerjavi s sezonskimi izračuni (C vs. S) in



3) mesečno v primerjavi s sezonskimi izračuni (M vs. S).

Rezultati testov so prikazani v preglednici 6.

Rezultati po postajah kažejo, da je postaja Razori (5540) edina, za katero lahko na podlagi statističnega testa ugotovimo, da izbira obdobja za izračun praga Q70 ne vpliva statistično značilno na rezultat. Pri postajah Verd (5240), Bistra (5270), Hasberg (5880) in Malni (5910) so srednje vrednosti razlik med primerjanimi pari rezultatov različne od nič, kar kaže na vpliv izbire obdobja za izračun Q70 na rezultat recesijske konstante. Statistično značilna razlika med rezultati recesijskih konstant, izračunanih na podlagi mesečno in sezonsko določenih Q70, je bila ugotovljena še na postajah Borovnica (5330) in Cerknica (5770). Za isti postaji pa test primerjav recesijskih konstant, izračunanih na podlagi praga Q70 za celo obdobje in mesečnih vrednosti ter praga Q70 za celo obdobje in sezonskih vrednosti, ni pokazal statistično značilnih razlik med rezultati. Ravno obratno velja za postaji Vrhnika (5030) in Moste (5078). Za postajo Dvor (5500) je bila ugotovljena statistično značilna razlika med rezultati recesijskih konstant, ko smo primerjali vrednosti na podlagi praga Q70, določenega za celo obdobje podatkov in po mesecih.

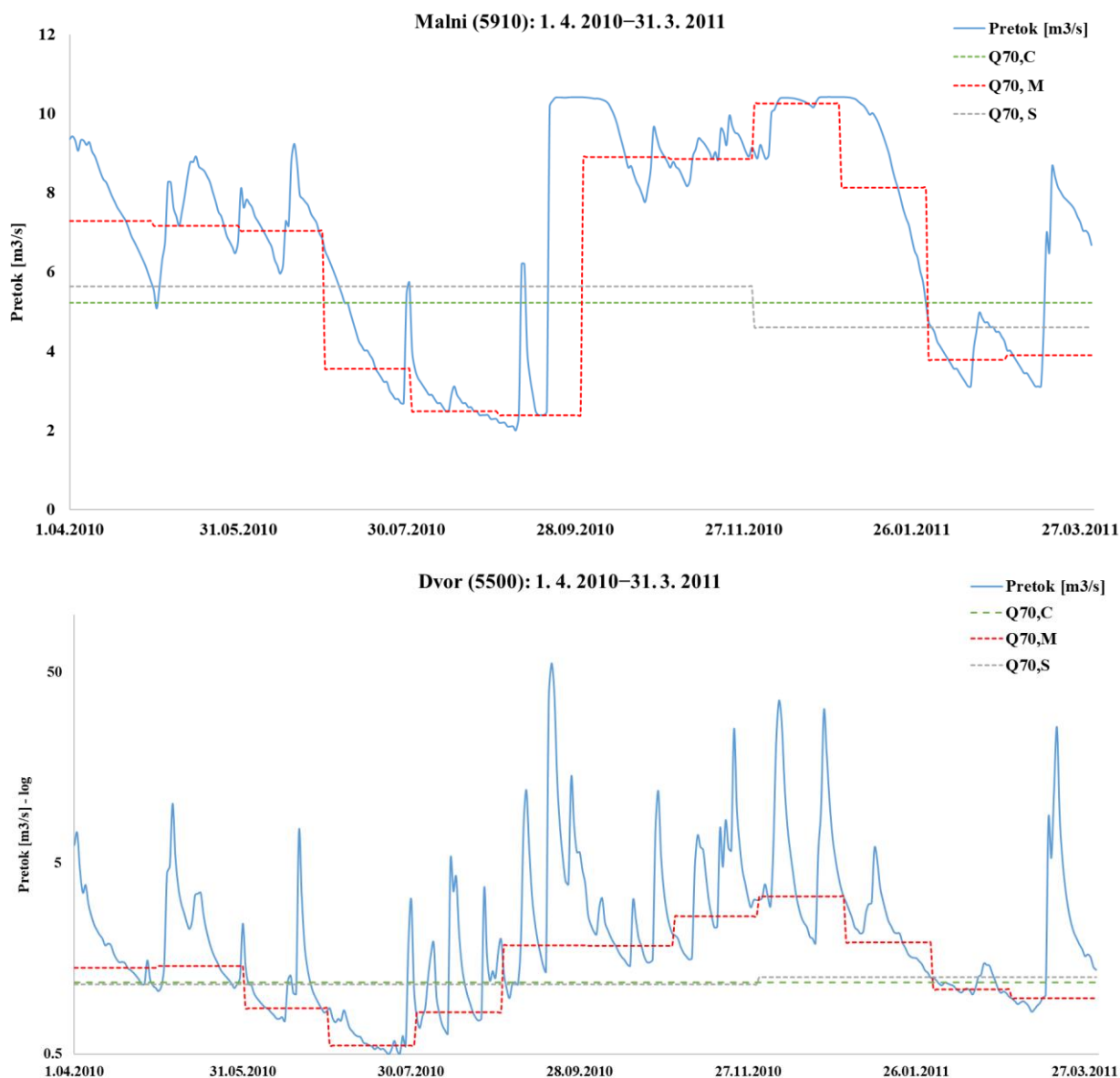
Dodatno smo preverili vpliv tega računskega kriterija še na podlagi grafičnega prikaza dveh naključno izbranih hidrogramov za naključno izbrano leto. Na sliki 8 sta prikazana hidrograma za vodomerni postaji Malni (5910) in Dvor (5500) za eno leto med 1. aprilom 2010 in 31. marcem 2011. Na vsakem od hidrogramov so označene vrednosti praga Q70, ki je bil v naši študiji izbran kot začetni pretok recesijskih krivulj, izračunan na podlagi različnih obdobj podatkov. Z zeleno barvo sta označena pretoka Q70, ki sta bila izračunana na obravnavanem enoletnem nizu podatkov, z rdečo barvo so označene vrednosti praga Q70 za vsak mesec posebej, s sivo barvo pa sezonski vrednosti praga Q70. Medtem ko se vrednosti Q70, izračunane za celotno obdobje in po dveh sezonah, malo razlikujejo, pa so pri mesečnih vrednostih Q70 izrazitejše razlike (slika 8). Prag Q70 določa začetek recesijske krivulje, ki jo upoštevamo v recesijski analizi. Opazimo lahko, da v primeru postaje Malni

