

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Potočnik, N., 2014. Kazalci za sprotno vrednotenje hidrološke suše. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Šraj, M., somentorica Kobold, M.): 79 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Potočnik, N., 2014. Kazalci za sprotno vrednotenje hidrološke suše. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Šraj, M., co-supervisor Kobold, M.): 79 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
HIDROTEHNIČNA SMER

Kandidat:

NEJC POTOČNIK

**KAZALCI ZA SPROTNO VREDNOTENJE
HIDROLOŠKE SUŠE**

Diplomska naloga št.: 3371/HS

**INDICES FOR SIMULTANEOUSLY EVALUATION OF
HYDROLOGICAL DROUGHT**

Graduation thesis No.: 3371/HS

Mentorica:

doc. dr. Mojca Šraj

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentorica:

asist. dr. Mira Kobold

Član komisije:

Ljubljana, 28. 02. 2014

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisan Nejc Potočnik izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Kazalci za sprotno vrednotenje hidrološke suše«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, februar 2014

Nejc Potočnik

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	556.167(043.2)
Avtor:	Nejc Potočnik
Mentor:	doc. dr. Mojca Šraj
Somentor:	asist. dr. Mira Kobold
Naslov:	Kazalci za sprotno vrednotenje hidrološke suše
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	79 str., 15 pregl., 51 sl., 6 en.
Ključne besede	hidrološka suša, mali pretoki, krivulja trajanja, srednji letni minimum, algoritem zaporednih konic, sušni prag, deficit pretoka

Izvleček

Suša je pojav, ko se zaradi pomanjkanja ali nezadostne količine padavin v daljšem obdobju pojavi znatno hidrološko neravnovesje. To privede do zmanjšanja vodnih zalog v zemljini, vodonosnikih in jezerih ter zmanjšanja pretokov v vodotokih. V prvem delu diplomske naloge je zato opisan pojav suše, vzroki za njen nastanek in značilnosti, v katerih se razlikuje od drugih naravnih nesreč. V nadaljevanju pa je večji poudarek na določitvi, analizi in uporabi sušnih kazalcev za določevanje hidrološke suše. Osnova določitvi kazalcev malih pretokov so časovni nizi srednjih dnevni podatkov. Iz teh lahko na različne načine izpeljemo kazalce malih pretokov kot so percentili iz krivulje trajanja pretokov npr. Q_{90} , in najmanjši letni srednji dnevni pretok ($MAM(1)$). Izbrali smo 16 reprezentativnih vodomernih postaj po vsej Sloveniji in preverili izbrane metode. Narejena je analiza rezultatov izračunanih malih pretokov in podane ugotovitve o medsebojni povezavi kazalcev malih pretokov najbolj pogosto uporabljenih kazalcev Q_{95} , Q_{90} , Q_{80} ter $MAM(7)$, $MAM(30)$ in $MAM(60)$. Če izberemo kazalca, ki sta med sabo korelacijsko najbolj odvisna, lahko določimo sušni prag, pod katerim je vodotok v deficitu. Naš glavni cilj pa je določiti točen začetek in konec hidrološke suše, za kar uporabimo metodo, ki nam količinsko definira, ali je izbrano območje v deficitu ali ne. Z metodo algoritma zaporednih konic (SPA) lahko poleg začetka in konca sušnega obdobja določimo tudi intenziteto in vrh hidrološke suše.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	556.167(043.2)
Author:	Nejc Potočnik
Supervisor:	Assist. Prof. Mojca Šraj, Ph.D.
Co supervisor:	Assist. Mira Kobold, Ph.D.
Title:	Indices for simultaneously evaluation of hydrological drought
Document type:	Graduation Thesis-University studies
Notes:	79 p., 15 tab., 51 fig., 6 eq.
Key words:	Hydrological drought, low flows, flow-duration curve, mean annual minima, sequent peak algorithm, threshold level, streamflow deficit

Abstract

Drought is a phenomenon in which lack or insufficient rainfall over a long period of time results in a significant hydrological imbalance. This brings about a reduction of water stored in the soil, aquifers and lakes, and a decrease in the outflow to rivers. In the first part of this thesis we therefore described the phenomenon of drought, the reasons for its appearance and its characteristics, which distinguish it from other natural disasters. The rest of the thesis more importantly focuses on how to calculate, analyse and implement drought indices in order to determine hydrological drought. From the original time series for mean daily flow, low flow characteristic can be derived. The percentiles from the flow duration curve (Q_{90}) and mean annual minimum flow ($MAM(I)$) are two examples. 16 representative gauging stations across Slovenia are selected to test selected methods. Analysis of the results of calculated low flows are made and conclusions are drawn about the relationship between the low flow indices Q_{95} , Q_{90} , Q_{80} and $MAM(7)$, $MAM(30)$, $MAM(60)$. When two indices most closely related are selected, the drought threshold level can be determined, below which the river flow is considered to be in deficit. The main goal is to determine the exact beginning and end of the hydrological drought, for which a method is used quantifiably defining whether the selected area is in deficit or not. With the sequent peak algorithm method (*SPA*) the beginning and the end, as well as the intensity and peak of hydrological drought can be determined.

ZAHVALA

Za vso pomoč, nasvete in vzpodbudo se iz vsega srca zahvaljujem mentorici doc. dr. Mojci Šraj in somentorici dr. Miri Kobold.

Hvala tudi mojima staršema, ki sta me vsa študijska leta podpirala in verjela vame. Ter seveda tudi moji partnerici, ki mi je vedno stala ob strani in skrbela za otroke, da sem se lahko v miru posvetil diplomu.

Zahvala pa gre tudi Agenciji Republike Slovenije za okolje za posredovane podatke in informacije vodomernih postaj državnega hidrološkega monitoringa.

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
2	SUŠA KOT NARAVNI POJAV.....	3
3	ZNANSTVENI VIDIKI SUŠE	7
3.1	Vzroki za nastanek suše	11
3.2	Podnebne spremembe in njihov vpliv na vodni režim.....	13
3.2.1	Scenariji podnebnih sprememb	14
3.3	Hidrološke suše in trendi.....	16
3.4	Vpliv rečnega režima na hidrološko sušo	19
3.5	Identifikacija, spremljanje in vrednotenje hidrološke suše	21
4	HIDROLOŠKA SUŠA IN KAZALCI MALIH PRETOKOV	23
4.1	Uvod	23
4.2	Terminologija	24
4.3	Percentili iz krivulje trajanja pretokov.....	26
4.4	Najmanjši letni (srednji dnevni) pretok	28
4.5	Deficit pretoka	31
4.5.1	Metoda praga	31
4.5.2	Algoritem zaporednih konic	36
5	IZRAČUN KAZALCEV MALIH PRETOKOV ZA IZBRANE VODOMERNE POSTAJE PO SLOVENIJI	39
5.1	Podatki	39
5.1.1	Razvrstitev vodotokov.....	41
5.2	Določitev percentilov iz krivulje trajanja pretokov	46

5.3	Določitev kazalcev malih pretokov s pomočjo najmanjšega letnega (srednjega dnevnega) pretoka.....	51
6	PRIMERJAVA IN ANALIZA REZULTATOV	55
6.1	Korelacija med kazalci malih pretokov	55
6.2	Vpliv izbranega niza podatkov na končne rezultate	57
6.3	Izbira praga	60
6.4	Določitev začetka in konca sušnega obdobja.....	64
7	UGOTOVITVE, SMERNICE IN PREDLOGI ZA SPROTNO SPREMLJANJE IN VREDNOTENJE HIDROLOŠKE SUŠE	66
8	ZAKLJUČKI	73
VIRI	76

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Reprezentativne vodomerne postaje z osnovnimi značilnostmi (ARSO, 2013)	40
Preglednica 2: Razvrščanje vodotokov glede na srednji pretok Q_{sr} v izbranem 30-letnem obdobju 1981–2010	42
Preglednica 3: Razvrščanje vodotokov glede na razmerje pretokov $Q_{min}:Q_{maks}$ v izbranem 30-letnem obdobju 1981–2010	43
Preglednica 4: Razvrščanje vodotokov glede na rečni režim	44
Preglednica 5: Razvrščanje vodotokov glede na specifični pretok q	45
Preglednica 6: Značilni percentili za izbrane vodomerne postaje (od Q_{95} do Q_{50})	50
Preglednica 7: Značilni kazalci malih 1, 7, 30, 60 in 90-dnevnih pretokov (MAM) za izbrane vodomerne postaje	54
Preglednica 8: Korelacijska matrika kazalcev za vodotoke s srednjim pretokom $Q_{sr} < 3 \text{ m}^3/\text{s}$	55
Preglednica 9: Korelacijska matrika kazalcev za vodotoke s srednjim pretokom $3 \text{ m}^3/\text{s} < Q_{sr} < 30 \text{ m}^3/\text{s}$	55
Preglednica 10: Korelacijska matrika kazalcev za vodotoke s srednjim pretokom $Q_{sr} > 30 \text{ m}^3/\text{s}$	56
Preglednica 11: Primerjava kazalcev malih pretokov po metodi najmanjšega srednjega dnevnega pretoka in po metodi dololočevanja percentilov iz krivulje trajanja pretokov za 17 vodomernih postaj v Sloveniji	57
Preglednica 12: Primerjava kazalcev malih pretokov izračunanih kot percentili iz krivulje trajanja pretokov za različna časovna obdobja za izbrane vodomerne postaje v Sloveniji. Z rdečo so označeni tisti rezultati vodomernih postaj, kjer je razlika med posameznimi kazalci največja.	58
Preglednica 13: Korelacijska matrika kazalcev malih pretokov za reko Savo, pri vodomerni postaji Litija za 10-letno obdobje (2001–2010)	62

- Preglednica 14: Izračunani kazalci malih pretokov iz krivulje trajanja pretokov in z metodo najmanjših letnih (srednje dnevni) pretokov za vodomerno postajo Radovljica I za 10-letno obdobje (2001–2010). 67
- Preglednica 15: Korelacijska matrika kazalcev malih pretokov za vodomerno postajo Radovljica I na reki Savi za 10-letno obdobje (2001-2010). 68

KAZALO SLIK

Slika 1: Časovno spreminjanje hidrološkega stanja reke in hidrološko tveganje glede na spremenljivost rečnega pretoka ter prag škode (povzeto po Kobold in Ulaga, 2010: str. 43)	3
Slika 2: Ocenjena škoda po vrstah naravnih nesreč v RS po posameznih letih (SURS, 2009).....	4
Slika 3: Diagram škode za obdobje 1994–2008 po vrsti naravnih nesreč (SURS, 2009).....	4
Slika 4: Prizadetost ljudi v odstotkih zaradi različnih naravnih nesreč od leta 1980 – 2012 v svetu (povzeto po EM-DAT, 2013).....	6
Slika 5: Zaporedje vplivov na nastanek suše (povzeto po NDMC, 2012)	8
Slika 6: Medsebojna povezanost suš in njihov vpliv na družbo (povzeto po Rossi, 2011: str. 8)	9
Slika 7: Shematski prikaz, kako se hipotetični padavinski primanjkljaji in presežki v hidrološkem krogu pojavljajo s časovnim zamikom in z vedno manjšim nihanjem (povzeto po Rossi, 2011: str. 9).....	10
Slika 8: Izrazite, regionalne in lokalne kmetijske suše v Sloveniji v obdobju 1963–2013, določene na osnovi povprečnega primanjkljaja vode v poletnem obdobju (Sušnik in sod., 2013: str. 2) .	11
Slika 9: Leta s podpovprečno vodnatostjo običajno pomenijo sušne razmere na zalednem območju rek (Sušnik in sod., 2013: str. 3).....	12
Slika 10: Letne količine padavin in povprečne letne temperature zraka v Ljubljani od leta 1880 do 2012 (vir podatkov ARSO).....	12
Slika 11: Povprečna sprememba površinskega odtoka (v odstotkih) iz več modelov napovedi za obdobje 2080–2099 glede na obdobje 1980–1999. Območja s pikami pomenijo, da je vsaj 80 % modelov skladnih glede predznaka spremembe (IPCC, 2008).....	15
Slika 12: Trendi najmanjših letnih srednjih dnevni pretokov (Q_{min1}), najmanjših letnih 60-dnevni pretokov (Q_{min60}) in najmanjših letnih 180-dnevni pretokov (Q_{min180}) za vodomerni postaji Litija na Savi in Nazarje na Savinji (Kobold in Ulaga, 2012: str 66)	17

Slika 13: Trend najmanjših letnih 30-dnevnih pretokov (Q_{min30}). Trend je statistično značilen s stopnjo značilnosti nad 90 % (Kobold in Ulaga 2012: str 66)	18
Slika 14: Tipi pretočnih režimov v Sloveniji med letoma 1971 in 2000 (Frantar 2010, str 60).....	19
Slika 15: Primer vodnatosti reke Vipave na hidrološki postaji Miren. Vrednosti pretokov na grafikonu predstavljajo srednji pretok v preteklih 30-ih dneh za vsak posamezen dan v letu (ARSO, 2013)	21
Slika 16: Komponente sistema za opazovanje in napovedovanje suše (povzeto po Tallaksen in van Lanen, 2004: str. 486)	22
Slika 17: Grafični prikaz določitve kazalcev malih pretokov (povzeto po Tallaksen in van Lanen, 2004, str 142)	25
Slika 18: Krivulja trajanja pretokov za reko Bolsko v Dolenji vasi za obdobje 2000–2010.....	27
Slika 19: Krivulji trajanja pretokov voda za dva različna režima slovenskih rek za obdobje od leta 2000 do 2010 (Mura: alpski snežno-dežni režim, Dragonja: sredozemski dežni režim)	28
Slika 20: Hidrogram pretoka za reko Bolsko za obdobje 2000–2010 z označenimi letnimi minimalnimi pretoki	29
Slika 21: Primerjava 7-, 30- in 90-dnevnih srednjih minimalnih pretokov za reko Bolsko v obdobju 2000–2010.....	30
Slika 22: Definicija sušnega deficita za Bolsko za obdobje marec–november 2003	32
Slika 23: Ilustracija različnih pragov: konstanten prag (a), mesečno spremenljivi prag (b), dnevno spremenljivi prag (c) (povzeto po Stahl, 2001: str 22).....	33
Slika 24: Shema za določitev različnih krivulj trajanja pretokov za definicijo praga; a) koledarske enote (mesec, leto), b) za vsak dan v letu glede na premično okno (povzeto po Stahl, 2001: str 27)	34
Slika 25: Prikaz problema medsebojne odvisnosti sušnih dogodkov in večjega števila manjših sušnih dogodkov.....	35

Slika 26: Definicija sušnih dogodkov z uporabo algoritma zaporednih konic (povzeto po Tallaksen in van Lanen, 2004: str 175)	37
Slika 27: Trajanje sušnega deficita in potrebne zaloge za Bolsko v obdobju 2000–2010	38
Slika 28: Izbrane vodomerne postaje za izračun sušnih kazalcev (podloga: Hidrološki letopis Slovenije 2008, 2011: str 166).....	41
Slika 29: Srednji pretok za izbrane vodotoke.....	43
Slika 30: Specifični pretok za izbrane vodotoke	46
Slika 31: Krivulje trajanja pretokov za 16 obravnavanih vodomernih postaj za 10-letno obdobje (2001–2010).....	47
Slika 32: Krivulje trajanja pretokov za vodotoke, ki imajo razmerje med najmanjšimi in največjimi pretoki $Q_{\min}:Q_{\max} < 1:300$	48
Slika 33: Krivulje trajanja pretokov za vodotoke, ki imajo razmerje med najmanjšimi in največjimi pretoki $1:300 < Q_{\min}:Q_{\max} < 1:1000$	49
Slika 34: Krivulji trajanja pretokov za reko, ki ima razmerje med najmanjšimi in največjimi pretoki $Q_{\min}:Q_{\max} > 1:1000$ ter reko, ki v sušnem obdobju presuši.	50
Slika 35: Hidrogram letnih minimalnih n-dnevnih pretokov za vodomerno postajo Otiški vrh na Meži (1953–2010).....	51
Slika 36: Hidrogram letnih minimalnih n-dnevnih pretokov za vodomerno postajo Polana1 na Ledavi (1962–2010).....	52
Slika 37: Hidrogram letnih minimalnih n-dnevnih pretokov za vodomerno postajo Litija na Savi (1927–2010).....	52
Slika 38: Hidrogram letnih minimalnih n-dnevnih pretokov za vodomerno postajo Podkaštel1 na Dragonji (1955–2010).....	53
Slika 39: Grafični prikaz vpliva različnih časovnih obdobj na percentil Q_{90} iz krivulje trajanja pretokov za izbrane vodomerne postaje.....	59

Slika 40: Letna krivulja pretokov, izračunana iz srednjih dnevni in minimalnih povprečij 10-letnega niza (2001–2010) za vodomerno postajo Cerkevnikov mlin.	61
Slika 41: Letna krivulja pretokov izračunana iz dnevni minimalni povprečij 10-letnega niza (2001–2010) za vodomerno postajo Cerkevnikov mlin.	62
Slika 42: Letna krivulja pretokov izračunana iz dnevni minimalni povprečij 10-letnega niza (2001–2010) za vodomerno postajo Litija s konstantnima sušnim pragoma Q_{95} in Q_{90}	63
Slika 43: Letna krivulja pretokov izračunana iz dnevni minimalni povprečij 10-letnega niza (2001–2010) za vodomerno postajo Litija, z mesečnim in sezonskim sušnim pragom.	64
Slika 44: Srednji dnevni pretok in vodne zaloge, ki bi bile potrebne, da bi bila hidrološka suša preprečena, za leto 2012 na reki Savi za vodomerno postajo Litija, za različne sušne pragove	65
Slika 45: Srednji, minimalni in maksimalni letni pretoki, za vodomerno postajo Radovljica I na reki Savi	66
Slika 46: Krivulja trajanja pretokov za vodomerno postajo Radovljica I.....	67
Slika 47: Krivulje srednjih in minimalni letni pretokov s konstantnim sušnim pragom Q_{90} za vodomerno postajo Radovljica I na reki Savi	68
Slika 48: Krivulje srednjih in minimalni letni pretokov z mesečnim sušnim pragom za vodomerno postajo Radovljica I na reki Savi	69
Slika 49: Krivulje srednjih, minimalni in maksimalni letni pretokov ter hidrogram za leto 2011 za vodomerno postajo Radovljica I.	70
Slika 50: Krivulje srednjih in minimalni letni pretokov z mesečnim sušnim pragom ter hidrogram za leto 2011 za vodomerno postajo Radovljica I.....	70
Slika 51: Krivulje srednjih in minimalni letni pretokov s potrebnimi vodnimi zalogami ter hidrogram za leto 2012 za vodomerno postajo Radovljica I.....	71

1 UVOD

Suša je pojav, ko se zaradi pomanjkanja ali nezadostne količine padavin v daljšem obdobju pojavi znatno hidrološko neravnovesje, posledica katerega so pomanjkanje vode, manjši pridelek, bistveno manjši pretoki vodotokov, zelo znižana gladina podzemne vode in majhna talna vlaga. Znanost deli sušo na meteorološko, kmetijsko in hidrološko sušo. Vendar na sušo ne moremo gledati samo kot na naravni pojav ali dogodek, saj ima pomanjkanje vode vpliv na celotno družbo. Pogoste suše v zadnjih letih tako v razvitih državah kot v državah v razvoju kažejo ranljivost vseh družb pred tem naravnim pojavom. V nalogi obravnavamo samo hidrološko sušo.

Hidrološka suša nastopi, ko vodne zaloge v vodonosnikih, jezerih in rezervoarjih padejo pod neko določeno statistično povprečje. Do hidrološke suše lahko pride tudi v času povprečnih ali celo nadpovprečnih padavin, če je človeška potreba po vodi velika in takšna povečana raba povzroči zmanjšanje vodnih zalog.

Osnovni pojem za opisovanje hidrološke suše je »mali pretok«, ki v hidrološkem smislu pomeni pretok vode v vodotoku v daljšem obdobju s pomanjkanjem padavin. Vendar pa definicije malih pretokov ne gre enačiti z definicijo suše. Mali pretok je sezonski pojav in je sestavni del vsakega rečnega režima. Suša pa je ekstremni naravni dogodek, ki je posledica pomanjkanja padavin v primerjavi z normalno količino padavin v daljšem časovnem obdobju (Smakhtin, 2001).

Ob pojavu hidrološke suše je potrebno sušo ovrednotiti. Pri obravnavi malih pretokov se poslužujemo različnih metod in kazalcev, kot so določanje percentilov iz krivulje trajanja pretokov, določanje najmanjšega letnega pretoka, značilnosti deficita pretoka, metoda praga ipd. Slednje bomo v tej diplomski nalogi podrobneje raziskali, primerjali in določili tiste kazalce malih pretokov, ki so za naše okolje najbolj reprezentativni. Podatek o malem pretoku po navadi temelji na ocenah statistik, ki jih dobimo iz vseh razpoložljivih podatkov za celotno obravnavano obdobje (WMO, 2008).

Diplomska naloga je bila zastavljena s strani Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO), kjer med drugim izvajajo hidrološki monitoring, v okviru katerega tudi redno spremljajo hidrološke razmere in v primeru suše tudi sproti beležijo sušne pretoke. Opis sušnih razmer podajajo v glavnem z značilnimi obdobjnimi pretoki in s percentili. V teoriji je postopkov za vrednotenje hidrološke suše več. Želja je bila, da se pripravi pregled metod in se na primerih merilnih mest po državi metode preizkusi in ugotovi, katere metode oziroma kazalci so primerni za opis in vrednotenje sušnih razmer v

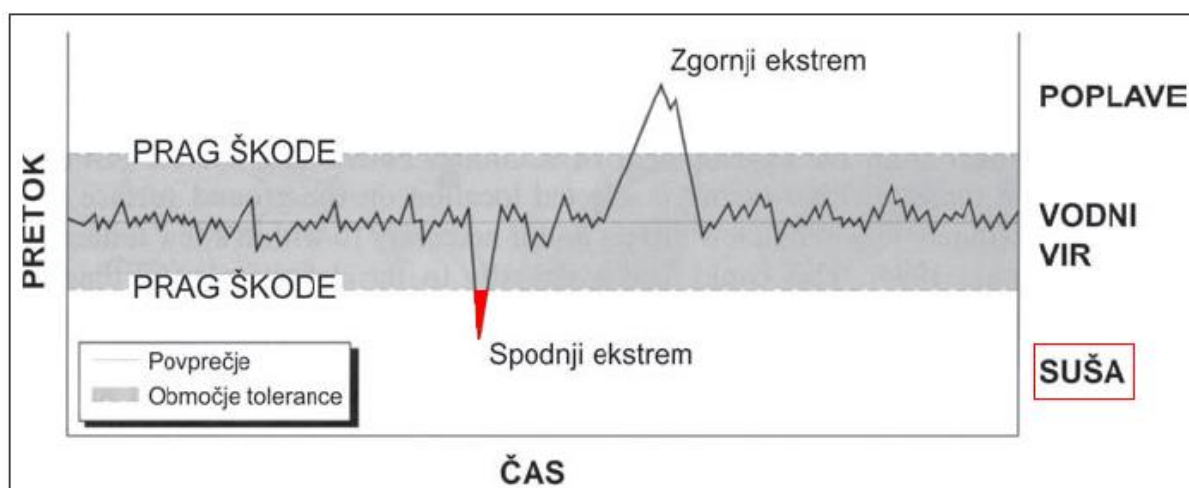
Sloveniji. Postopek za vrednotenje in določanje praga, pod katerim se pretok smatra za sušni, v Sloveniji še ni bil podan. Naša naloga je, da na reprezentativnih slovenskih vodotokih izberemo ustrezne nize podatkov ter jih uporabimo za določitev potrebnih sušnih kazalcev in prikažemo metodo za določevanje hidrološke suše.

Želja ARSO je tudi bila, da se poda ustrezen postopek za sprotno vrednotenje hidroloških suš, ki bo v vsakem trenutku nedvoumno pokazal, ali je pretok v izbranem vodotoku že postal sušni. Tako bi lahko dobili ustrezno orodje za določevanje sušnih pretokov, podobno kot že ima ARSO razvito orodje za hidrološki alarm za visoke vode. Iz primerov zadnjih let vidimo, da so problemi suše tako pri nas kot po svetu vedno bolj aktualni.

Glavni cilj diplomskega dela je podati pregled različnih metod za vrednotenje značilnosti hidroloških suš, ki so posledica dolgotrajnih malih pretokov.

2 SUŠA KOT NARAVNI POJAV

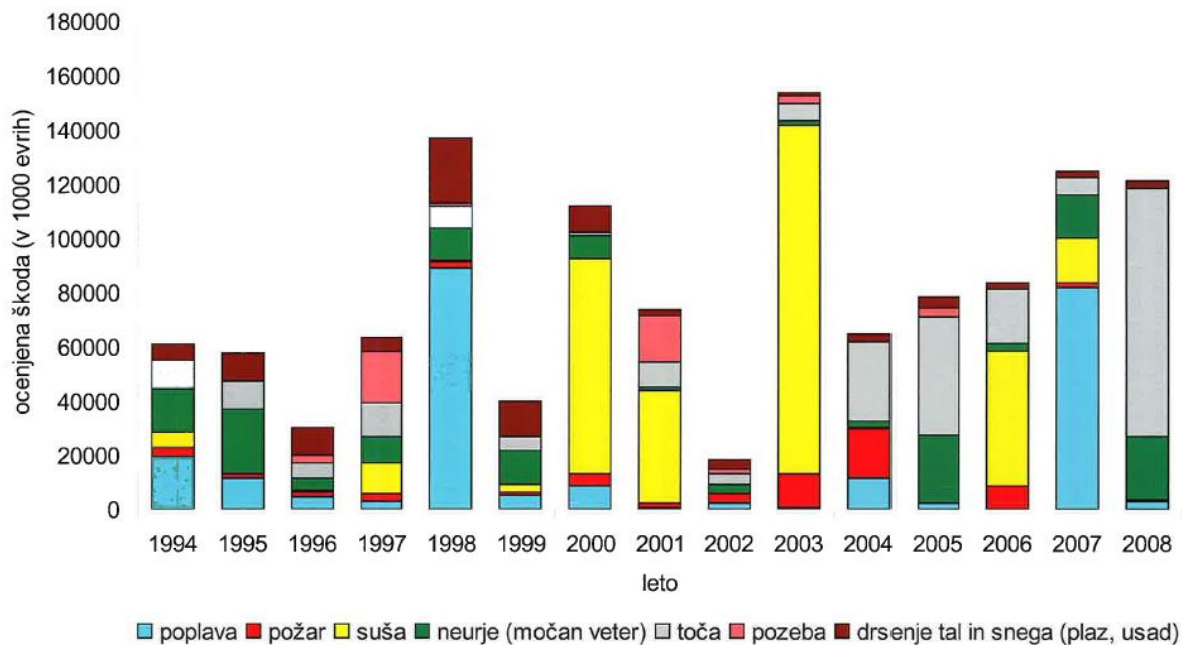
Hidrološko stanje voda je v največji meri posledica vremenskega dogajanja, vendar lahko tudi človek s svojim poseganjem v vodni režim bistveno prispeva k slabšanju tega stanja, kar se odraža zlasti pri poplavih in suši. Dokler je pretok reke blizu srednji ali pričakovani vrednosti, ne predstavlja potencialne nevarnosti, temveč vodni vir za različne namene in rabo vode. Lahko pa doseže vrednost, ki za okolico in človekovo dejavnost predstavlja nevarnost. Daljše nizkovodno stanje z malimi pretoki odraža sušo, zelo veliki pretoki pa poplavno nevarnost (slika 1). Intenziteta in časovno trajanje dogodka povečujeta ogroženost ljudi in okolice. V svetu v zadnjih letih dramatično narašča število z vremenom povezanih ekstremnih dogodkov, kot so neurja, poplave in suše, s tem pa narašča tudi škoda, ki jo te ujme povzročajo (Kobold in Ulaga, 2010).



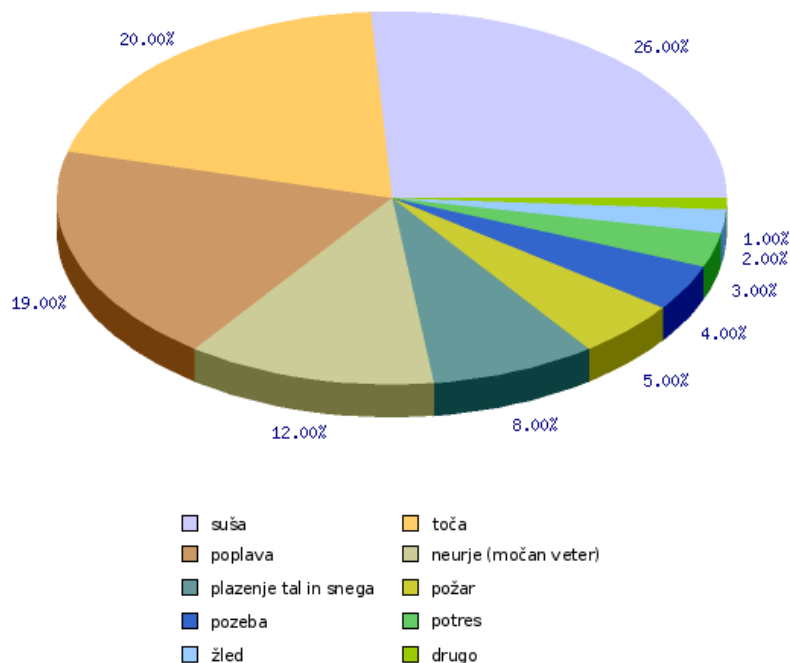
Slika 1: Časovno spreminjanje hidrološkega stanja reke in hidrološko tveganje glede na spremenljivost rečnega pretoka ter prag škode (povzeto po Kobold in Ulaga, 2010: str. 43)

Slovenija se sicer uvršča med države, ki so z vidika vodnatosti sorazmerno bogate. K temu pripomore velika količina padavin, saj v državi v povprečju pade okoli 1500 mm padavin na leto. Tudi v Prekmurju, kjer je v običajnih letih manj padavin kakor 800 mm, pade v povprečju 200 mm več dežja kakor na severu Evrope, na primer v Berlinu (Šebenik, 2012). Vendar pa je kljub visokim skupnim količinam dežja za različne dejavnosti (kakovostna kmetijska pridelava, oskrba s pitno vodo, proizvodnja električne energije) časovna razporeditev padavin pogosto neugodna. Zato je bilo zlasti v preteklosti slišati, da suša glede na slovensko vodno bogastvo pri nas ne bi smela predstavljati velikega problema (Šebenik, 2012). Kljub temu je bila v preteklih letih škoda zaradi suše velika in je po podatkih SURS (2009) v obdobju 1994–2008 dosegla največji odstotek, 26 % ocenjene škode po posameznih vrstah nesreče glede na letni bruto domači proizvod (BDP) Slovenije (slika 3).

Računsko sodišče je leta 2009 s pomočjo podatkov Statističnega urada Republike Slovenije pripravilo oceno škode (slika 2), ki so jih povzročile različne naravne nesreče.



Slika 2: Ocenjena škoda po vrstah naravnih nesreč v RS po posameznih letih (SURS, 2009)



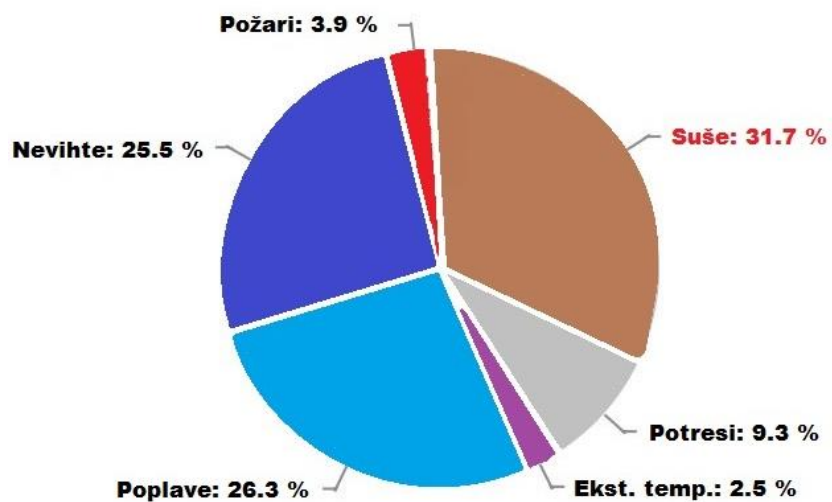
Slika 3: Diagram škode za obdobje 1994–2008 po vrsti naravnih nesreč (SURS, 2009)

Sušo je v splošnem težko definirati, saj je vsak sušni dogodek svojevrsten dogodek, predvsem zaradi različnih podnebnih značilnosti posameznih regij in prostorske razprostranjenosti suše v povezavi z njenimi vplivi in posledicami. Suša je normalna, ponavljajoča se značilnost klime. Je pojav regionalnega značaja. Do nje prihaja praktično v vseh klimatskih conah, čeprav se njene značilnosti razlikujejo od regije do regije. Izvor je v pomanjkanju padavin skozi daljše časovno obdobje, običajno eno sezono, lahko pa tudi več. Pomanjkljaj padavin vodi v pomanjkanje vode za rastlinstvo, oskrbo in za določene aktivnosti v okolju. Povezana je tudi s časom nastopa (nastop suše v glavni letni sezoni, ko je primanjkljaj padavin glede na rastno stanje pridelka) ter številom padavinskih dogodkov in njihovo intenziteto. Z njo so povezani tudi drugi klimatski dejavniki kot je visoka temperatura zraka, močan veter in nizka relativna vlažnost (Šebenik, 2012).

Na sušo ne moremo gledati samo kot na fizikalni pojav ali naravni dogodek. Njen vpliv na družbo se odraža v medsebojnem odnosu med sušo kot naravnim dogodkom (manj padavin od pričakovanih, kar izvira iz naravne klimatske variabilnosti) in zahteve ljudi po oskrbi z vodo. Nedavne suše tako v razvitih deželah kot deželah v razvoju in ekonomski ter okoljski vplivi in osebne stiske ljudi poudarjajo ranljivost vseh družb do tega naravnega pojava.

Kritične sušne razmere nastanejo tedaj, ko nastopi veliko pomanjkanje vode v daljšem obdobju in na večjih območjih. Zato sta izraza suša in nizki pretoki tesno povezana, nista pa ekvivalentna (Dakova, 1997). Nizki pretoki lahko nastopijo v različnih obdobjih leta z različnimi trajanji. Suša je bolj splošen izraz, saj ima različne pojavne oblike (meteorološka, kmetijska, hidrološka,...). Povezana je z vodnimi viri in zalogami vode in v tem smislu predstavlja značilnost daljšega obdobja (lahko tudi več let). Suše vsebujejo dogodke nizkih pretokov, toda en sam dogodek nizkega pretoka nujno ne predstavlja suše (Šebenik, 2012).

Tudi v Evropi in svetu je suša ekstremen naravni pojav, ki prizadene največ ljudi od vseh naravnih nesreč (slika 4) (EM-DAT, 2013). Vzrok tako velikega odstotka prizadetosti ljudi zaradi suše so predvsem sušna obdobja na Kitajskem in v Indiji, ki je še posebej leta 2002 prizadelo daleč največ ljudi (659 milijonov) izmed vseh naravnih nesreč. Zato se po svetu že veliko ukvarjajo s to problematiko in pospešeno iščejo rešitve, ki bi do neke mere preprečile ali vsaj omilile posledice, ki nastanejo zaradi dolgotrajnega sušnega obdobja. Podobno se tudi v Sloveniji že izvajajo določene analize, kot je program »Ocena vodnih perspektiv na območju Slovenije in možnosti rabe vode v kmetijski pridelavi« (Pintar, 2010).



Slika 4: Prizadetost ljudi v odstotkih zaradi različnih naravnih nesreč od leta 1980 – 2012 v svetu
(povzeto po EM-DAT, 2013)

3 ZNANSTVENI VIDIKI SUŠE

S stališča znanstvenih disciplin lahko sušo razdelimo na več različnih skupin.

V osemdesetih letih prejšnjega stoletja (1985) sta ameriška raziskovalca Wilhite in Glantz pregledala čez 150 do takrat objavljenih definicij suše. Ugotovila sta, da se definicije razlikujejo glede na območje nastopa suše in njenih vplivov ter posledic na posamezne sektorje. Definicije sta razvrstila v štiri glavne skupine (Wilhite in Glantz, 1985):

- meteorološka,
- kmetijska,
- hidrološka in
- socialno-ekonomska.

Prve tri skupine obravnavajo sušo kot fizikalni pojav, zadnja pa sledi učinkom primanjkljaja vode na družbo in gospodarstvo.

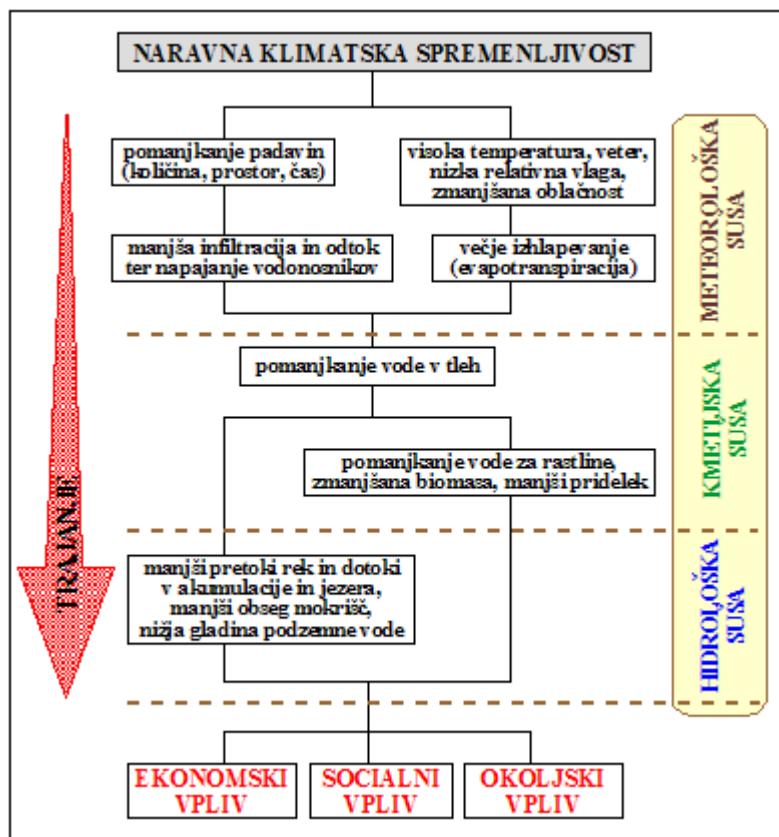
Tudi Tate in Gustard (2000) sta naredila »disciplinarno« klasifikacijo suše z vidika hidrologije. Sušo sta razvrstila prav tako v štiri kategorije:

- klimatološka,
- agro-meteorološka,
- suša zaradi deficita pretoka v vodotokih ter
- suša podzemnih voda.

Hidrološki pristop je usmerjen k vplivu primanjkljaja vode v posameznih komponentah hidrološkega kroga (padavine, vlažnost tal, površinski odtok, podtalnica) ali k vplivu primanjkljaja na raven storitev oskrbe z vodo, namakanjem in energetske potreb.

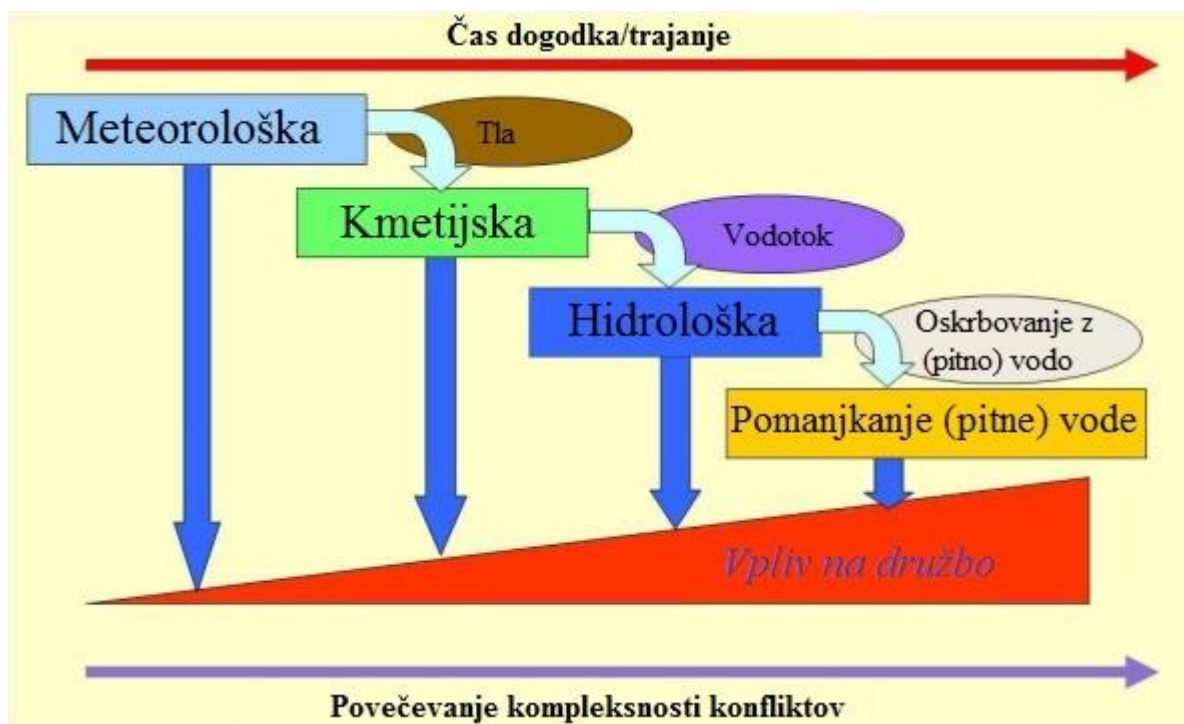
Vse vrste definicij izvirajo iz pomanjkanja padavin, kar povzroča vodni primanjkljaj za določeno aktivnost (npr. rast rastlin) in/ali določeno skupino ljudi (npr. kmetje). Kljub temu, da je delitev suše v različne skupine koristna in praktično uporabna, je pogosto meja delitve v posamezne skupine povsem nejasna in težko določljiva (Šebenik, 2012).

Najbolj natančno in nazorno pa sušo opredeli in razdeli NDMC (National Drought Mitigation Center), ki govori o meteorološki, kmetijski in hidrološki suši (slika 5).