(5910) v nekaterih mesecih ne analiziramo recesijskih krivulj z vidika nizkih pretokov, saj prag Q70 sega v visoke pretoke. Po drugi strani pa pri postaji Dvor (5500) tega ne opazimo. Razlog je lahko v hudourniškem značaju reke Gradaščica, za katero je značilen velik razpon med nizkimi in visokimi pretoki in hiter upad hidrograma odtoka zaradi hitre odzivnosti porečja na padavinske dogodke. Posledično so vrednosti pretokov, ki so presežene 70 % časa ali več v nekem mesecu, na postaji Dvor (5500) nižje kot v primeru Malni (5910), kjer lahko visoki pretoki v primeru kraških poplav trajajo tudi več tednov. Za izbrani postaji in obdobje smo zato ponovili izračune recesijskih konstant za štiri dolžine segmentov upadanja po obeh metodah MRC in IRS in z različno določenimi Q70. Izračuni so pokazali, da je pri postaji Malni (5910) vrednost recesijske konstante, ko smo Q70 izračunali po mesecih, občutno višja kot v primerih izračuna Q70 za celo leto ali po dveh sezonah. V prvem primeru je povprečje osmih izračunanih vrednosti 35,4 dni, v drugem in tretjem primeru pa 15,1 in 17,8 dni. Pri postaji Dvor (5500) med povprečnimi vrednostmi recesijskih konstant ni tako velikih razlik. V primeru, ko je Q70 izračunan za celotno obdobje, znaša povprečna vrednost recesijskih konstant 14,6 dni, v primeru izračuna Q70 po mesecih znaša 16,4 dni in v primeru izračuna Q70 za dve sezoni 17,2 dni. Na podlagi teh ugotovitev lahko interpretiramo tudi opažanje iz poglavja 4 Rezultati, da je iz slike 4 razvidna razlika med raztrosom rezultatov recesijskih konstant. Večji raztros je opazen pri rezultatih, kjer je bil Q70 izračunan mesečno, kot v primeru recesijskih konstant, kjer je bil upoštevan sezonsko izračunan začetni pretok. Vrednosti mesečno izračunanih Q70 se pri postajah, kot je Malni (5910), lahko zelo razlikujejo in posledično so tudi razlike v vrednostih recesijskih konstant večje kot v primeru upoštevanja sezonsko izračunanih Q70.