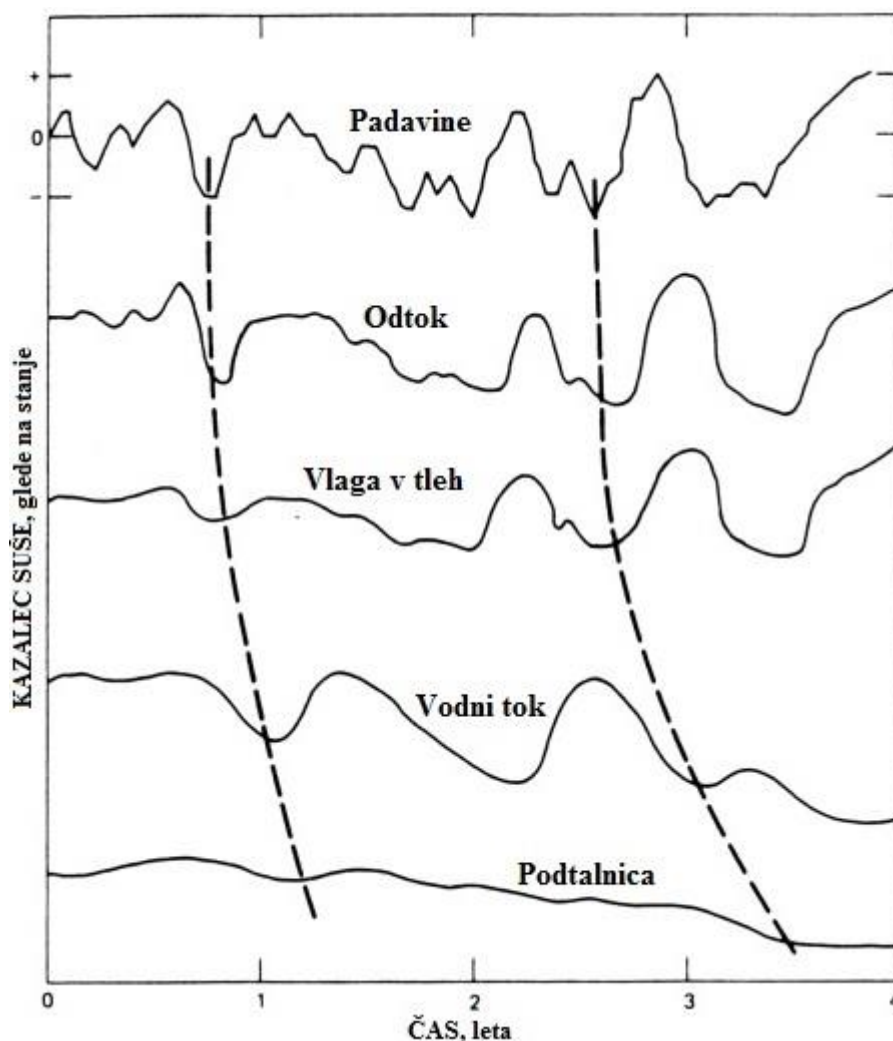
Slika 5: Zaporedje vplivov na nastanek suše (povzeto po NDMC, 2012)

Za meteorološko sušo je značilen primanjkljaj padavin. Gre za večje odstopanje količine padavin od dolgoletnega povprečja, povezano z nadpovprečno visokimi temperaturami zraka, vetrom in nizko relativno vlago. Vse to ima za posledico večje izhlapevanje, manjšo infiltracijo, odtok in napajanje vodonosnikov. Kmetijska suša je kombinacija meteorološke in hidrološke suše, posledica pa je manjši pridelek in s tem donos. Hidrološka suša je povezana z vodnimi viri in zalogami vode v tleh. Z izrazom hidrološka suša zaznamujemo dolgotrajen proces obdobjnega pomanjkanja padavin (vključno s snegom) za napajanje površinskih in podzemnih voda. Odraža se v manjših pretokih rek in dotokih v akumulacije in jezera ter v nižjih gladinah podzemnih vod. Hidrološka suša ne nastopa skupaj z meteorološko in kmetijsko sušo, ampak za njima zaostaja. Potrebna je več časa, da se primanjkljaj padavin pokaže v komponentah hidrološkega sistema (pretok vode, vlaga v tleh, gladina podzemne vode) Zaporednost poteka suše in vpliv na družbo sta nazorno prikazani na sliki 6.



Slika 6: Medsebojna povezanost suš in njihov vpliv na družbo (povzeto po Rossi, 2011: str. 8)

Ko se začne suša, je kmetijstvo prvo, ki je prizadeto zaradi pomanjkanja vode v tleh, saj to pomeni pomanjkanje vode za rastline. Če se pomanjkanje padavin nadaljuje, so prizadeti še drugi viri (površinski vodotoki, jezera, gladina podzemnih vod). Pomanjkanje vode vpliva tudi na druga področja, zlasti na oskrbo z vodo. Ko ljudje občutijo pomanjkanje vode kot dobrine, govorimo o ekonomskih, socialnih in okoljskih vplivih. Socialno-ekonomski vpliv se pokaže takrat, ko je potreba po ekonomskih dobrinah zaradi posledic meteorološke, kmetijske in hidrološke suše večja od oskrbe s temi dobrinami (NDMC, 2012).

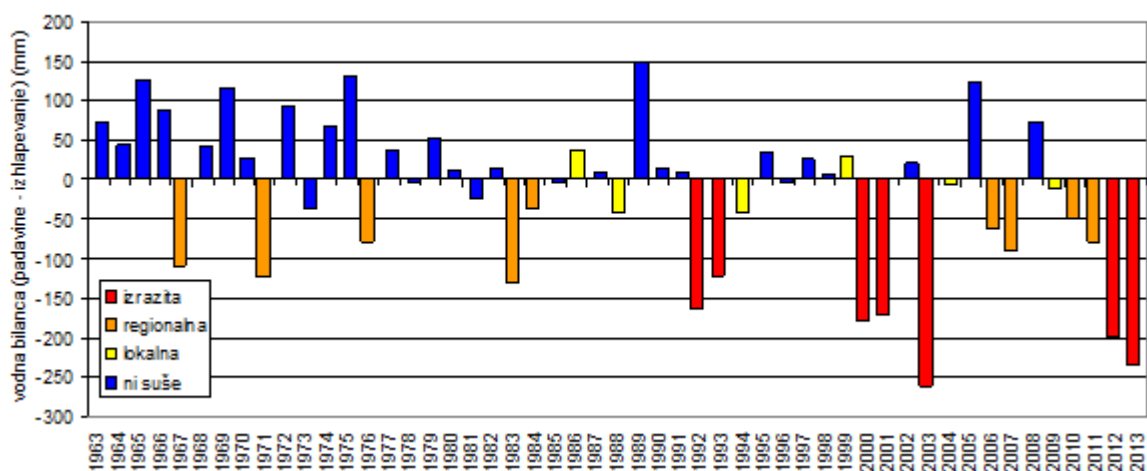


Slika 7: Shematski prikaz, kako se hipotetični padavinski primanjkljaji in presežki v hidrološkem krogu pojavljajo s časovnim zamikom in z vedno manjšim nihanjem (povzeto po Rossi, 2011: str. 9)

Ko se pojavijo padavine in so odpravljeni meteorološki pogoji suše, se vodne zaloge obnovijo. Najprej se obnovijo zaloge vode v tleh, sledijo vodotoki, akumulacije in jezera, nazadnje pa se obnovijo zaloge podzemnih voda. Obnovitev zalog podzemnih voda je lahko dolgotrajen proces, odvisen od trajanja in količine padavin. Tudi vplivi suše v kmetijstvu se hitro zmanjšajo, predvsem zaradi vode v tleh, čeprav se povzročene škode ne da odpraviti.

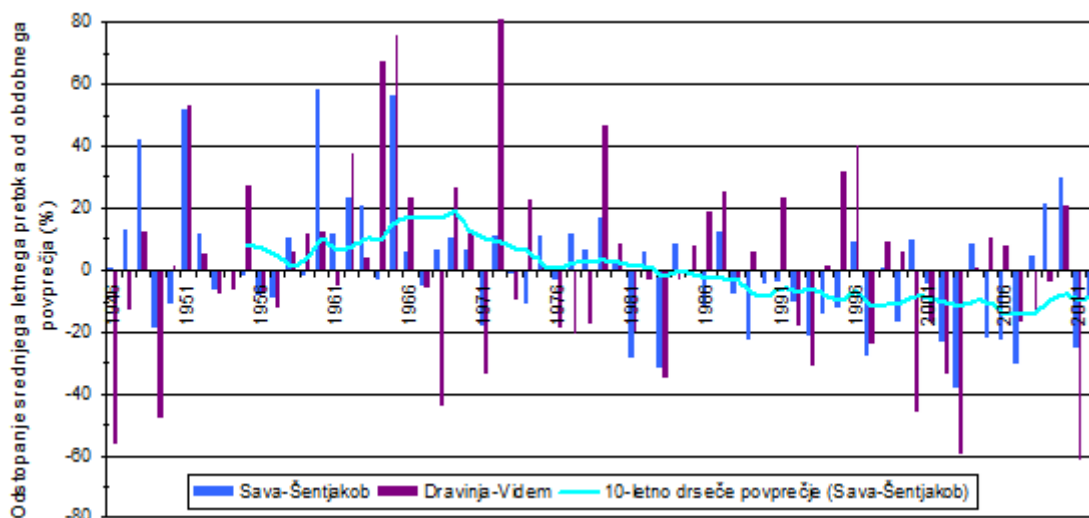
3.1 Vzroki za nastanek suše

Kot je prikazano v prejšnjem poglavju, gre vzroke za nastanek suše iskati v primanjkljaju padavin. Tudi v Sloveniji suša vse bolj postaja del ekstremnih vremenskih dogodkov. Vse pogostejše nastopijo sušna obdobja, katerim se običajno pridružijo še visoke temperature zraka. Suše so v letih 2000, 2001, 2003, 2006, 2007, 2012 in 2013 dosegle razsežnosti naravne nesreče (Sušnik in sod., 2013).



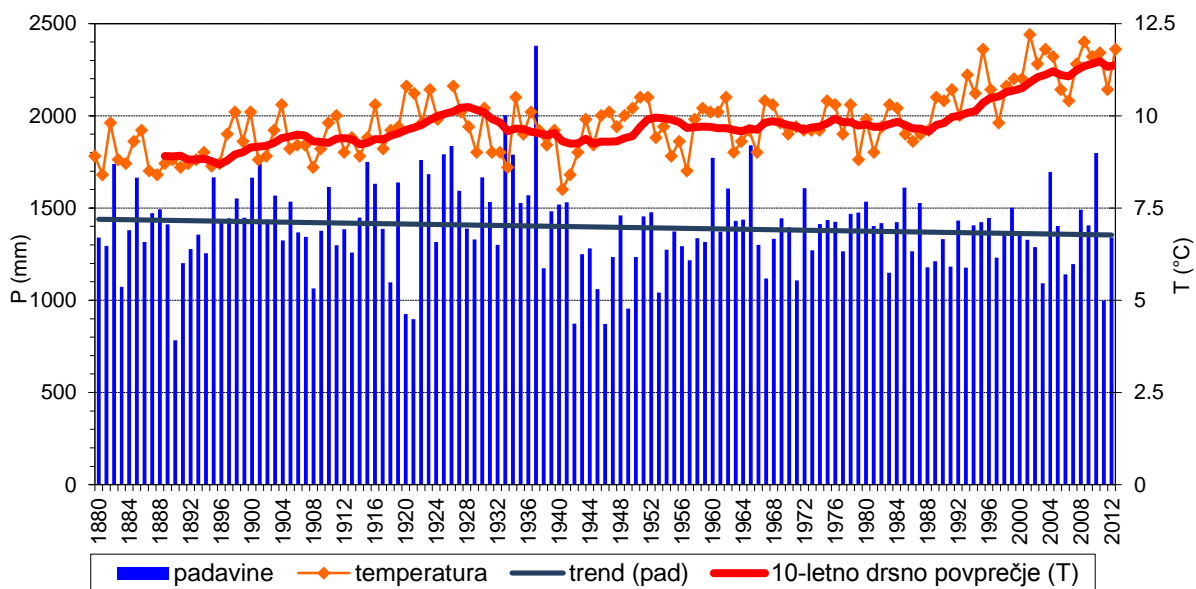
Slika 8: Izrazite, regionalne in lokalne kmetijske suše v Sloveniji v obdobju 1963–2013, določene na osnovi povprečnega primanjkljaja vode v poletnem obdobju (Sušnik in sod., 2013: str. 2)

Podobna je slika na vodotokih. Nprekinjeno obdobje z večinoma podpovprečno letno vodnatostjo slovenskih rek traja vse od leta 1980 (slika 8; Sušnik in sod., 2013). Je pa hidrološka suša regionalni pojav in nikoli ne zajame enakomerno cele Slovenije. Med hidrološko najbolj suha leta glede na razpoložljiva obdobja podatkov sodijo leta 1946, 1947, 1949, nato pa leto 1993 in obdobje 2000–2003, med katerimi je bilo najbolj sušno leto 2003, 2012 ter 2013. Upad pretokov je predvsem posledica primanjkljaja količine padavin (slika 9) in porasta povprečne letne temperature zraka ter z njo povezanega večjega izhlapevanja vode.



Slika 9: Leta s podpovprečno vodnatostjo običajno pomenijo sušne razmere na zalednem območju rek (Sušnik in sod., 2013: str. 3)

Na sliki 10 so grafično prikazani podatki o letni količini padavin in povprečni letni temperaturi zraka v Ljubljani za obdobje meritev od leta 1880 do 2012. Iz diagrama je razvidno, da majhna količina padavin v zadnjih letih ni ekstremen pojav, čeprav napoveduje upadanje, je pa porast temperatur po letu 1980 znaten in v obdobju zadnjih tridesetih let presega dolgoletno povprečje za okrog 3 °C.



Slika 10: Letne količine padavin in povprečne letne temperature zraka v Ljubljani od leta 1880 do 2012 (vir podatkov ARSO)

3.2 Podnebne spremembe in njihov vpliv na vodni režim

Podnebje je že od nekdaj odločilno vplivalo na bivanje ljudi in njihov življenjski slog; skozi vso zgodovino človeštva se je odražalo v načinu gradnje, poljedelstvu, izboru domačih živali, gostoti poseljenosti, razpoložljivosti vodnih virov, običajih ljudi, prehranjevalnih navadah in zdravju. V dvajsetem stoletju je tehnološki razvoj zagotovil obilico energije, omogočil lahek dostop do fosilnih goriv, prinesel drugačen način gradnje, povečal mobilnost, nabor gojenih rastlin in omogočil boljše ter obilnejše pridelke. Ob hitrem tehnološkem razvoju se je zdelo, da smo si podredili naravo (Cegnar, 2010).

Še bolj kot spremembe povprečnih vrednosti spremenljivk, ki opisujejo vreme, nas skrbijo spremembe v pogostosti in jakosti ekstremnih dogodkov. Število vročih dni v zadnjih desetletjih narašča, prav tako pa ne beležimo izjemno nizkih temperatur. Nekatera območja že kažejo razlike v pogostosti nalivov (Cegnar, 2010).

Suša je v Sloveniji znan in dobro opisan pojav. V preteklih stoletjih in desetletjih so občasno nastopila leta, ko je v občutljivih fazah rasti kmetijskih pridelkov zaradi pomanjkanja padavin ter povečanih izgub zaradi izhlapevanja iz tal in rastlin prišlo do zmanjšanja pridelka, včasih pa pridelka sploh ni bilo. Vendar v preteklosti ni bilo potrebe po obsežnejšem namakanju kmetijskih površin. Zaradi boljšega kolobarjenja in večje raznolikosti poljščin, med katerimi so nekatere bolj občutljive na sušo kot druge, so izpad enega deleža poljščin lažje prenesli. V zdajšnjem intenzivnem pridelovanju in želji po čim boljšem pridelku pa se je tudi potreba po namakanju zelo povečala (Glavan in Pintar, 2012).

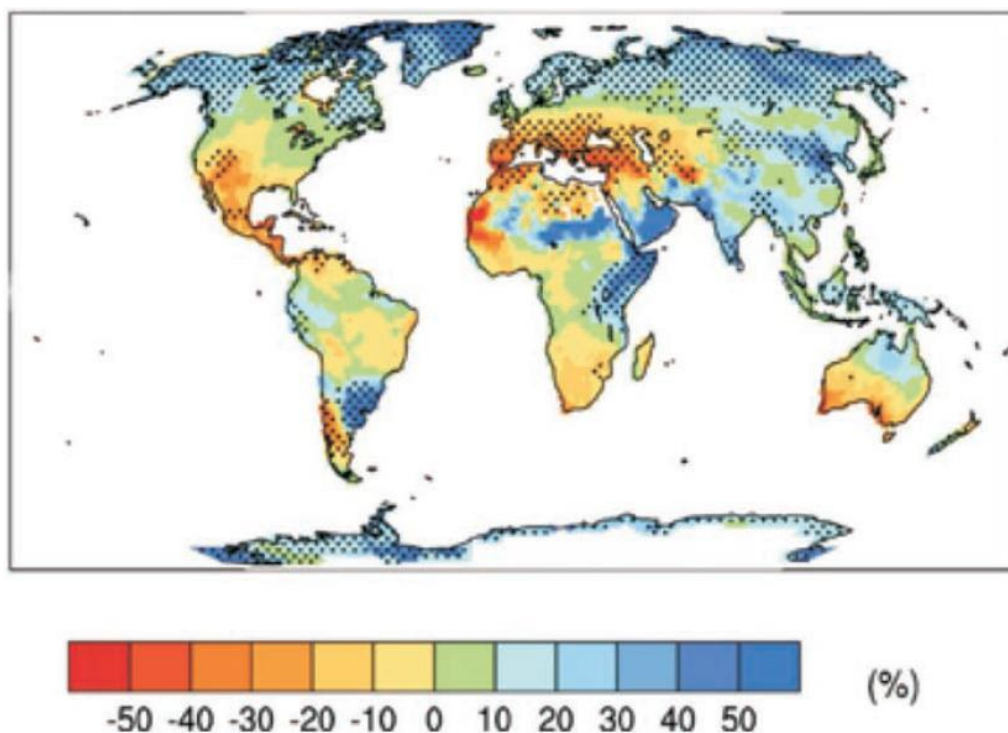
Čeprav pojav suše ni novost, se je v zadnjih dveh desetletjih pogostost sušnih let povečala. Po letu 2000 so bile v Sloveniji pogoste in hude suše. Preseneča predvsem to, da se pojavi suša tudi v zaporednih letih. Spomin na vroča in sušna zgodnja poletja 2006 in 2007 je še vedno živ (Cegnar, 2010; Kobold, 2010).

Prav tako se je suša pojavila v zaporedju v letu 2012, kakor tudi v lanskem letu, 2013. Posledično se pojavljajo vedno pogostejša vprašanja, kako zagotoviti dovolj velike količine vode tudi v teh sušnih obdobjih. V ta namen je po naročilu Ministrstva za kmetijstvo in okolje leta 2010 že bilo izdelano poročilo o oceni vodnih perspektiv na območju Slovenije in možnosti rabe vode v kmetijski pridelavi (Pintar, 2010). To poročilo se navezuje tudi za odvzem vode iz vodotokov v sušnih obdobjih. Problem se postavlja predvsem v določitvi kriterija oz. praga, pri katerem pretok smatramo za sušni.

3.2.1 Scenariji podnebnih sprememb

Posledice podnebnih sprememb se odražajo v vse pogostejših naravnih katastrofah, povezanih s preobilico ali premalo vode. V Sloveniji se v zadnjih letih spopadamo na eni strani s hidrološko sušo, na drugi s poplavami, medtem ko je običajno letna količina padavin blizu obdobjnega povprečja. (Kobold in Ulaga, 2010).

Medvladni odbor za podnebne spremembe (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) je v juniju 2008 izdal tehnično poročilo Podnebne spremembe in voda (IPCC, 2008), v katerem podaja spoznanja o opazovanih in predvidenih spremembah podnebja v povezavi z vodo in vodnimi viri v različnih sektorjih in regijah, ranljivosti vodnih virov, ukrepih za blažitev podnebnih sprememb ter posledicah za gospodarstvo in trajnostni razvoj. V poročilu ugotavljajo, da zapisi opazovanj in podnebne napovedi kažejo, da so sladkovodni viri ranljivi in pod močnim vplivom podnebnih sprememb, kar ima lahko dramatične posledice za človeško družbo in ekosisteme. Povprečni letni odtok in razpoložljive količine vode naj bi se zaradi svetovnega segrevanja ozračja in spremembe padavinskega režima do sredine 21. stoletja spremenile. Zelo verjetno je, da se bodo vodne količine dvignile v območjih severnih zemljepisnih širin in v nekaterih vlažnih tropskih območjih ter se zmanjšale v suhih območjih srednjih zemljepisnih širin in suhih tropskih območjih (slika 11). Še posebej neugodne napovedi o pomanjkanju vode so za območje Sredozemlja, zahod ZDA in severovzhodno Brazilijo. Ker napovedi predvidevajo, da bo večina padavin padla v obliki intenzivnih padavinskih dogodkov, se bo povečalo tveganje poplav in suš po celem svetu (IPCC, 2008).



Slika 11: Povprečna sprememba površinskega odtoka (v odstotkih) iz več modelov napovedi za obdobje 2080–2099 glede na obdobje 1980–1999. Območja s pikami pomenijo, da je vsaj 80 % modelov skladnih glede predznaka spremembe (IPCC, 2008)

Poročilo navaja, da ima severna Evropa že značilno več padavin, Sredozemlje pa postaja bolj sušno, saj so za vzhodni del trendi letne količine padavin za obdobje 1950–2000 negativni. Opazen je dvig intenzitete padavin v večjem delu Evrope, celo na območjih, ki postajajo bolj suha, podobni trendi pa naj bi se nadaljevali tudi v prihodnje. Občutljivost Evrope na podnebne spremembe narašča od severa proti jugu, torej naj bi bila južna Evropa, kamor sodi tudi Slovenija, precej bolj prizadeta.

Podnebne napovedi za Evropo kažejo, da naj bi se povprečne letne padavine povečale v severni Evropi in upadale proti južnemu delu. Že vroče in precej suho podnebje južne Evrope naj bi postalo še toplejše in še bolj suho. V osrednji in vzhodni Evropi naj bi bilo poleti manj padavin, kar bo povzročalo večje pritiske na vodne vire. Posledično naj bi se spremenili časovni in geografski poplavni vzorci, upadli srednji mali pretoki, prav tako lahko pričakujemo tudi težave s preskrbo s pitno vodo zaradi nižanja gladin podzemne vode.

Po scenarijih, ki jih navaja IPCC (2008), naj bi upadanje količine padavin poleti imelo za posledico več suš z negativnimi učinki na dostopnost vodnih virov, saj je upad pretokov v poletnih mesecih predviden celo do 80 %. Pričakujemo lahko daljša sušna obdobja ter krajša in krajevno razporejena

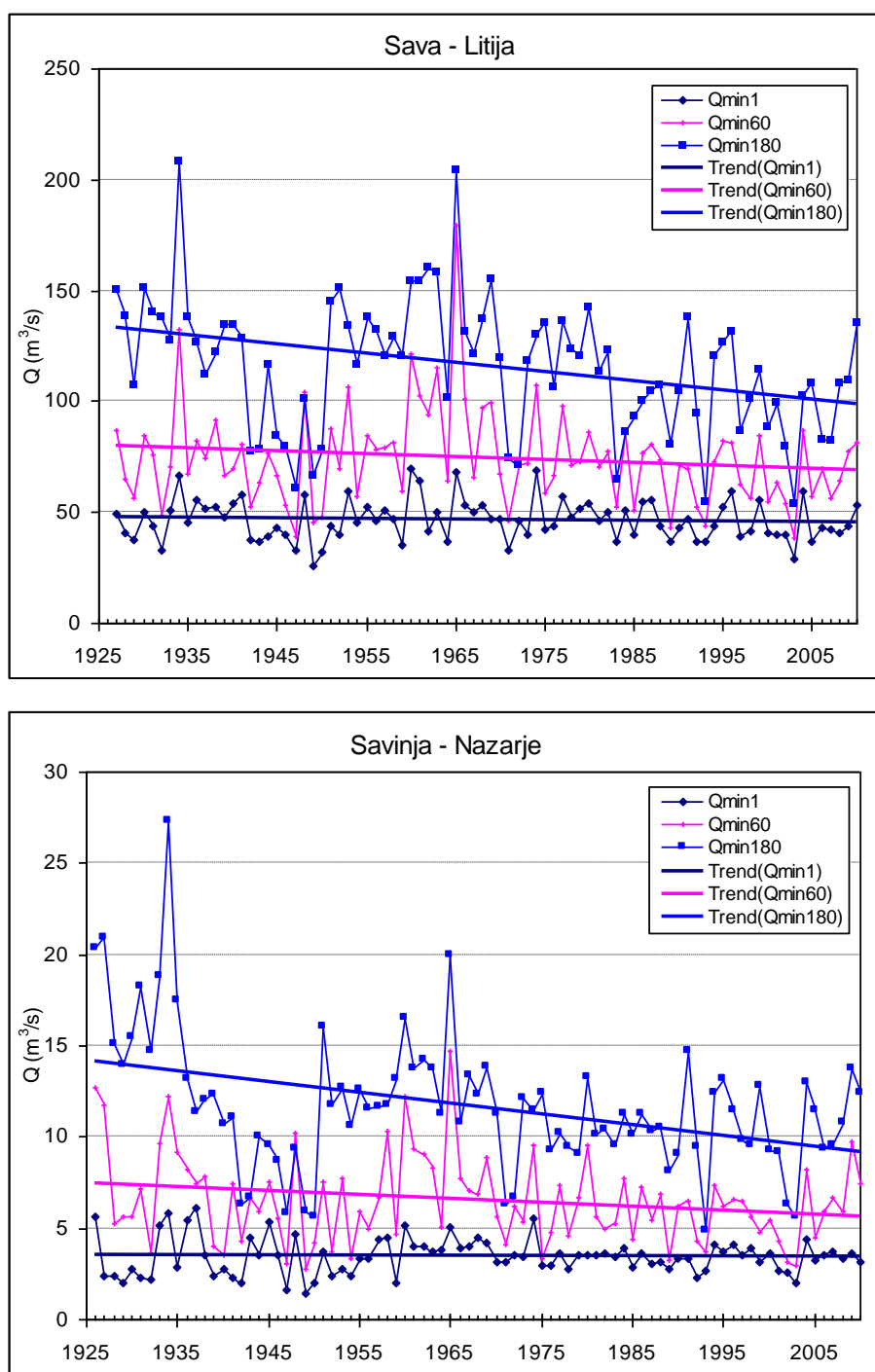
obdobja intenzivnih padavin. Sušno tveganje naj bi bilo najmanjše na severu, naraščalo pa bo v zahodni in južni Evropi, kjer lahko v nekaterih delih pričakujemo stoletno sušo na vsakih 10 let. V to območje sodi tudi Slovenija.

Z ekstremnimi hidrometeorološkimi pojavi se v Sloveniji srečujemo skoraj vsako leto. Slovenija v Evropi sodi med območja z največjim številom neviht (Cegnar, 2003). Raznolikost Slovenije se odraža v različnih padavinskih režimih in različnih intenzitetah padavin. Časovne spremembe letne količine padavin na večini območij Slovenije niso statistično značilne. Pri padavinskem režimu opazamo upadanje količine padavin v prvi polovici leta in naraščanje v drugi polovici. Čeprav je padavin v povprečju dovolj, pa te niso porazdeljene enakomerno. Večkrat nas prizadenejo obilna večdnevna deževja, kratkotrajni močni nalivi in suše. Ekstremni dogodki so tudi časovno in prostorsko omejeni in običajno ne zajamejo cele Slovenije hkrati (Kobold in Ulaga, 2010).

3.3 Hidrološke suše in trendi

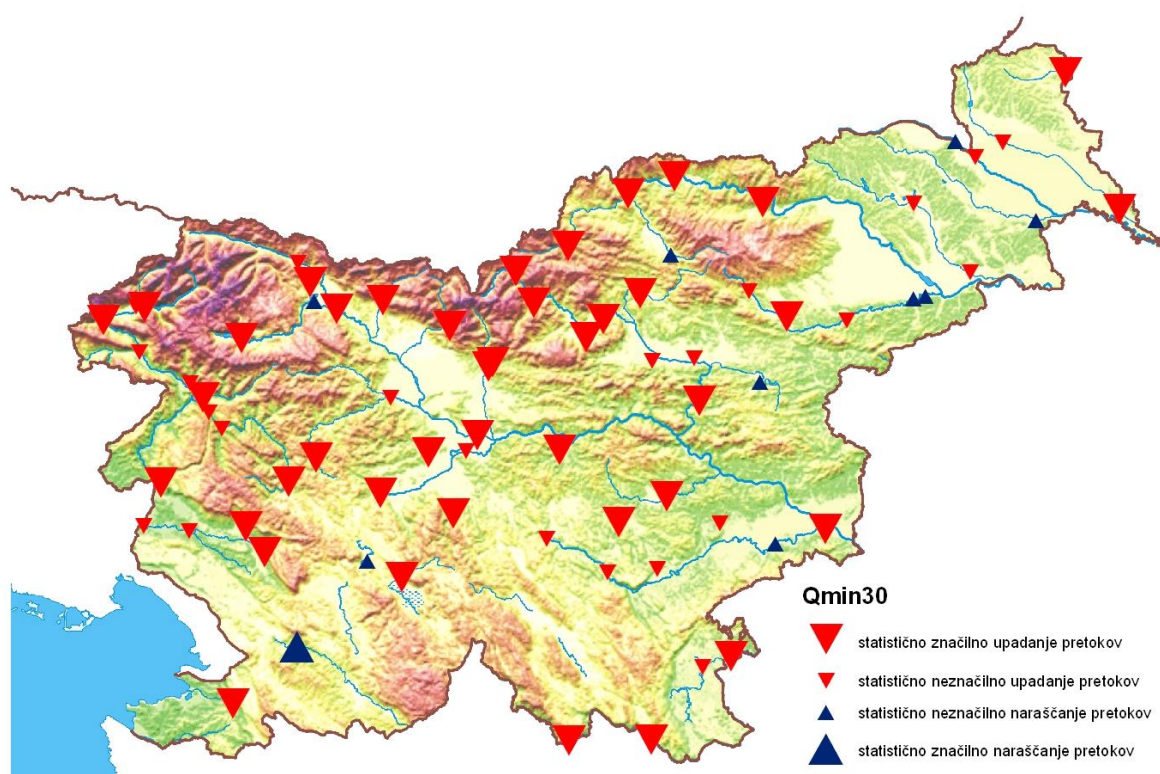
Poleg soočanja s hudourniškimi poplavami so za obdobje od leta 2000 naprej za slovenske vodotoke značilna dolga nizkovodna stanja, ki so posledica pomanjkanja padavin. Še zlasti to velja za leto 2003, ko so bili pretoki od februarja do septembra pod srednjimi malimi vrednostmi (Kobold in Ulaga, 2010). Dolgo sušno obdobje smo beležili tudi v drugi polovici leta 2006, ki se je nadaljevalo v prvi polovici leta 2007. Čeprav letna količina padavin v Sloveniji značilno še ne upada, pa beležimo vse pogostejše suše.

Značilnost največjih hidroloških suš so dolga neprekinjena obdobja z malimi pretoki, ki so ponekod trajala kar tretjino leta. Zlasti se to kaže za obdobje po letu 1970, za katerega so značilni dokaj pogosti mali pretoki. Čeprav za najmanjše letne srednje dnevne pretoke (Q_{min1}) ni značilen upadajoči trend, pa je za najmanjše letne pretoke daljših trajanj (nad 30 dni) ta trend zelo izrazit (sliki 12 in 13) (Kobold in Ulaga, 2012).



Slika 12: Trendi najmanjših letnih srednjih dnevni pretokov (Q_{min1}), najmanjših letnih 60-dnevni pretokov (Q_{min60}) in najmanjših letnih 180-dnevni pretokov (Q_{min180}) za vodomerni postaji Litija na Savi in Nazarje na Savinji (Kobold in Ulaga, 2012: str 66)

Mali pretoki kažejo statistično značilen trend upadanja predvsem na vodomernih postajah z gorskim zaledjem. Eden od razlogov je ta, da so zime v zadnjih tridesetih letih manj bogate s snegom, kar prispeva k manjšim spomladanskim pretokom in posledično daljšim sušnim obdobjem. Izrazito upadajoč trend je značilen tudi za srednje letne pretoke, kar kaže na to, da se letna količina vode zmanjšuje (Frantar in sod., 2008). Upadanje pretokov je predvsem posledica upadanja letne količine padavin in porasta povprečne letne temperature zraka ter z njo povezanega večjega izhlapevanja vode. Povprečna letna temperatura zraka se je v Sloveniji v zadnjih 50 letih (od 1962 do 2012) statistično značilno povečala za $1,7 \pm 0,75$ °C (Frantar in sod., 2008). Ob napovedanih podnebnih spremembah se bodo trendi manjšanja pretokov in dolžine hidrološke suše verjetno nadaljevali.

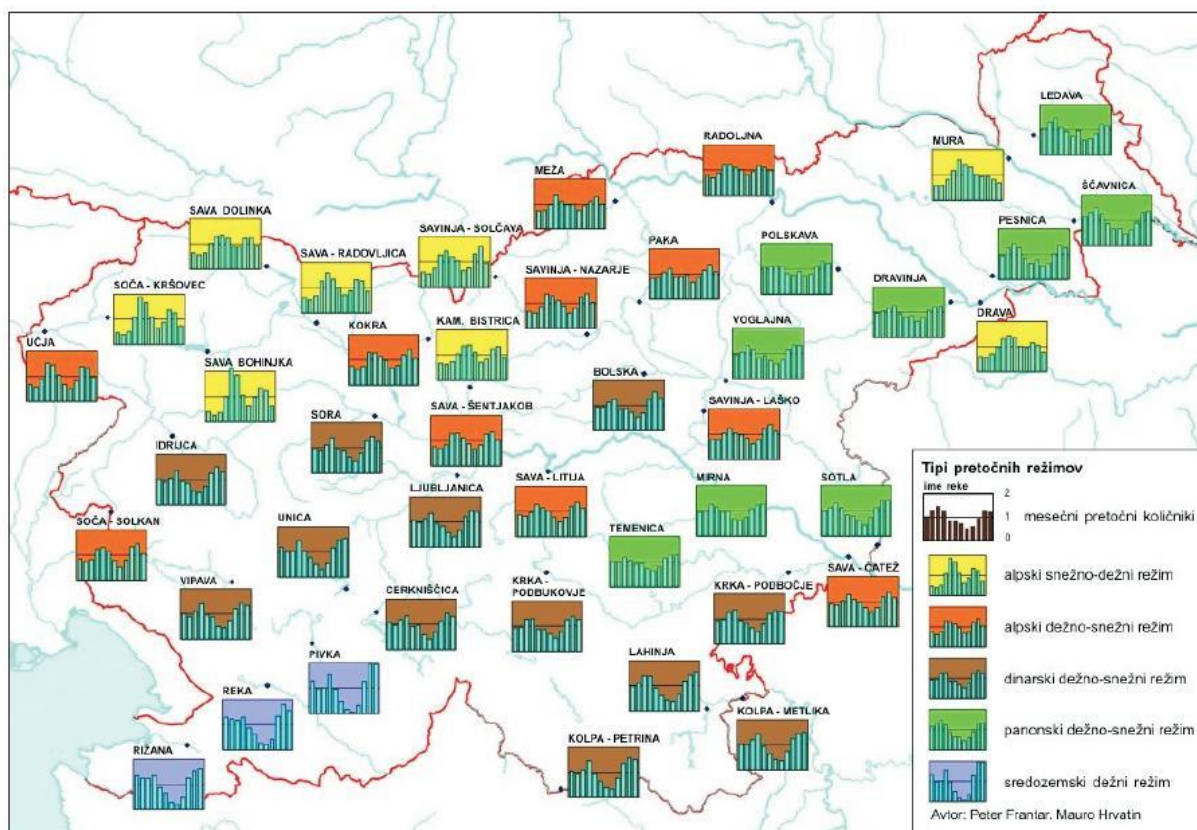


Slika 13: Trend najmanjših letnih 30-dnevnih pretokov (Q_{min30}). Trend je statistično značilen s stopnjo značilnosti nad 90 % (Kobold in Ulaga 2012: str 66)

3.4 Vpliv rečnega režima na hidrološko sušo

V raziskavi Frantarja in sodelavcev (2005) je bilo ugotovljeno in opredeljeno pet tipov pretočnih režimov; poimenovani so bili glede na pokrajinsko enoto, za katero so značilni, ter glede na vodni vir, s katerim se reke napajajo (slika 14). Vsak tip ima svoje sezonske posebnosti, s katerimi se razlikuje od drugih režimov. V Sloveniji ločimo naslednje pretočne režime:

- alpski snežno-dežni režim,
- alpski dežno-snežni režim,
- dinarski dežno-snežni režim,
- panonski dežno-snežni režim in
- sredozemski dežni režim.



Slika 14: Tipi pretočnih režimov v Sloveniji med letoma 1971 in 2000 (Frantar 2010, str 60)

Globalno naraščanje temperatur zraka pospešuje predvsem poletno izhlapevanje vode (iz rastlin, zemlje ter vodnih površin), zaradi česar vseskozi narašča delež rek, ki imajo sredi poletja glavni pretočni nižek. Za temperaturne razmere zraka v obdobju 1971–2000 je najbolj značilno, da so v

povprečju skozi celotno obdobje temperature naraščale po vsej državi, k porastu temperature pa najbolj prispeva dvig povprečne temperature ravno poleti. Porast temperatur nedvomno spada med najpomembnejše vplive na upadanje povprečnih letnih pretokov slovenskih rek ter na spremembe pretočnih režimov. Najvišji porast temperatur poleti posledično zmanjšuje količino vode v slovenskih rekah (Frantar, 2010).

Primerjava pretočnih režimov med leti 1961 in 1990 ter 1971 in 2000 je pokazala, da se vplivi podnebnih sprememb vse bolj izrazito kažejo tudi pri vodovju. Posebej izstopajo naslednje podnebne razlike, ki vplivajo na pretočni režim (Frantar, 2010):

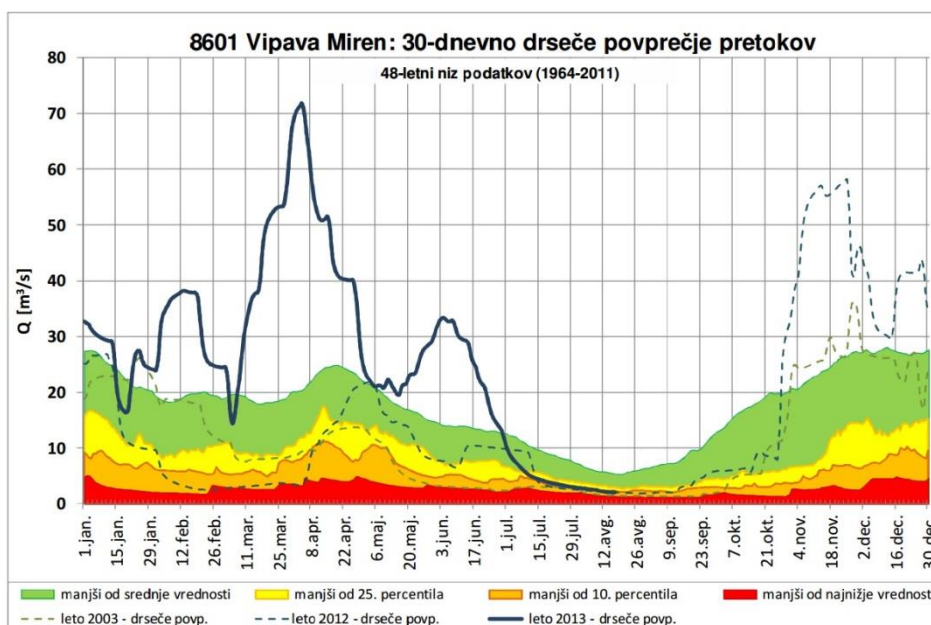
- *višje povprečne temperature zraka*: višja temperatura zraka pomeni večje izhlapevanje, ki se poveča zlasti v rastni dobi rastlin. Količina vode v rekah se zato še dodatno zmanjšuje; večji delež padavinske vode namreč porabijo (zadržijo) rastline, posledično pa se zmanjša delež odtoka vode. Izrazitejšo povečevanje poletnih temperatur še izdatneje vpliva na že tako nizke količine voda v strugah;
- *spremenljiva količina padavin*: sezonske spremembe v padavinskem režimu vplivajo zlasti na povečanje jesenskega odtoka, hkrati pa negativni trendi količine padavin zmanjšujejo pretoke v ostalih treh letnih časih. Povečujejo se razlike med najnižjimi in najvišjimi pretočnimi količinami;
- *krajše trajanje snežne odeje v sredogorju in v nižinah* pomeni skromnejši snežni zadržek, posledično pa manjši vpliv snega in pomladanskega taljenja na količine vode v rekah. Taljenje snega sicer še vedno pomembno prispeva h količini vode v strugi, vseeno pa se njegov delež zmanjšuje. Povečuje se vpliv dežnih padavin in s tem neposrednejši in hitrejši površinski odtok (Frantar, 2010).

Različni rečni režimi vplivajo tudi na izbiro metode za vrednotenje hidrološke suše. Na eni strani imamo reke, ki imajo izrazit alpski snežno-dežni režim, kot je na primer Mura, za katero je značilno poletno napajanje reke zaradi taljenja snega in ledu na območjih, kjer izvira. Za takšne reke lahko pričakujemo, da bo nihanje pretokov zelo majhno in bomo temu primerno izbrali ustrezno metodo. Medtem ko nekatere reke s sredozemskim dežnim režimom, kot je na primer Dragonja, lahko poleti ali ob daljšem pomanjkanju padavin presahnejo.