Rezultati *t*-testa za celotno obdobje podatkov niso neposredno primerljivi z rezultati za eno leto podatkov. Ne glede na to pa so nam slednji pomagali pri interpretaciji, zakaj pride do razlik ali podobnosti med posameznimi postajami ter kaj vpliva na rezultate posamezne postaje. Vidimo, da rezultati izbranih dveh postaj in različnih obdobj

izračuna praga  $Q_{70}$  potrjujejo ugotovitve na podlagi analiz, ki smo jih izvedli za vse postaje in za celotno obdobje razpoložljivih podatkov. Tako je pri postaji Malni (5910) ugotovljena statistično značilna razlika med rezultati recesijskih konstant ne glede na to, katere pare primerjamo. Pri postaji Dvor

(5500) pa je bila statistično značilna razlika ugotovljena samo v primeru recesijskih konstant, ko je bil prag  $Q_{70}$  izračunan za celotno obdobje in po mesecih.



**Slika 8:** Primerjava vpliva vrednosti praga  $Q_{70}$  kot pretoka, pri katerem se začne recesijska krivulja, izračunanega za različna obdobja podatkov (obravnavano leto, mesečno, sezonsko).

**Figure 8:** Comparison of threshold  $Q_{70}$  as discharge where the recession curve starts, calculated for different periods of data (shown year, monthly, season).

## 6. Zaključki

S to študijo smo želeli raziskati vpliv izbranih kriterijev na izračunane vrednosti recesijskih konstant, in sicer po dveh metodah (MRC in IRS) ter za različne dolžine segmenta upadanja in za različna obdobja izračuna začetnega pretoka (Q70) za analizo recesijskih krivulj (za celotno obdobje podatkov, mesečno ali po sezonah). Recesijske konstante smo izračunali za 11 vodomernih postaj v porečju reke Ljubljanice, ki se z vidika dinamike oblikovanja odtoka precej razlikujejo zaradi različnih hidrogeoloških značilnosti prispevnih območij. Vplive vseh treh posameznih parametrov izračuna na vrednost recesijske konstante smo preverjali s statističnim parnim  $t$ -testom ( $\alpha = 0,05$ ). Interpretacijo rezultatov statističnih testov smo dodatno podprli še z drugimi analizami rezultatov.

Nismo iskali odgovora na vprašanje, katera kombinacija izbranih računskih kriterijev je najustreznejša, temveč zgolj, kateri od obravnavanih kriterijev najbolj vplivajo na rezultate recesijskih konstant. Analize so pokazale, da je v primerih izbire obdobja za izračun praga Q70 in izbire dolžine segmenta vpliv različen od postaje do postaje in ni enotnega vzorca. V primeru ugotavljanja vpliva izbire metode MRC ali IRS smo prav na vseh postajah ugotovili statistično značilno razliko med rezultati. Metoda IRS daje v povprečju za 3,1 dneva višje rezultate recesijskih konstant kot metoda MRC.

Analiza vplivov dolžine segmentov upadanja kaže manjši vpliv na rezultat recesijske konstante v primeru, ko gre za vodotoke, za katere velja visok *BFI* oziroma dobra povezava med površinskimi vodami in zalogo vode v porečju. Poleg tega je bilo ugotovljeno tudi, da je bilo največ razlik med rezultati ugotovljenih, ko je bil v primerjavo vključen rezultat z dolžino segmenta 4 dni. Velja poudariti, da to ne pomeni, da je izbira dolžine segmenta 4 dni neustrezna, temveč da se v povprečju ti rezultati najbolj razlikujejo od ostalih. To je bilo potrjeno tudi z izračunom povprečnih razlik med recesijskimi konstantami glede na dolžino segmenta. Največje razlike so pri dolžini 4 dni, najmanjše pa pri dolžini 7 dni.

Vpliv izbire obdobja za izračun začetnega pretoka, v našem primeru Q70, ni pokazal statistično značilnih razlik med rezultati samo pri postaji Razori (5540). Pri štirih od desetih obravnavanih postaj so statistično značilne razlike med rezultati pri vseh treh kombinacijah kriterijev. Vpliv izbire obdobja na začetni pretok smo pojasnili z grafično ponazoritvijo naključno izbranih hidrogramov za dve postaji, ki je pokazal, da je za ustrezno in relevantno izbiro začetnega obdobja potrebno poznavanje lastnosti porečja, predvsem njegove geologije, hidrološke odzivnosti ter sezonske spremenljivosti pretokov. Na podlagi te študije lahko ugotovimo, da je vključevanje slednjega v analize recesijskih krivulj z vidika nizkih pretokov nedvomno potrebno. Dodatna analiza hidrogramov je pokazala, da je izbira začetnega pretoka pogojena z odzivnostjo porečja na padavine.