3.5 Identifikacija, spremljanje in vrednotenje hidrološke suše

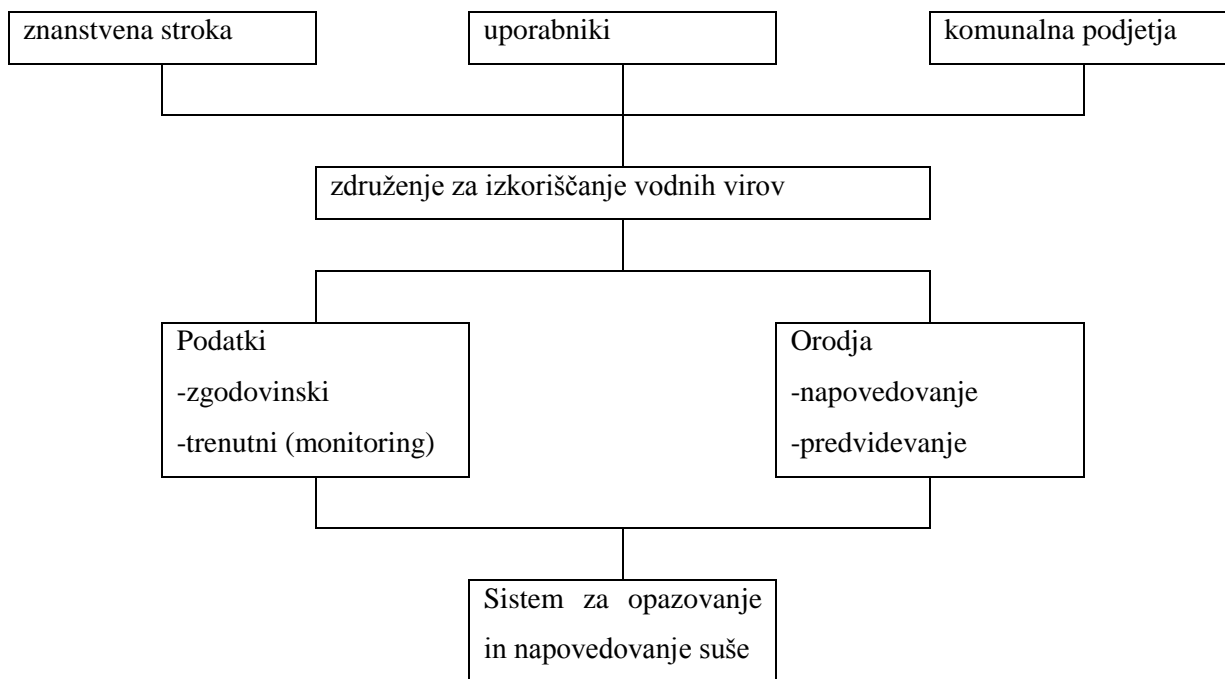
Suša je lahko globalen pojav, ki se odvija sorazmerno počasi (Tallaksen in van Lanen, 2004). Povzroči jo vztrajna in zelo obsežna atmosferska cirkulacija – dolgotrajna anticiklonska območja. V zadnjih letih je viden velik napredek v razumevanju odnosa med določenimi vzorci vremena in pojavi suše. Natančneje, najdene so bile povezave med razsežnostjo suše in različnimi anomalijami atmosferskega tlaka (Tallaksen in van Lanen, 2004). Povezava med določenimi vzorci vremenskih pogojev ali drugimi korelacijskimi spremenljivkami, kot je na primer temperatura morske površine in sušo, je temeljno področje raziskav, ki ponuja velik napredek v srednji in dolgoročni napovedi suše (Tallaksen in van Lanen, 2004). To bi lahko omogočalo napovedovanje suše tudi do enega meseca vnaprej.

Na Agenciji RS za okolje ob pojavu suše izdajajo tedenske biltene z opisom hidrometeoroloških razmer in stanjem vodnih zalog v Sloveniji. Ti so objavljeni na spletni strani ARSO. Stanje pretokov prikazujejo s 30-dnevnim drsečim povprečjem in ga primerjajo s percentilnimi vrednostmi malih pretokov (slika 15). To je le eden od načinov, s katerim analiziramo in spremljamo sušne pretoke.



Slika 15: Primer vodnatosti reke Vipave na hidrološki postaji Miren. Vrednosti pretokov na grafikonu predstavljajo srednji pretok v preteklih 30-ih dneh za vsak posamezen dan v letu (ARSO, 2013)

Napovedovanje hidrološke suše bi lahko bil integriran del sistema za zgodnje napovedovanje suše - Sistem za opazovanje in napovedovanje suše. Tak sistem bi moral biti narejen po meri uporabnikov, komunalnih podjetij in znanstvene stroke. Sistem bi temeljil na najnovjšem znanstvenem razvoju o raziskavah sušnih pojavov, komunikacijski tehnologiji in GIS-u (slika 16).



Slika 16: Komponente sistema za opazovanje in napovedovanje suše (povzeto po Tallaksen in van Lanen, 2004: str. 486)

Sistem mora temeljiti na različnih tipih podatkov in orodij za napovedovanje in ovrednotenje suše. Prav tako pa mora sistem spremljati vse spremenljivke, ki povzročajo in vplivajo na sušo na izbranem območju. Na primer, v polsuhih podnebnih območjih kot je sredozemsko območje lahko zimsko podnebno dogajanje v večji meri nakaže trend podnebnih dogajanj v poletnem obdobju.

4 HIDROLOŠKA SUŠA IN KAZALCI MALIH PRETOKOV

4.1 Uvod

Hidrološka suša površinskih voda je bolj splošen pojav kot mali pretok. V splošnem je definirana kot obdobje, ko so pretoki pod normalnimi vrednostmi, z vidika potreb po vodi pa nezadostni (Fleig, 2004). V obeh primerih jo opišemo z vrednostmi malih pretokov. Narejena mora biti jasna razmejitev med sušo in periodami malih pretokov. Mali pretok je sezonski pojav in je pomemben sestavni del pretočnega režima. Nasprotno pa je suša naravni pojav, ki nastane zaradi daljšega obdobja z izrazitim pomanjkanjem padavin. Medtem ko suša vključuje male pretoke, neprekinjen sezonski dogodek malih pretokov ni nujno suša. Za opis in ovrednotenje hidrološke suše zato obstaja več kazalcev malih pretokov, ki jih določimo ali izračunamo iz podatkov meritev. V Sloveniji za okoljske podatke skrbi Agencija Republike Slovenije za okolje. Za posamezne vodotoke so nizi podatkov o pretokih dolgi okrog 100 let, kar dodatno pripomore k natančnosti samega vrednotenja hidrološke suše.

Pri analizah podatkov se moramo zavedati, da nas lahko vsaka analiza določanja hidrološke suše pripelje do različnih zaključkov. Če analiziramo samo posamezna leta, se lahko zgodi, da letna analiza ne pokaže hidrološke suše. Ob upoštevanju obdobja dveh let oz. z drugačno analizo, ki bi pokazala, da se je hidrološka suša začela na koncu enega leta ter nadaljevala na začetku drugega, pa bi lahko dobili povsem drugačen rezultat.

Ko določamo značilnosti hidrološke suše moramo prav tako upoštevati različne rečne režime posameznih vodotokov. Sezonske male pretoke lahko povzroči predvsem pomanjkanje padavin, pogosto v povezavi z izgubami zaradi izhlapevanja ali skladiščenjem vode v snegu. Vodotoki z alpskim snežno-dežnim režimom, ki poleti ne občutijo suše zaradi taljenja snega, »poletna« suša veliko manj prizadene kot vodotoke z drugimi režimi (Tallaksen in van Lanen, 2004).

Ker so v obdobju, ko čutimo podnebne spremembe, zime v Sloveniji manj bogate s snegom (Kobold in sod., 2011), se daljša nizkovodna stanja in suša pojavijo tudi v območjih s snežno-dežnim režimom.

4.2 Terminologija

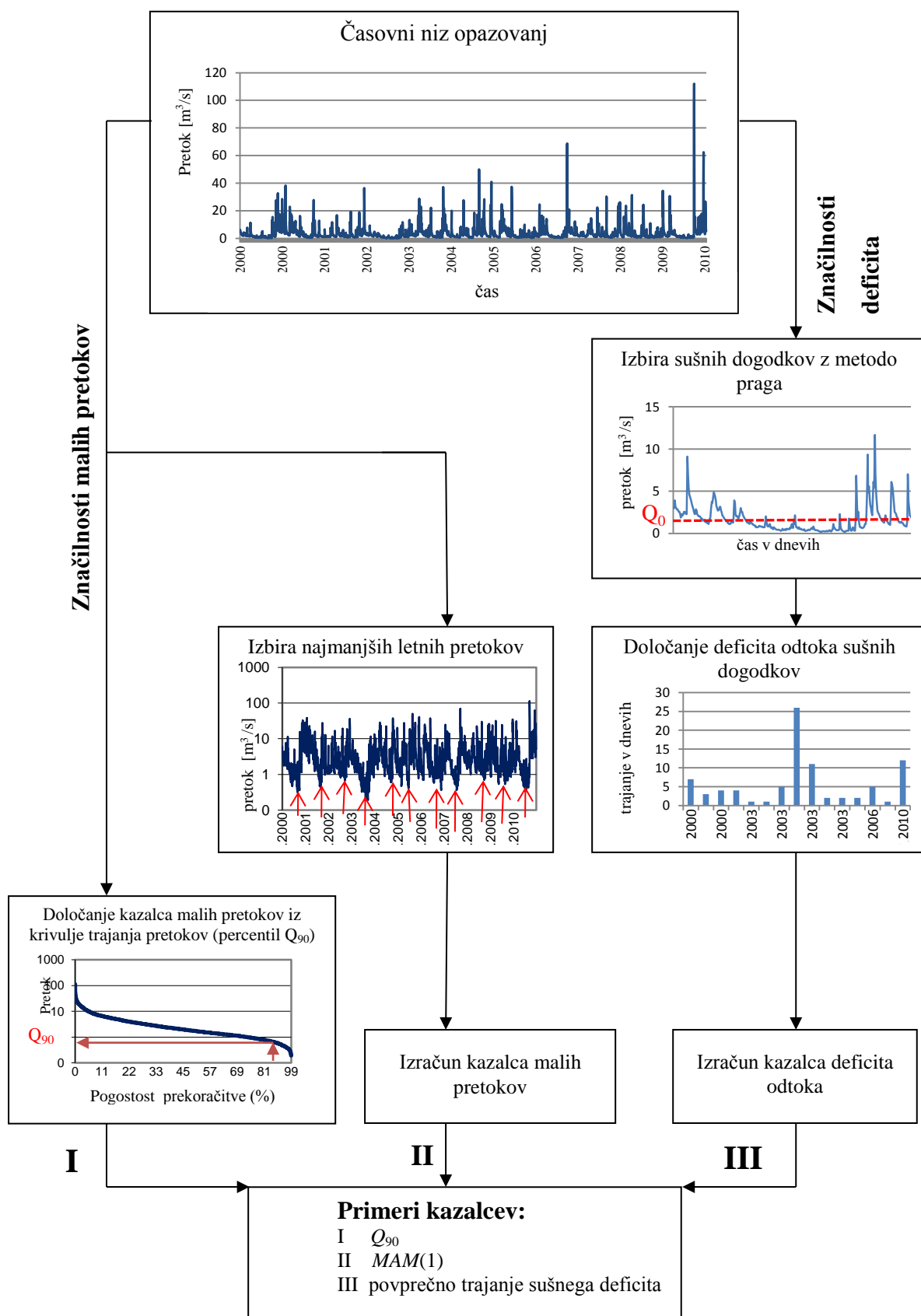
Kako lahko opišemo hidrološko sušo? V situaciji, ko nastopi hidrološka suša, so pretoki zelo mali ali celo enaki nič. Zato lahko za kazalce, ki opisujejo male pretoke vodotokov ali časovna obdobja trajanja malih pretokov rečemo, da opisujejo sušno obnašanje posameznih vodotokov.

Ti kazalci malih pretokov opisujejo sušo na prej definiranih časovnih obdobjih. Ne podajo nam popolnega opisa samega pojava hidrološke suše. Na vprašanja, kot je kdaj je bil začetek, konec ali kakšno je celotno trajanje in obseg suše, velikokrat ne dobimo natančnega odgovora. Da bi lažje definirali kasnejše značilnosti suše za posamezno reko, moramo najprej določiti mejo (prag) za sušni pretok.

Osnova določitvi kazalcev malih pretokov so časovni nizi srednjih dnevni podatkov. Iz teh lahko na različne načine izpeljemo kazalce malih pretokov:

- Iz krivulje trajanja pretokov dobimo percentil npr. Q_{90} , za katerega pri izpeljavi potrebujemo celoten niz podatkov (poglavje 4.2.1). Kazalec je podan kot primer na sliki 17 (stolpec I).
- Kot minimalni pretok v določenem časovnem obdobju. Iz te značilnosti lahko izpeljemo nov kazalec minimalnih pretokov – najmanjši letni srednji dnevni pretok ($MAM(1)$) (slika 17, stolpec II).

Sušna obdobja pa lahko definiramo tudi kot pretok, ki pade pod določen prag Q_0 , pod katerim smatramo, da je pretok v deficitu. Te deficite pa lahko opišemo z različnimi karakteristikami, kot so trajanje, intenziteta, čas nastopa in prostorski obseg (slika 17, stolpec III). Za računanje deficitnih značilnosti potrebujemo kazalce malih pretokov iz stolpca I ali II na sliki 17.



Slika 17: Grafični prikaz določitve kazalcev malih pretokov (povzeto po Tallaksen in van Lanen, 2004, str 142)

Če povzamemo, lahko kazalec kot številka ponazarja vpliv suše ali obnašanje malih pretokov na določenem območju ali celotni regiji. Definicija sušnih dogodkov nakazuje uporabo metode, ki izloči sušne dogodke iz niza časovnih podatkov. Zadnja prikazana metoda (slika 17, stolpec III) nam količinsko definira, ali je izbrano območje v deficitu ali ne. Ali bo imela ta hidrološka suša obsežnejši vpliv, pa je odvisno od ranljivosti obravnavanega območja, kar pa spada že pod kmetijsko sušo (Tallaksen in van Lanen, 2004).

Pogosto uporabljen kazalec malega pretoka je tudi indeks baznega odtoka. Indeks baznega odtoka ali *BFI* (ang. *base-flow index*) je razmerje med baznim odtokom in celotnim pretokom, preračunan s posebnim hidrološkim postopkom (Gustard in sod, 1992; Kovačič, 2012).

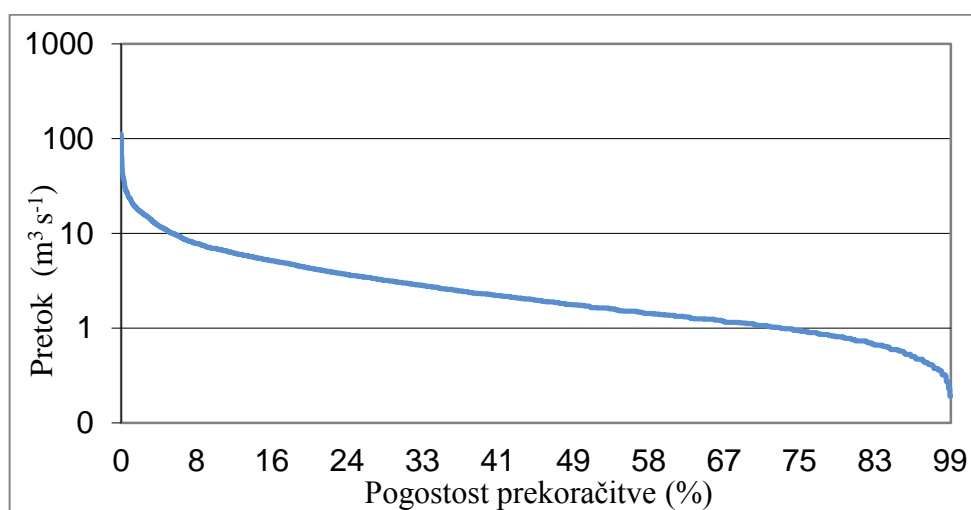
Vendar indeksa baznega odtoka v naši diplomski nalogi ne bomo računali, ker so že pretekle raziskave (Žogan, 2013) pokazale, da ima kazalec *BFI* daleč najšibkejšo korelacijsko povezavo med vsemi tremi metodami (percentili iz krivulje trajanja pretokov, *MAM* in *BFI*) za izračun kazalcev malih pretokov. Zato se bomo osredotočili le na percentile določene iz krivulje trajanja pretokov in kazalce *MAM* izračunane kot minimalni petek v določenem časovnem obdobju.

4.3 Percentili iz krivulje trajanja pretokov

To poglavje opisuje značilnosti malih pretokov. Kot smo omenili že v poglavju 4.2, obstaja več kazalcev oziroma metod za analizo malih pretokov, ki jih izpeljemo iz časovnih nizov podatkov srednjih dnevni pretokov. Pri izpeljavah pa moramo biti pozorni tudi na to, kakšne postopke izračunov uporabljamo. Metode, ki so bile izpeljane na določenih porečjih, ne ustrezajo nujno tudi drugim, zaradi velikega števila faktorjev, ki vplivajo na končni izračun, kot je rečni režim, velikost vodotoka, geološke in geomorfološke značilnosti ipd. Zato je vedno priporočljivo izbrano metodo preveriti še s kakšno drugo.

Prav tako pa moramo vzeti na znanje, da je večina kazalcev izpeljanih z računskimi postopki, ki vključujejo celoten spekter pretokov, od velikih do malih. Eden izmed takšnih primerov je krivulja trajanja pretokov, iz katere so izbrani percentili za male pretoke.

Krivulja trajanja pretokov je krivulja, ki kaže odstotek časa, v katerem je pretok vode v strugi enak ali večji od izbrane velikosti, ne glede na časovno zaporedje opazovanj (Mikoš in sod., 2002).



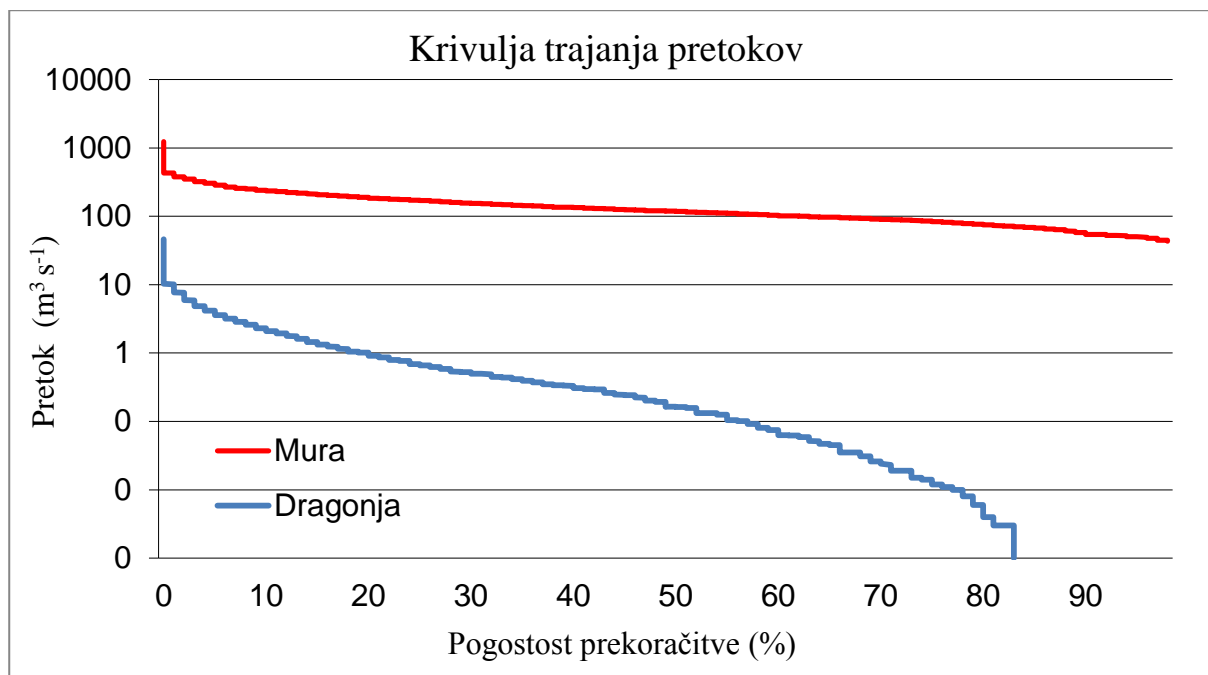
Slika 18: Krivulja trajanja pretokov za reko Bolsko v Dolenji vasi za obdobje 2000–2010

Krivuljo konstruiramo tako, da najprej razvrstimo podatke in potem za vsak podatek posebej izračunamo pogostost prekoračitve. Na sliki 18 je prikazana empirična krivulja trajanja pretokov za reko Bolsko za časovno obdobje od leta 2000 do 2010. Metoda za izračun vključuje celoten niz srednjih dnevnih podatkov, od velikih do malih pretokov. Za lažjo analizo je krivulja ponavadi prikazana v logaritemskem merilu. Abscisna os pogosto temelji na porazdelitvi normalne verjetnosti (Tallaksen in van Lanen, 2004).

Prekoračitev pretokov je kazalec, ki izraža razmerje časa, v katerem je določen srednji dnevni pretok prekoračen glede na cel niz podatkov. Prekoračitev pretokov je največkrat podana v obliki percentilov. Na primer, pretok 90.-percentil ali Q_{90} je pretok, ki je prekoračen 90 odstotkov časa glede na cel niz podatkov. Percentili malih pretokov iz krivulje trajanja pretokov se uporabljajo na različnih področjih, kot je oskrba z vodo, izkoriščanje vodnih moči, načrtovanje namakanja, račun rečne sedimentacije in poplavne študije. Ponazarjanje pretokov s percentili omogoča primerjavo pretokov različnih vodotokov, ob pogoju, da se pretočne krivulje normalizirajo (Tallaksen in van Lanen, 2004).

Običajno prekoračene percentile dobimo iz krivulje trajanja pretokov, ki temeljijo na celotnem nizu podatkov. Alternativno pa je mogoče, da te vrednosti dobimo tudi za krajše časovno obdobje, kot je npr. eno leto, če želimo obravnavati samo enoletno obdobje ali pa, če imamo zelo dolg podatkovni niz za določen dan v letu iz celotnega obdobja podatkov. Krivulja trajanja pretokov lahko temelji na podatkih o pretokih na dnevni, mesečni ali katerih drugih časovnih intervalih (Tallaksen in van Lanen, 2004).

Na sliki 19 sta prikazani krivulji trajanja pretokov za reki Muro in Dragonjo za obdobje od leta 2000 do 2010. Mura ima izrazit alpski snežno dežni režim, za katerega je značilno poletno napajanje reke zaradi taljenja snega in ledu v zgornjem delu porečja, Dragonja pa ima sredozemski dežni režim.



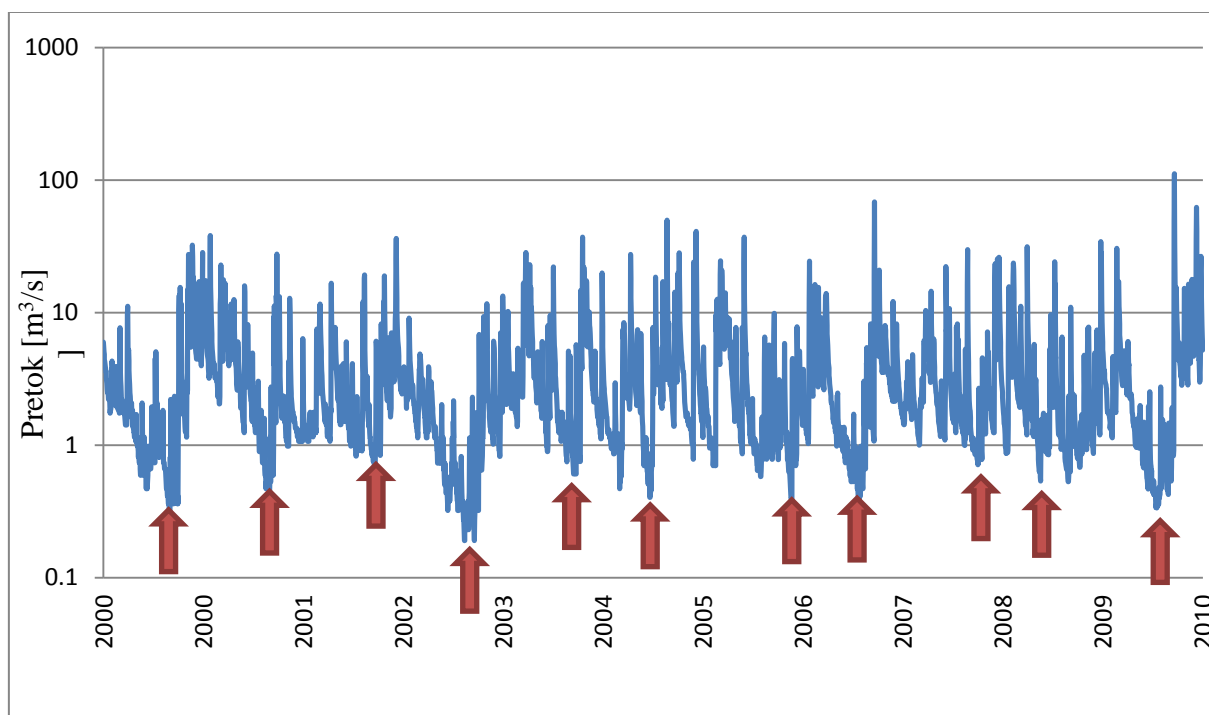
Slika 19: Krivulji trajanja pretokov voda za dva različna režima slovenskih rek za obdobje od leta 2000 do 2010 (Mura: alpski snežno-dežni režim, Dragonja: sredozemski dežni režim)

Vidimo, da je krivulja za Muro zelo položna, iz česar lahko sklepamo, da je nihanje pretokov zelo majhno. Iz krivulje lahko odčitamo Q_{90} in ga uporabimo za nadaljnje izračune. Medtem, ko ima reka Dragonja sredozemski dežni režim, in še posebno poleti zaradi pomanjkanja padavin rada presahne. Lahko vidimo, da je percentil malega pretoka, ki ga običajno uporabimo za nadaljnje računanje (Q_{90}) pri Dragonji enak nič. Ker pa logaritem števila 0 ni definiran, na grafu nični pretoki niso prikazani. Prav tako sta percentila, Q_{80} in Q_{70} zelo blizu ničle in bi morali za merodajen percentil malega pretoka vzeti Q_{60} ali celo nižjega.

4.4 Najmanjši letni (srednji dnevni) pretok

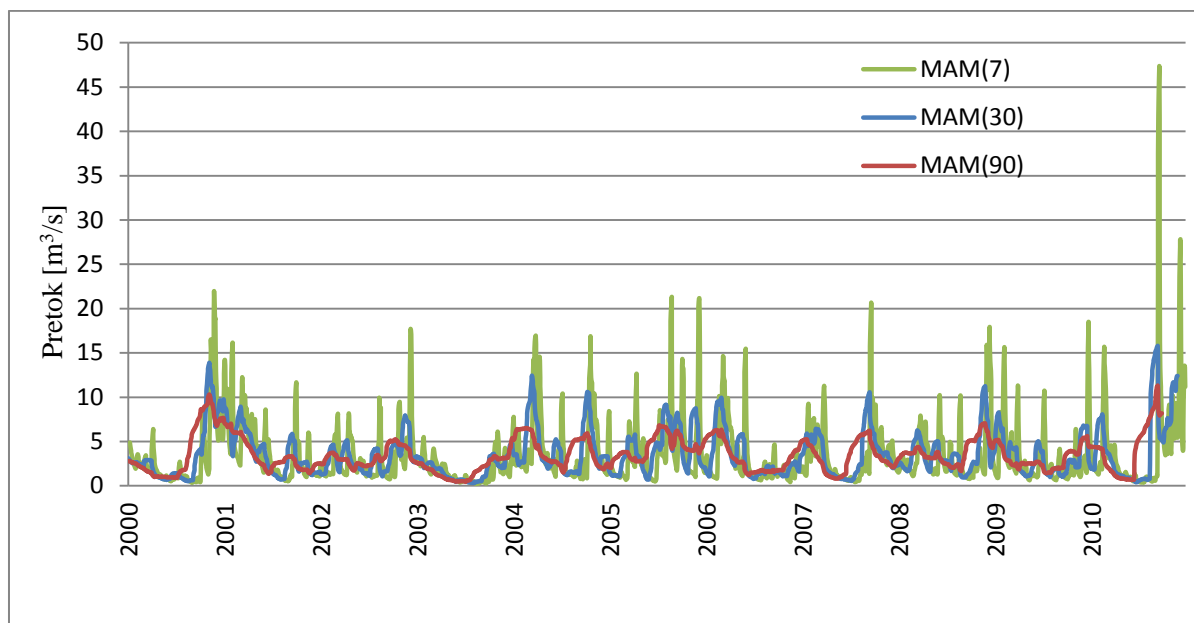
Slovenski izraz kazalca bi bil letni minimum LM , vendar se je v strokovni literaturi že dodobra sprejela mednarodna oznaka za označevanje opisanega sušnega kazalca MAM (*mean annual minimum*), zato bomo v diplomski nalogi uporabljali to kratico.

Eden izmed najbolj pogosto uporabljenih kazalcev malih pretokov je najmanjši letni pretok, ki je določen iz niza srednjih dnevni vrednosti. Ti kazalci se lahko računajo za različna trajanja glede na število dni (slika 20). V najpreprostejši obliki bi bil to najmanjši letni srednji dnevni pretok oziroma povprečna minimalna letna vrednost. Za $n > 1$ uporabimo metodo, ki nam izriše hidrogram, na katerem vrednosti niso samo dnevni pretoki, ampak so povprečje pretokov prejšnjih n -dni oziroma alternativno, prejšnja $n/2$ dneva in naslednja $n/2$ dneva. Na primer, če je $n = 7$, je vhodni podatek za 1 januar 2013 pravzaprav povprečje pretokov obdobja od 26. decembra 2012 do vključno 1. januarja 2013 oziroma alternativno povprečje pretokov od 29. decembra 2012 do 4. januarja 2013. Izpeljani podatki se lahko tako nanašajo na rezultate, ki jih dobimo s pomočjo povprečnega premičnega filtra za trajanje n -dni (Tallaksen in van Lanen, 2004). Algoritmi za izračun povprečnih večdnevni vrednosti pa so lahko za različno število dni. Najbolj pogosto računamo te algoritme za 1, 7, 30, 60 in včasih tudi za 90 dni. V praksi se najpogosteje uporablja 7-dnevni srednji letni minimalni pretok, ki se praviloma najbolje ujema s percentilom Q_{90} izračunanem iz krivulje trajanja pretokov. Vendar bomo za naše vodotoke v nadaljevanju to še preverili.



Slika 20: Hidrogram pretoka za reko Bolsko za obdobje 2000–2010 z označenimi letnimi minimalnimi pretoki

Kot primer so na sliki 21 prikazani srednji letni minimalni pretoki za Bolsko za 7, 30 in 90 dni za obdobje 2000–2010. Vsi ti kazalci so statistično zelo dobro povezani z malimi pretoki, izračunanimi iz krivulje trajanja pretokov, ki smo jih prikazali v poglavju 4.5.1 in imajo enak namen uporabe. To pomeni, da sta oba kazalca značilnosti malih pretokov.



Slika 21: Primerjava 7-, 30- in 90-dnevnih srednjih minimalnih pretokov za reko Bolsko v obdobju 2000–2010

Z ustrezno verjetnostno porazdelitvijo lahko ocenimo krivulje pogostosti (frekvenčna krivulja) malih pretokov za serije n -dnevni letni minimumov (Tallaksen in van Lanen, 2004). V splošnem krivulje pogostosti opisujejo letni minimum n -zaporednih dni povprečnega pretoka, ki ni nižji od dane vrednosti z določeno verjetnostjo. Te krivulje nam omogočajo oceno različnih povratnih dob oziroma tako imenovane T -letne dogodke. T -letni dogodki so lahko tudi kazalci malih pretokov (Tallaksen in van Lanen, 2004). Na primer, v Združenih državah je najpogosteje uporabljen kazalec malih pretokov 10-letni 7-dnevni minimalni pretok $MAM(7)_{10}$.

S programskim orodjem MS Excel smo tudi za naš primer izračunali 10-letni 7-dnevni minimalni pretok ($MAM(7)_{10} = 0,51 \text{ m}^3/\text{s}$), ki pa se ne ujema popolnoma s percentilom Q_{90} ($Q_{90} = 0,41 \text{ m}^3/\text{s}$) določenim iz krivulje trajanja pretokov, ki smo ga prav tako izračunali s programskim orodjem Excel. Zato je smotno preveriti tudi večdnevne minimalne pretoke, kot so 30, 60 ali celo 90 dni, saj vidimo (slika 21), da se z večanjem števila dni krivulja gladi in je za dolg niz podatkov veliko bolj pregledna kot pa za 1- ali 7-dnevni minimalni pretok, saj nam združi več krajših sušnih obdobj v eno celoto.

4.5 Deficit pretoka

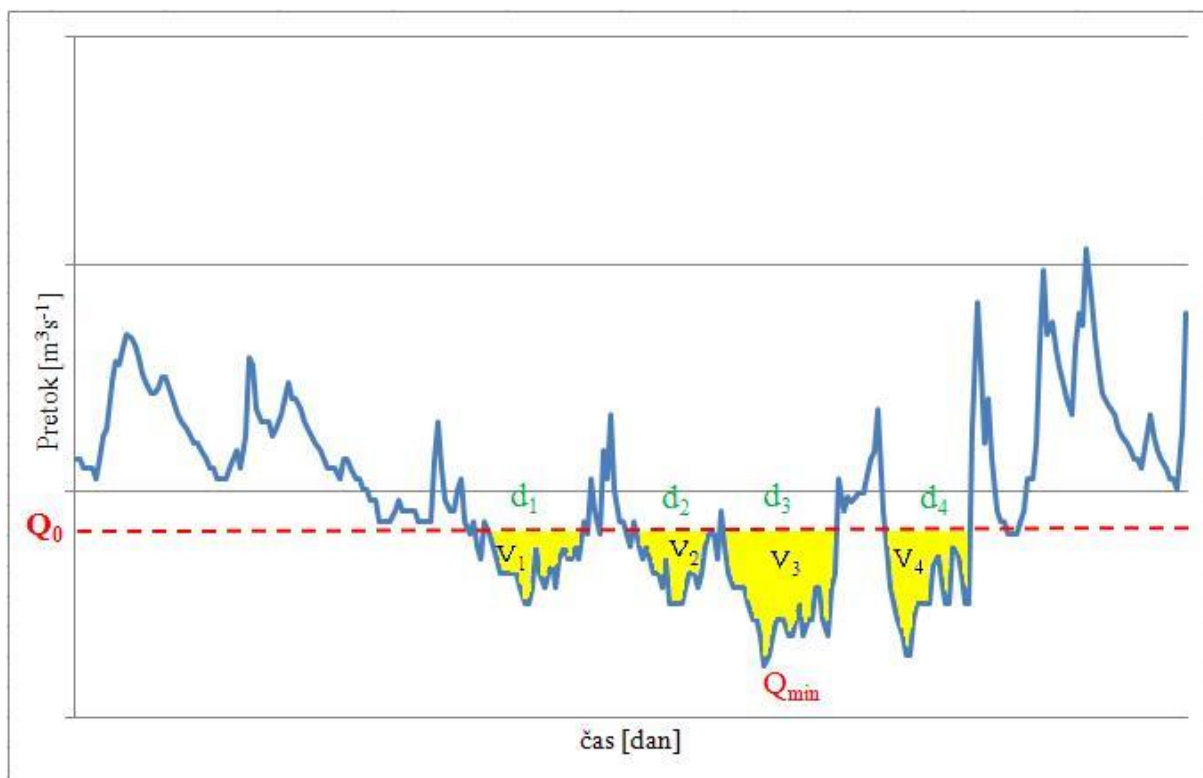
Za razliko od obeh že predstavljenih kazalcev, deficit pretoka temelji na določanju praga, pod katerim so pretoki v sušnem stanju. Vsak deficit ali sušni dogodek se lahko okarakterizira s celotnim trajanjem in volumskim deficitom (Tallaksen in van Lanen, 2004). V nadaljevanju sta predstavljeni dve metodi določanja deficita pretoka, metoda praga in algoritem zaporednih konic (ang. *sequent peak algorithm SPA*).

4.5.1 Metoda praga

Metoda praga je najbolj pogosto uporabljena količinska metoda, kjer je najpomembneje, da definiramo začetek in konec suše. Metoda temelji na definiranju praga Q_0 , pod katerim se pretok smatra za sušni.

Na sliki 22 vidimo primer določanja sušnih dogodkov z metodo praga. Najprej določimo prag Q_0 . Ko pretok pade pod ta prag, se začne hidrološka suša in v trenutku, ko pretok naraste nad ta prag, se suša konča. Pri metodi je možna natančna definicija začetka in konca posameznega sušnega dogodka. Statistične lastnosti porazdelitve sušnega deficita, trajanje sušnega deficita (na sliki 22 označen kot d_i) in volumen oziroma obseg (na sliki 22 označen kot V_i), so značilnosti določenega sušnega dogodka. Istočasno pa je mogoče definirati tudi minimalni pretok vsakega posameznega sušnega obdobja Q_{\min} (slika 22), ki je prav tako značilnost sušnega deficita. Čas, ko nastopi hidrološka suša, lahko definiramo na več načinov, na primer začetni dan sušnega dogodka, glavni začetek sušnega dogodka (ni nujno, da je enak začetnemu dnevu sušnega dogodka) in dan, ko je v vodotoku nastopil minimalni pretok.

Pogosto se za karakterizacijo sušnega deficita uporablja izraz intenziteta suše (včasih imenovana tudi sušna magnituda) m_i , ki je definirana kot razmerje med volumnom in trajanjem sušnega deficita. Glede na časovni niz podatkov karakteristik sušnega deficita, lahko izpeljemo različne kazalce deficita, kot je predstavljeno na sliki 17, stolpec III).

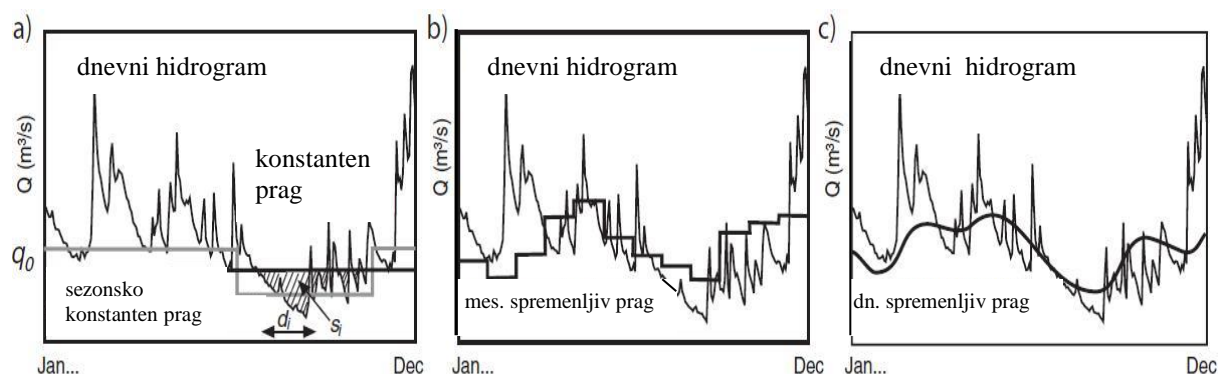


Slika 22: Definicija sušnega deficita za Bolsko za obdobje marec–november 2003

4.5.1.1 Izbira praga

Prag sušnega deficita lahko izberemo na več načinov in ena izmed možnosti je, da ga izberemo kot določeno funkcijo izbranega tipa vodnega deficita. V nekaterih aplikacijah je prag definiran kot količina pretoka, določenega po algoritmu zaporednih konic (*SPA*). Največkrat pa za prag vzamemo kazalce malih pretokov, na primer percentile iz krivulje trajanja pretokov in *MAM*, kot je prikazano v podpoglavjih 4.3 in 4.4.

Vpliv na izbiro percentila iz krivulje trajanja pretokov kot praga sušnega deficita ima tudi hidrološki režim. Za vodotoke, ki imajo stalne pretoke in nikoli ne presahnejo, je najbolj običajna izbira praga med Q_{80} in Q_{95} . Za reke, ki v sušnih obdobjih presahnejo, pa je lahko že Q_{80} ničelna vrednost. Za primer reke Dragonje, ki je prikazan v podpoglavju 4.3 smo videli, da je še Q_{70} zelo blizu ničelnemu pretoku in bi morali za realen prag sušnega deficita izbrati Q_{60} ali celo nižji percentil. Woo in Tarthule (1994) sta testirala več afriških rek in ugotovila, da so merodajni pragi med Q_{20} in vse tja do Q_5 , saj so reke večino leta presušene. Možen izračun percentilov je samo na neničelnih pretokih.



Slika 23: Ilustracija različnih pragov: konstanten prag (a), mesečno spremenljivi prag (b), dnevno spremenljivi prag (c) (povzeto po Stahl, 2001: str 22)

Prag sušnega deficita je lahko konstanten ali pa se skozi leto spreminja. Če je prag izpeljan iz krivulje trajanja pretokov, se privzame, da je celoten niz podatkov (ali določeno obdobje v letu) uporabljen tudi v hidrogramu za določanje praga. To je prikazano na sliki 23a, kjer je za izbrano časovno obdobje prag Q_{90} . Prag je lahko konstanten tudi v primeru, če se poletno in zimsko obdobje analizira ločeno, vendar temelji samo na pretokih analiziranega obdobja. Spremenljiv prag pa je prag, ki se preko leta spreminja. Na sliki 23 lahko vidimo mesečno (b) in dnevno (c) spremenljiv prag (Stahl 2001).