Čeprav so v preteklosti nekaterim metodam določanja recesijskih konstant očitali predvsem subjektivnost, pa sta Lamb in Beven (1997) mnenja, da to ni nujno slabost, saj lahko strokovnjaki, ki dobro poznajo neko porečje, presodijo o kakovosti in ustreznosti podatkov, na katerih se izvaja recesijska analiza, enako potem velja tudi za kakovost rezultatov analiz. Za primer študije v nehomogenem porečju reke Ljubljanice (kraški in hudourniški del) bi bilo tako za posamezne postaje ustrezneje izbrati začetni pretok oz. prag za analizo recesijskih krivulj na podlagi hidrološkega poznavanja lastnosti porečja in njegove odzivnosti na padavinske dogodke. Poleg tega bi bilo za posamezne postaje smiselno preveriti, ali prihaja do razlik v rezultatih recesijskih konstant, če se te določijo ločeno za dve ali več sezon (npr. poletje in zima). Obdobja najvišje evapotranspiracije po navadi sovpadajo z obdobji najnižjih pretokov. Ravno na podlagi teh pa želimo določiti lastnosti porečja oziroma povezanost površinske vode z zalogami v porečju (npr. jezeri, podzemno vodo) (Tallaksen, 1991; Demuth in Schreiber, 1994), kar lahko vpliva na ustreznost recesijske konstante. Navedene analize so izzivi za nadaljnje delo pri raziskovanju nehomogenih porečij, kot je porečje reke Ljubljanice.

Področje analize recesijskih krivulj nizkih pretokov odpira še številna druga vprašanja in izzive, ki bi jih

bilo smiselno v prihodnosti obravnavati, saj so recesijske konstante široko uporabne ne samo v teoretično usmerjeni hidrologiji, ampak tudi v uporabni, inženirski hidrologiji. Veliko odločitev o inženirskih ukrepih na področju upravljanja vodnih virov namreč temelji na hidroloških študijah in modelih, kjer imajo svojo vlogo tudi recesijske konstante oziroma analiza recesijskih krivulj.

## Zahvala

Delo je nastalo v okviru doktorskega študija prve avtorice in je bilo delno sofinancirano iz raziskovalnega projekta J2-7322 »Modeliranje hidrološkega odziva nehomogenih povodij« ter raziskovalnega programa P2-0180 Vodarstvo in geotehnika, ki ju prav tako financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

## Viri

ARSO (2018). Arhiv hidroloških podatkov, arhiv površinskih voda.

[http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov\\_arhiv\\_tab.php](http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php)

(Pridobljeno 5. 6. 2018).

Bat, M., Dolinar, M., Frantar, P., Hrvatin, M., Kobold, M., Kurnik, B., Nadbath, M., Ožura, V., Uhan, J., Ulaga, F. (2008). Vodna bilanca Slovenije 1971–2000. Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana, 119 str.

Berhail, S., Ouerdachi, L., Boutaghne, H. (2012). The Use of the Recession Index as Indicator for Components of Flow. *Energy Procedia* 18: 741–750. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.090>.

Chen X., Zhang Y-F., Xue, X., Zhang, Z., Wei, L. (2012). Estimation of baseflow recession constants and effective hydraulic parameters in the karst basins of southwest China. *Hydrology Research* 43 (1-2): 102–112. <https://doi.org/10.2166/nh.2011.136>.

de Winter, J. C. F. (2013). Using the Student's t-test with extremely small sample sizes. *Practical Assessment, Research and Evaluation* 18 (10): 12 str.

Demuth, S., Schreiber, P. (1994). Studying storage behaviour using an operational recession method. In: Seuna, P., Gustard, A., Arnell, N. W., Cole, G. A., Eds., FRIEND: Flow Regimes from International Experimental Network Data. Proceedings of Second FRIEND Conference, Braunschweig, Germany, October 1993. IAHS Publ. No. 221: 51–59.

Doctor, D. H., Alexander, E. C., Kuniansky, E. L. (2005). Interpretation of water chemistry and stable isotope data from a karst aquifer according to flow regimes identified through hydrograph recession analysis. U.S. Geological Survey Karst Interest Group Proceedings, September 12–15, 2005, Rapid City, South Dakota: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5160: 82–92.

Ebrahim, G. Y., Villholth, K. G. (2016). Estimating shallow groundwater availability in small catchments using streamflow recession and instream flow requirements of rivers in South Africa. *Journal of Hydrology* 541, part B: 754–765. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.032>.