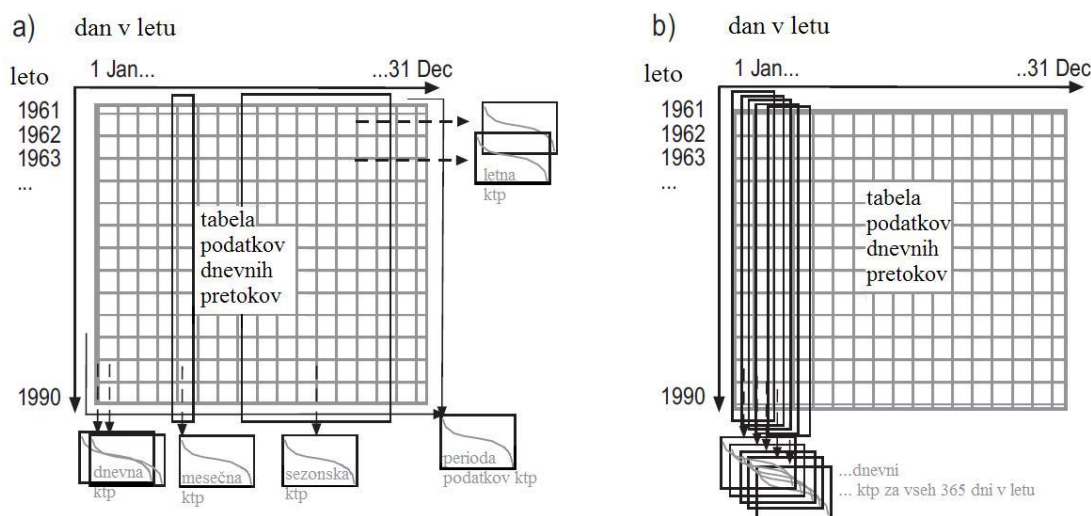
Spremenljiv prag se največkrat uporablja pri zaznavanju odstopanj tako malih kot velikih pretokov. Pretoki, ki so nižji od običajnih sezonskih velikih pretokov, bi lahko bili pomembni za kasnejšo sušno analizo. Toda periode z relativno nizkimi pretoki v času sezone velikih pretokov ali na primer poplav zaradi zakasnjene taljenja snega, običajno niso upoštevane kot sušne. Zaradi tega je mogoče bolje, da se dogodke, ki so definirani s spremenljivim pragom, raje kot hidrološka suša imenuje pretočni primanjkljaj ali pretočne anomalije (Stahl, 2001).

Lahko pa se spremenljivi prag uporablja za definicijo period, ko se pojavi pretočni primanjkljaj kot anomalija »normalne« sezone ali za analizo dnevnega pretoka. Na primer dnevni spremenljivi prag se lahko definira kot verjetnost presežka 365-dnevne krivulje trajanja pretokov. Pri tem pa moramo paziti, da so nizi podatkov na določeni vodomerni postaji dovolj dolgi, ker so drugače lahko rezultati zavajajoči. Da povečamo obravnavan vzorec in zgladimo določen prag, lahko dnevne izpeljave izračunamo na vseh pretokih, ki se pojavijo v okviru n -dneva. Na primer uporaba 31-dnevnega okna bi pomenila, da bi se prekoračitev pretoka 1. junija izračunala iz vseh pretokov med 17. majem in 16. junijem v vsakem letu obravnavanega časovnega obdobja. Če imamo periodo podatkov za N let in ob

predpostavki da v podatkih ne manjka noben dnevni podatek o pretoku, lahko na kateri koli dan izračunamo prekoračitev pretoka po enačbi (Stahl, 2001):

$$QE_d = \frac{((nN+1)-i_d)100\%}{nN}, \quad (1)$$

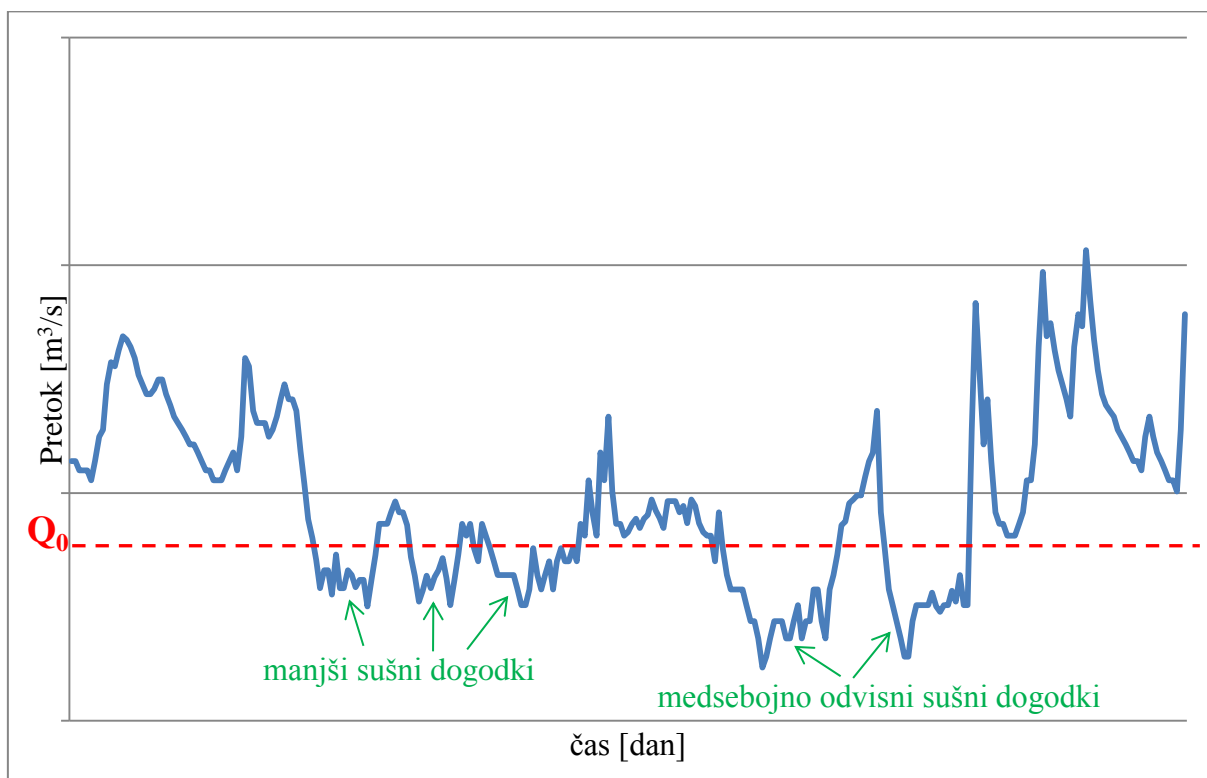
kjer je QE_d prekoračitev pretoka na dan d , n širina okna v dnevih, N število let in i_d rang dnevnega pretoka na dan d (pretoki so rangirani od največjega do najmanjšega) glede na vrednosti nN .



Slika 24: Shema za določitev različnih krivulj trajanja pretokov za definicijo praga; a) koledarske enote (mesec, leto), b) za vsak dan v letu glede na premično okno (povzeto po Stahl, 2001: str 27)

Na sliki 24 vidimo ilustracijo postopka izračuna praga za različna časovna obdobja. Izpeljava dnevnih, mesečnih in sezonskih period podatkov krivulj trajanja pretokov je predstavljena na sliki 24 a, percentili prekoračitve za vsak dan v letu pa so izračunani iz premičnega okna za n -ti dan na sliki 24 b. Eden izmed rezultatov za dnevno prekoračitev (Q_{90}) se lahko obravnava kot spremenljivi prag (slika 23 c).

Metoda praga ima potencial za popoln opis stohastičnega procesa sezonske suše (znotraj enega leta). Vendar pri uporabi dnevnega časovnega procesa naletimo na dva specifična problema in sicer na medsebojno odvisnost med samimi sušnimi dogodki in na pojav manjših sušnih dogodkov. Če sušno obdobje nastopi v daljšem obdobju, lahko opazimo, da pretok večkrat preseže nivo praga za krajše obdobje in se zaradi tega večji sušni dogodek razdeli na več manjših sušnih dogodkov, ki so medsebojno odvisni (slika 25).



Slika 25: Prikaz problema medsebojne odvisnosti sušnih dogodkov in večjega števila manjših sušnih dogodkov

Da se izognemo temu problemu, ki bi lahko izkrivil izračunane ekstremne vrednosti, mora dosledna definicija sušnih dogodkov vključevati nekakšno združevanje, da lahko definiramo neodvisno sušno zaporedje.

4.5.1.2 Postopki združevanja

V praksi se uporabljajo tri različne metode združevanja medsebojno odvisnih sušnih dogodkov: postopek drsečega povprečja, algoritem zaporedja konic in kriterij med-dogodka časa in volumna.

Postopek drsečega povprečja enostavno zglati niz časovnih podatkov z uporabo filtra drsečega povprečja. Priporočeno je, da se uporabi okno širine 10 dni.

Kriterij med-dogodka časa in volumna se uporabi z združitvijo dveh sosednjih dogodkov z značilnostima (d_i, V_i) in (d_{i+1}, V_{i+1}) če: (a) je čas med-dogodka t_i manjši ali enak kritičnemu trajanju t_{\min} in (b) je razmerje med odvečnim volumnom med-dogodka z_i in deficitom volumna manjše od

kritičnega razmerja z_{\min} . Nato se združen sušni dogodek še enkrat združi z naslednjim sušnim dogodkom, če sta izpolnjeni točki (a) in (b), in tako naprej. Značilnosti deficita združenega sušnega dogodka se izračuna kot:

$$d_{združen} = d_i + d_{i+1} + t_i, \quad (2)$$

$$V_{združen} = v_i + v_{i+1} - z_i, \quad (3)$$

Algoritem zaporednih konic se lahko obravnava kot metoda za določanje sušnih dogodkov in jo bomo zato v naslednjem podpoglavju še natančneje opisali skupaj s postopki združevanja.

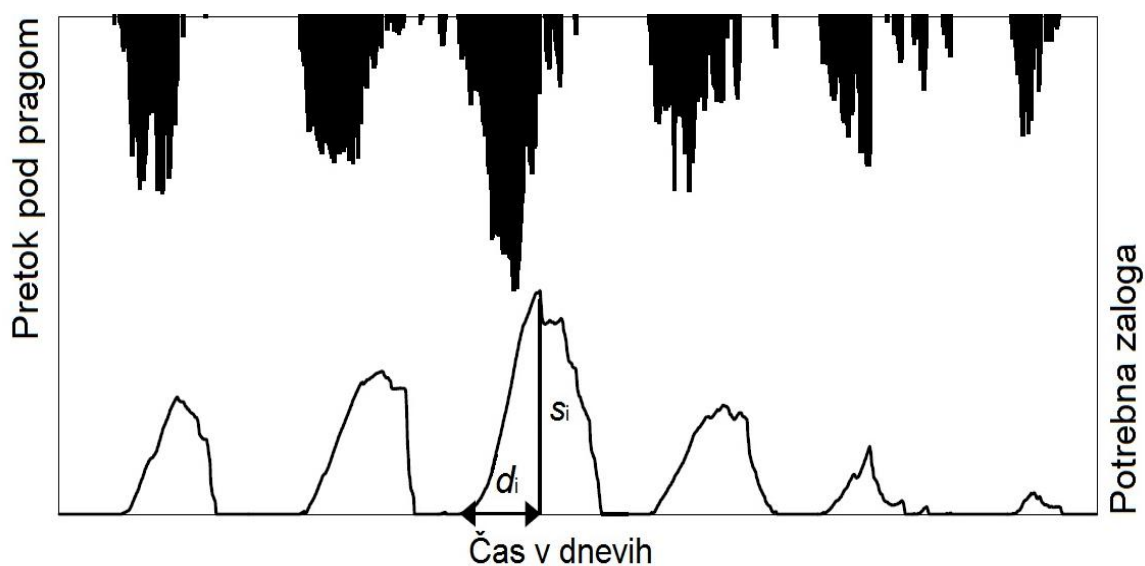
Če imamo večletne suše, lahko za analizo sušnega dogodka znotraj enega leta uporabljamo samo metodo algoritma zaporednih konic. Uporablja se lahko za zelo nizke prage po metodi praga. Prednost te metode pa je tudi ta, da ni potrebno določiti nobenih predhodnih parametrov v primerjavi z metodo algoritma zaporednih konic, kjer moramo prej določiti velikost okna za drseče povprečje.

Število manjših sušnih dogodkov pa je pri metodi algoritma zaporednih konic vseeno veliko. Zato je priporočljivo najmanjše sušne dogodke izločiti glede na faktor pogostosti, saj ravno ti pokvarijo natančnost pri računanju pojavov večjih suš. Je pa izbira faktorja pogostosti zgolj ocena. Ravno v tem pa je edina prednost postopka drsečega povprečja, da istočasno reducira problem manjših sušnih dogodkov, saj združi medsebojno odvisne dogodke (Tallaksen in van Lanen, 2004).

4.5.2 Algoritem zaporednih konic

Algoritem zaporednih konic se največkrat uporablja zato, da se na podlagi podatkov srednjih dnevni pretokov določijo sušni dogodki. Naj Q_t označuje dnevni pretok določene reke, Q_0 izbran prag oziroma zelen pretok, ki smo ga pred tem definirali, S_t pa potrebno zalogo, ki jo izračunamo kot (Tallaksen in van Lanen, 2004):

$$S_t = \begin{cases} S_{t-1} + Q_0 - Q_t, & \text{če je pozitivno} \\ 0, & \text{drugače} \end{cases}, \quad (4)$$



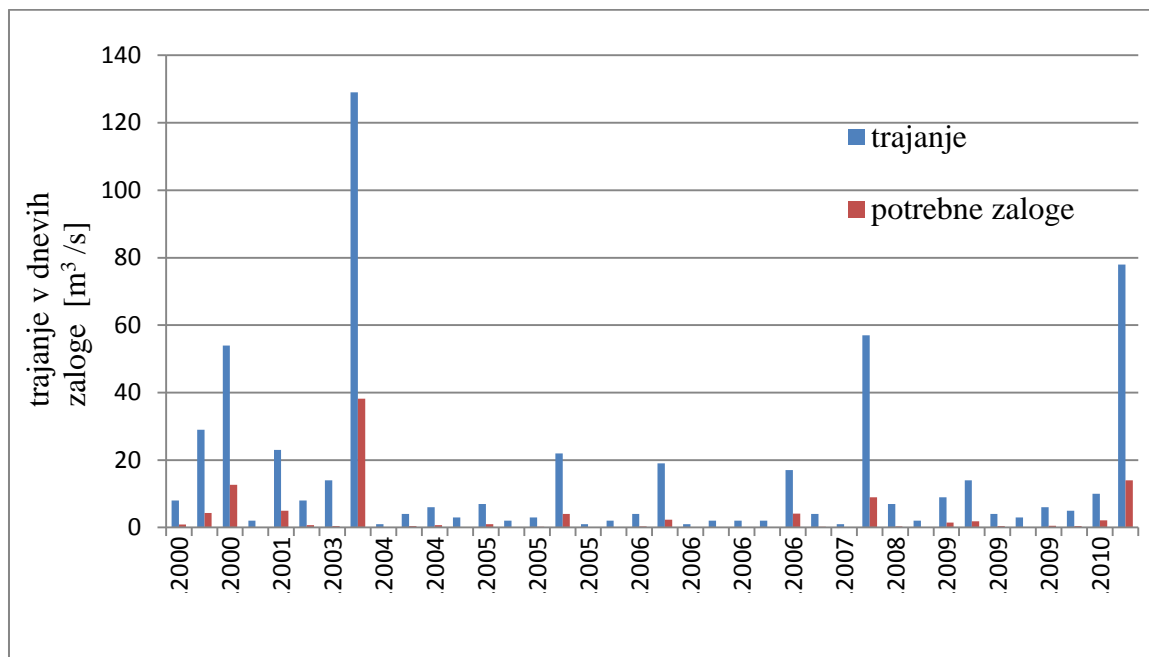
Slika 26: Definicija sušnih dogodkov z uporabo algoritma zaporednih konic (povzeto po Tallaksen in van Lanen, 2004: str 175)

Nprekinjeno zaporedje pozitivnih vrednosti S_t , $\{S_t, t=\tau_0, \dots, \tau_{konc}\}$ definira periodo, ko se zaloge praznijo in polnijo (slika 26). Potrebne zaloge v tej periodi $\max\{S\}$ definirajo volumski sušni deficit s_i , in časovni interval d_i od začetka, ko še ni zalog τ_0 , do trenutka, ko dosežejo zaloge maksimalno vrednost τ_{max} (Tallaksen in van Lanen, 2004):

$$d_i = \tau_{max} - \tau_0 + 1, \quad (5)$$

Ta tehnika se razlikuje od metode praga v tem, da se za tiste periode, ko pretok presega izbrani prag, lahko potrebe po zalogi negirajo. Lahko mine več period deficita, preden se bo pojavil dovolj velik pretok, ki bo zapolnil zaloge. Pri tej metodi se lahko dva sušna dogodka združita, če zaloge po prvem dogodku še niso zapolnjene, ko se drugi že začne ($S_t > 0$) (Tallaksen in van Lanen, 2004).

Na sliki 27 je prikazano trajanje hidrološke suše v dnevih za posamezna leta za reko Bolsko v obdobju 2000–2010. Iz grafa je možno razbrati tudi število vseh hidroloških suš v tem obdobju, saj so se v nekaterih letih pojavile večkrat, kljub temu, da v izračunih že uporabljamo postopke združevanja. Prav tako pa lahko iz grafa razberemo, kolikšne zaloge vode bi bile potrebne, da bi bile te hidrološke suše preprečene.



Slika 27: Trajanje sušnega deficita in potrebne zaloge za Bolsko v obdobju 2000–2010

5 IZRAČUN KAZALCEV MALIH PRETOKOV ZA IZBRANE VODOMERNE POSTAJE PO SLOVENIJI

Kot smo že opisali v 3. poglavju, v Sloveniji v zadnjem desetletju beležimo že konstanten primanjkljaj padavin in posledično tudi nizke pretoke vodotokov. Čeprav nam je sam pojav suše že dokaj znan, nas je ravno ta pogostost sušnih let v zadnjem desetletju spodbudila, da ta pojav podrobneje analiziramo.

Slovenija je bogata z vodnimi viri, k čemur pripomore predvsem velika količina padavin. V Sloveniji pade v povprečju od 800 mm padavin na leto na skrajnem severovzhodu do več kot 3000 mm padavin na zahodu. Prav dejstvo, da smo s povprečno okoli 8.000 m³ vode letno na prebivalca ena najbolj vodnatih držav, ne samo Evrope, ampak tudi sveta, je v preteklosti sprožalo razprave o dejanski ogroženosti zaradi suše (Sušnik, 2013). Vendar podatki kažejo, da je zaradi pomanjkanja padavin in njihove neugodne časovne razporeditve suša problem in predstavlja vse večje tveganje tudi v Sloveniji (Sušnik, 2013).

Hidrološka suša je regionalen pojav in nikoli ne zajame enakomerno cele Slovenije. Avtorji Kobold in sod. (2010) navajajo, da sodijo med hidrološko najbolj suha leta glede na razpoložljiva obdobja podatkov leta 1947 in 1949, nato pa leto 1993 in obdobje 2000-2003, med katerimi je bilo najbolj sušno leto 2003. Med sušna leta spadajo tudi leta 2011, 2012 in 2013. Na ta leta bomo v nadaljnjih izračunih še posebno pozorni in bomo spremljali, kako ti nizi podatkov sušnih let vplivajo na končni izračun. Upadanje pretokov je predvsem posledica upadanja letne količine padavin in porasta povprečne letne temperature zraka ter z njo povezanega večjega izhlapevanja vode. Ob napovedanih podnebnih spremembah se bodo trendi manjšanja pretokov in dolžine hidrološke suše nadaljevali (Sušnik, 2013). Zato moramo biti še toliko bolj pozorni, da so podatki, ki jih v izračunih uporabljamo, temu primerni. 30-letni niz podatkov med leti 1971 in 2000 nam lahko da precej drugačne podatke, kot pa 30-letni niz med leti 1981 in 2010, ali celo 10-letni niz med leti 2001 in 2010.

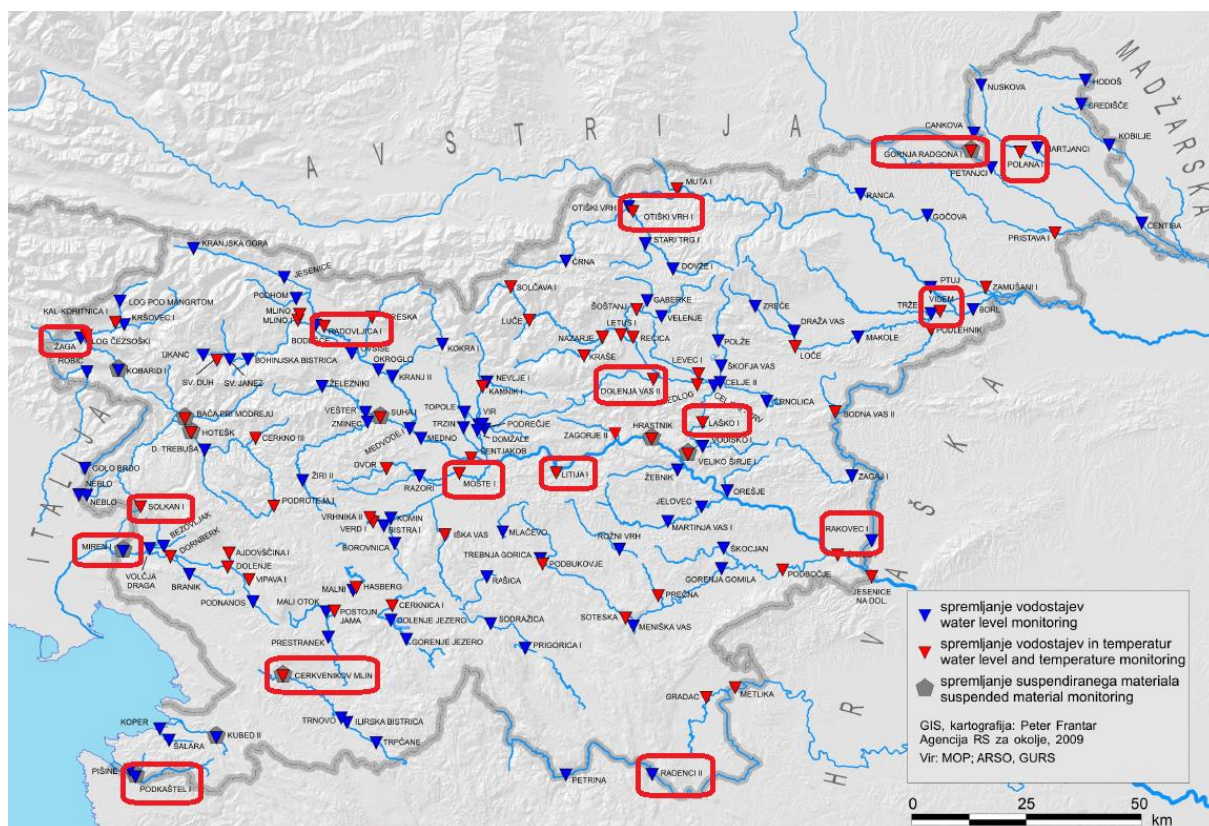
5.1 Podatki

Za osnovni prikaz in izračun kazalcev malih pretokov smo izbrali 16 reprezentativnih vodomernih postaj, ki so označene na sliki 28 in podane v preglednici 1. Izbrali smo vodomerne postaje po vsej Sloveniji, ki najbolje predstavljajo različne režime rek, različne hidrološke značilnosti ter različne geološke značilnosti. Nekaj vodomernih postaj v Sloveniji ima nize podatkov tudi preko 100 let. Ker pa je trend padavin in posledično tudi pretokov v zadnjem desetletju precej upadel (Kobold in sod,

2011), bi bilo kazalce malih pretokov smiselno izračunati posebej tudi za obdobje zadnjih 10 let (2001–2010).