Ferk, M. (2016). *Paleopoplave v porečju kraške Ljubljane*. Ljubljana, Založba ZRC, 187 str.

Gabrovšek, F., Kogovšek, J., Kovačič, G., Petrič, M., Ravbar, N. (2010). Recent results of tracer tests in the catchment of the Unica River (SW Slovenia), *Acta Carsologica* 39(1), 27–37. <https://doi.org/10.3986/ac.v39i1.110>.

Gregor, M., Malík, P. (2012). Construction of master recession curve using genetic algorithms *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 60, 3–15. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10098-012-0001-8>.

Koffler, D., Gauster, T., Laaha, G. (2016). *Package "lfstat"*, 63 str.

Kogovšek, J. (2001). Monitoring the Malenščica water pulse by several parameters in November 1997. *Acta Carsologica* 30(1): 39–53.

Kogovšek, J. (2004). Physico-chemical properties of waters in the Malenščica recharge area (Slovenia). *Acta Carsologica* 33 (1), 143–158.

Kolbezen, M., Pristov, J. (1998). Površinski vodotoki in vodna bilanca Slovenije. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Hidrometeorološki zavod RS: 98 str. [http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/vodotoki\\_bilanca.html](http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/vodotoki_bilanca.html) (Pridobljeno 23. 11. 2018).

Kovačič, G., Ravbar, N. (2016). "Characterisation of selected karst springs in Slovenia by means of a time series analysis" in Stevanović, Z., Krešič, N., Kukurić, N. Eds., *Karst without Boundaries*, CRC Press, Leiden, Nizozemska.

Kranjc, M. (2007). Poročilo o kakovosti podzemne vode v Sloveniji v letih 2004 in 2005 (Report on the Quality of Groundwater in Slovenia in 2004 and 2005). Ministrstvo

za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana.

Laaha, G., Blöschl, G. (2006). Seasonality indices for regionalizing low flows. *Hydrological Processes*, 20(18), 3851–3878. <https://doi.org/10.1002/hyp.6161>.

Lamb, R., Beven, K. (1997). Using interactive recession curve analysis to specify a general catchment storage model. *Hydrology and Earth System Sciences* 1, 101–113. <https://doi.org/10.5194/hess-1-101-1997>.

Langbein W. B. (1938). Some channel storage studies and their application to the determination of infiltration. *Eos, Transactions, American Geophysical Union* 19: 435–447.

Morlet, G. A., Fourgeau, I., Giard, D. (1982). Wave propagation and sampling theory. *Geophysics* 47: 203–23. <https://doi.org/10.1190/1.1441328>.

Pavlovec, R. (1961). Nekaj misli o sprijemanju mlajšega prodnega nanosa v Ljubljanski kotlini. *Geologija* 30, 287–335.

Petek, M., Kobold, M., Šraj, M. (2015). Low-flow analysis of streamflows in Slovenia using R software and lfstat package. *Acta Hydrotechnica* 27/46 (2014): 13–28.

Petrič, M. (2010). “Characterization, exploitation, and protection of the Malenščica karst spring, Slovenia: case study” in Krešič, N., Stevanović, Z. Eds., *Groundwater hydrology of springs: engineering, theory, management, and sustainability*. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann, 592 str.

R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

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

Šušteršič, F. (1994). *Reka sedmerih imen: s poti po notranjskem krasu*. Logatec: Naklo. 23 str.

Smakhtin, V. U. (2001). Low flow hydrology – a review. *Journal of Hydrology* 240: 147–186. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00340-1).

Tallaksen, L. M. (1989). Analysis of time variability in recessions. *IAHS Publ.*, 187: 85–96.

Tallaksen, L. M. (1991). Recession rate and variability with special emphasis upon the influence of evapotranspiration. Dr. Scient. Thesis, Univ. Oslo, Rapp. Hydrol. 25.

Tallaksen, L. M. (1995). A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology* 165(1–4): 349–370. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02540-R](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02540-R).

Thomas, B. F., Vogel, R. M., Famiglietti, J. S. (2015). Objective hydrograph baseflow recession analysis. *Journal of hydrology* 525: 102–112. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.028>

Vogel, R. M., Kroll C. N. (1996). Estimation of baseflow recession constants: *Water Resources Management*, 10, 4: 303–320. <https://doi.org/10.1007/BF00508898>.

WMO (2008). Manual on Low-flow Estimation and Prediction. Operational Hydrology Report No. 50, WMO-No. 1029, 136 str.