Preglednica 1: Reprezentativne vodomerne postaje z osnovnimi značilnostmi (ARSO, 2013)

Šifra postaje	Vodomerne postaje	Reka	Stacionaža	Zaledje (km ²)	Zem. dolžina	Zem. širina	Kota "0"	Dolžina niza (v letih)
1060	GORNJA RADGONA I	MURA	106.64	10197.20	15.995588	46.681139	202.338	82
1220	POLANA I	LEDAVA	44.33	208.21	16.137677	46.677743	191.399	50
2250	OTIŠKI VRH I	MEŽA	1.35	550.89	15.025975	46.577748	333.966	59
2652	VIDEM	DRAVINJA	4.16	764.00	15.903184	46.368183	209.044	66
3420	RADOVLJICA I	SAVA	900.95	907.97	14.165358	46.340032	408.086	59
3660	LITIJA	SAVA	818.15	4821.80	14.829075	46.056917	230.618	117
4740	RAKOVEC I	SOTLA	8.07	559.99	15.705203	45.920872	139.210	47
4850	RADENCI II	KOLPA	238.24	1191.00	15.091856	45.464742	175.246	56
5078	MOSTE I	LJUBLJANICA	11.83	1762.32	14.544434	46.055416	281.293	60
6200	LAŠKO I	SAVINJA	14.34	1663.60	15.233556	46.153968	215.025	105
6550	DOLENJA VAS II	BOLSKA	2.23	169.50	15.095175	46.238880	267.185	50
8180	SOLKAN I	SOČA	1.60	1572.80	13.655261	45.981574	51.844	84
8270	ŽAGA	UČJA	0.57	50.21	13.477775	46.309787	341.551	58
8601	MIREN I	VIPAVA	2.42	589.97	13.607926	45.894092	35.933	62
9050	CERKVENIKOV MLIN	REKA	7.95	377.89	14.060992	45.654718	341.716	60
9300	PODKAŠTEL I	DRAGONJA	6.46	92.71	13.654386	45.452602	5.860	25



Slika 28: Izbrane vodomerne postaje za izračun sušnih kazalcev (podloga: Hidrološki letopis Slovenije 2008, 2011: str 166)

5.1.1 Razvrstitev vodotokov

V prejšnjem poglavju (5.1) smo omenili, da smo si izbrali različne vodotoke po vsej Sloveniji, ki najbolj reprezentativno opisujejo posamezna slovenska porečja. Ker pa je teh dejavnikov veliko, bomo najprej predstavili 4 različne možnosti razvrščanja vodotokov, potem pa skupno določili ustrezne skupine.

5.1.1.1 Hidrološke značilnosti

Nihanja med malimi, srednjimi in visokimi vodami so velika in značilna za večino naših vodotokov, kar jim poudarja hudourniške poteze. Le pri kraških vodotokih, kjer so vode zadrževane, so ta nihanja manjša (Kolbezen in Pristov, 1998).

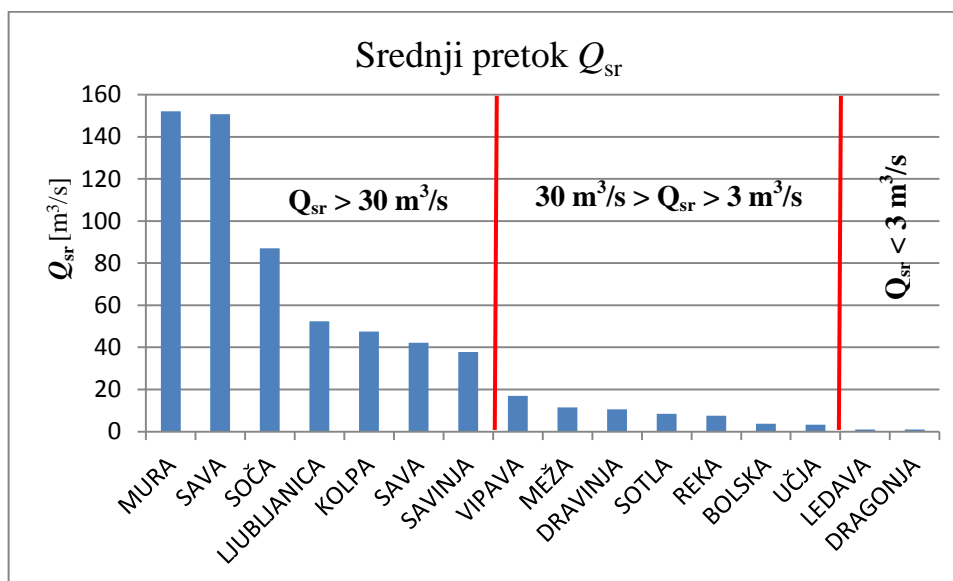
Prva možnost deljenja izbranih vodotokov glede na hidrološke značilnosti je glede na srednji pretok Q_{sr} v izbranem 30-letnem obdobju med leti 1981–2010. Vodotoke smo razdelili v tri skupine. Prva skupina so vodotoki, ki imajo Q_{sr} večji od $30 \text{ m}^3/\text{s}$. Druga skupina so vodotoki, ki imajo Q_{sr} med 30 in $3 \text{ m}^3/\text{s}$, tretja skupina pa vodotoki, ki imajo Q_{sr} manjši od $3 \text{ m}^3/\text{s}$ (preglednica 2).

Takšen kriterij razdelitve pretokov smo si zbrali, ker smo nekako morali ločiti posamezne vodotoke po skupinah, katerim bomo lahko pripisali skupne kazalce malih pretokov. Če bomo videli, da naša izbira ni bila najustreznejša, jo bomo naknadno še spremenili.

Preglednica 2: Razvrščanje vodotokov glede na srednji pretok Q_{sr} v izbranem 30-letnem obdobju 1981–2010

	vodomerna postaja	reka	$Q_{sr} [\text{m}^3/\text{s}]$
$Q_{sr} > 30 \text{ m}^3/\text{s}$	GORNJA RADGONA I	MURA	152.19
	LITIJA	SAVA	150.80
	SOLKAN I	SOČA	86.98
	MOSTE I	LJUBLJANICA	52.32
	RADENCI II	KOLPA	47.54
	RADOVLJICA I	SAVA	42.14
	LAŠKO I	SAVINJA	37.82
$30 \text{ m}^3/\text{s} > Q_{sr} > 3 \text{ m}^3/\text{s}$	MIREN I	VIPAVA	16.94
	OTIŠKI VRH I	MEŽA	11.48
	VIDEM	DRAVINJA	10.54
	RAKOVEC I	SOTLA	8.51
	CERKVENIKOV MLIN	REKA	7.51
	DOLENJA VAS II	BOLSKA	3.71
	ŽAGA	UČJA	3.23
$Q_{sr} < 3 \text{ m}^3/\text{s}$	POLANA I	LEDAVA	1.04
	PODKAŠTEL I	DRAGONJA	0.97

Na sliki 29 vidimo izrazit trend po katerem smo razdelili naše izbrane vodotoke.



Slika 29: Srednji pretok za izbrane vodotoke

Druga možnost deljenja izbranih vodotokov glede na hidrološke značilnosti pa je glede na razmerje pretokov med malimi, srednjimi in velikimi pretoki v 30-letnem obdobju 1981–2010. Vodotoke smo prav tako razdelili v tri skupine. V prvo skupino smo razvrstili vodotoke, ki imajo razmerje med najmanjšimi in največjimi pretoki manjše od 1:300. V drugo skupino vodotoke z razmerjem med 1:300 in 1:1000 ter vtretjo skupino vodotoke z razmerjem med najmanjšim in največjim pretokom večjim od 1:1000 (preglednica 3).

Preglednica 3: Razvrščanje vodotokov glede na razmerje pretokov $Q_{min}:Q_{maks}$ v izbranem 30-letnem obdobju 1981–2010

	vodomerna postaja	reka	Q_{min} [m^3/s]	Q_{sr} [m^3/s]	Q_{maks} [m^3/s]	razmerje
$Q_{min}:Q_{maks} < 1:300$	GORNJA RADGONA I	MURA	43.12	152.19	1236.63	1:4:29
	LITIJA	SAVA	28.66	150.80	1747.99	1:5:61
	MOSTE I	LJUBLJANICA	4.10	52.32	343.77	1:13:84
	OTIŠKI VRH I	MEŽA	2.17	11.48	214.00	1:5:99
	RADOVLJICA I	SAVA	5.56	42.14	635.84	1:8:114
	SOLKAN I	SOČA	9.60	86.98	1870.78	1:9:195
	RADENCI II	KOLPA	3.50	47.54	744.44	1:14:213
	ŽAGA	UČJA	0.36	3.23	90.80	1:9:253
	LAŠKO I	SAVINJA	3.74	37.82	1025.46	1:10:274
	MIREN I	VIPAVA	1.20	16.94	341.34	1:14:284

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 3

1:300 $Q_{\min} < Q_{\max}$ $< 1:1000$	VIDEM	DRAVINJA	0.48	10.54	293.84	1:22:612
	RAKOVEC I	SOTLA	0.34	8.51	235.34	1:25:698
	DOLENJA VAS II	BOLSKA	0.17	3.71	132.00	1:22:767
	CERKVENIKOV MLIN	REKA	0.23	7.51	202.00	1:33:878
$Q_{\min} < Q_{\max}$ 1:1000	POLANA I	LEDAVA	0.002	1.04	44.75	1:519:22373
	PODKAŠTEL I	DRAGONJA	0.00	0.97	64.70	1:∞:∞

* Reka Dragonja v sušnem obdobju tudi presuši.

5.1.1.2 Razvrstitev vodotokov glede na rečni režim

Rečne režime v Sloveniji smo opisali in predstavili že v poglavju 3.4. V preglednici 4 so izbrani vodotoki razvrščeni glede na 5 glavnih rečnih režimov.

Preglednica 4: Razvrščanje vodotokov glede na rečni režim.

	vodomerna postaja	reka
alpski snežno-dežni režim	GORNJA RADGONA I	MURA
	RADOVLJICA I	SAVA
alpski dežno-snežni režim	LITIJA	SAVA
	SOLKAN I	SOČA
	LAŠKO I	SAVINJA
	OTIŠKI VRH I	MEŽA
	ŽAGA	UČJA
dinarski dežno-snežni režim	RADENCI II	KOLPA
	MOSTE I	LJUBLJANICA
	MIREN I	VIPAVA
	DOLENJA VAS II	BOLSKA
panonski dežno-snežni režim	VIDEM	DRAVINJA
	RAKOVEC I	SOTLA
	POLANA I	LEDAVA
sredozemski dežni režim	CERKVENIKOV MLIN	REKA
	PODKAŠTEL I	DRAGONJA

Rečni režim bi za nadaljnje razvrščanje težko uporabili, saj vidimo, da se režim posamezne reke dolvodno s tokom lahko spreminja. Reke Sava, Soča in Savinja imajo v začetku toka alpski snežno-dežni režim, dolvodno pa se jim režim spremeni v alpski dežno-snežni režim.

5.1.1.3 Razvrstitev vodotokov glede na specifični pretok q

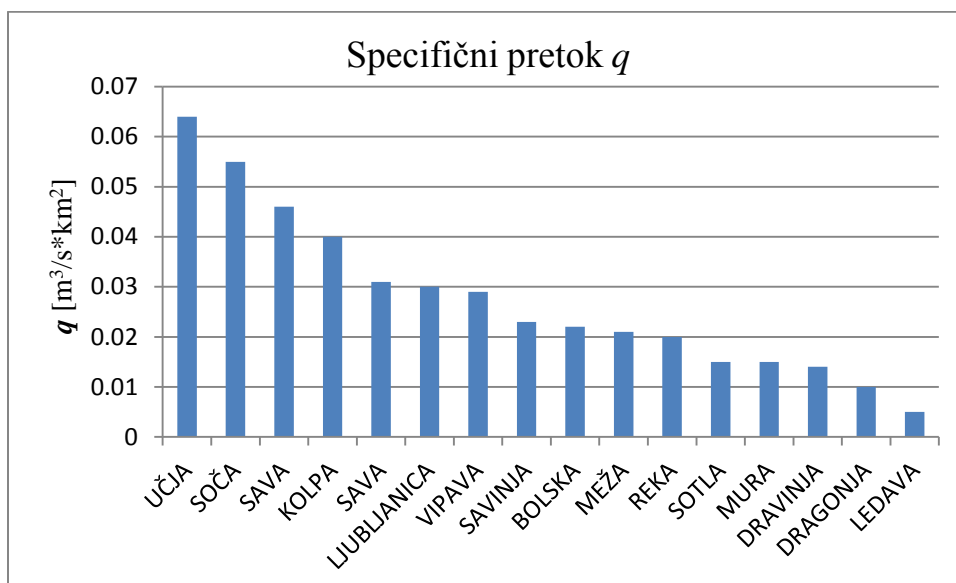
Eden izmed kazalcev za razvrščanje vodotokov po skupinah bi lahko bil tudi specifični pretok q , ki nam poda razmerje med srednjim pretokom Q_s in prispevno površino F .

$$q = \frac{Q}{F}, \quad (6)$$

Preglednica 5: Razvrščanje vodotokov glede na specifični pretok q .

vodomerna postaja	reka	Q_{sr} [m ³ /s]	F [km ²]	q [m ³ /s*km ²]
ŽAGA	UČJA	3.23	50.21	0.064
SOLKAN I	SOČA	86.98	1572.80	0.055
RADOVLJICA I	SAVA	42.14	907.97	0.046
RADENCI II	KOLPA	47.54	1191.00	0.040
LITIJA	SAVA	150.80	4821.80	0.031
MOSTE I	LJUBLJANICA	52.32	1762.32	0.030
MIREN I	VIPAVA	16.94	589.97	0.029
LAŠKO I	SAVINJA	37.82	1663.60	0.023
DOLENJA VAS II	BOLSKA	3.71	169.50	0.022
OTIŠKI VRH I	MEŽA	11.48	550.89	0.021
CERKVENIKOV MLIN	REKA	7.51	377.89	0.020
RAKOVEC I	SOTLA	8.51	559.99	0.015
GORNJA RADGONA I	MURA	152.19	10197.20	0.015
VIDEM	DRAVINJA	10.54	764.00	0.014
PODKAŠTEL I	DRAGONJA	0.97	92.71	0.010
POLANA I	LEDAVA	1.04	208.21	0.005

Pri razvrščanju po specifičnem pretoku q vidimo (slika 30), da nam ne kaže nobenega izrazitega trenda, kot smo to lahko opazili pri razvrščanju po srednjem pretoku q_{sr} (slika 29).

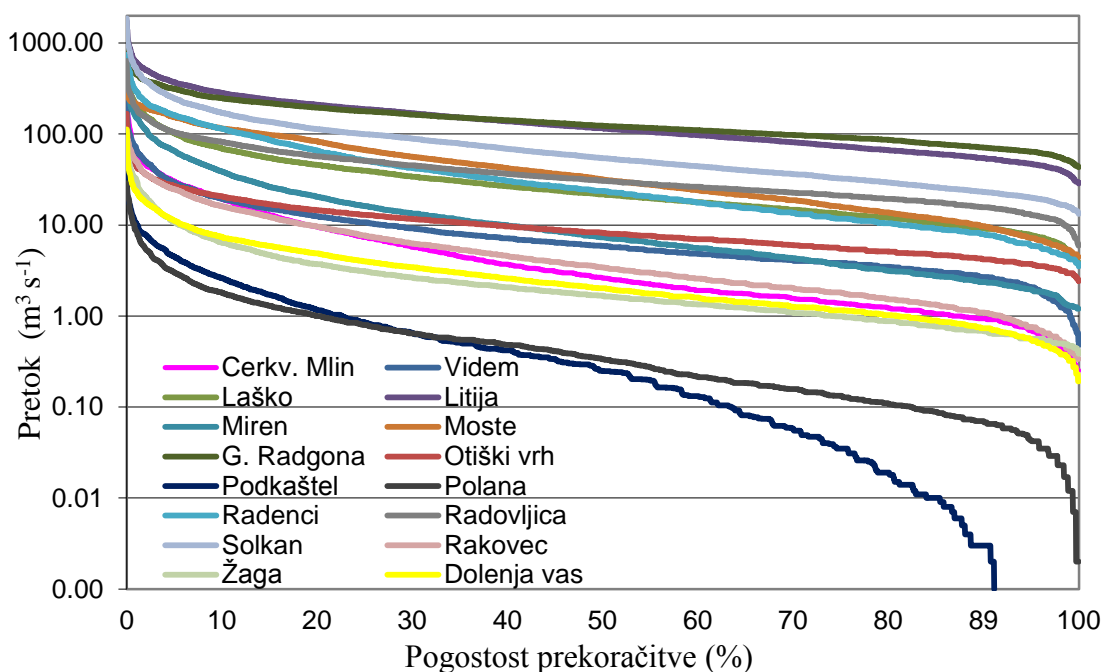


Slika 30: Specifični pretok za izbrane vodotoke

5.2 Določitev percentilov iz krivulje trajanja pretokov

V nadaljnjih izračunih smo računali percentile iz krivulj trajanja pretokov ter letne minimume. Za vhodne podatke smo uporabili srednje dnevne pretoke, zato je tudi prav, da je to glavno merilo za razvrščanje. Vodotoke smo tako razvrstili glede na srednji pretok, kot je opisano v poglavju 5.1.1.1

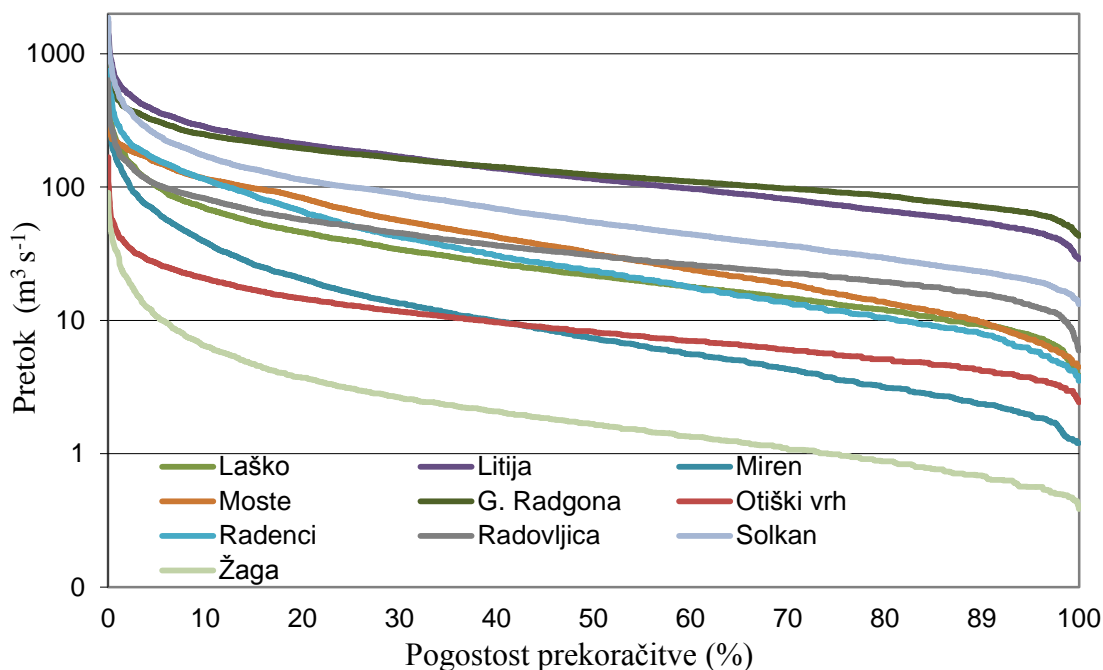
Za lažjo primerjavo smo za vseh 16 obravnavanih vodomernih postaj izrisali krivulje trajanja pretokov na en graf (slika 31) z enakim 10-letnim obdobjem meritev (2001–2010). Podobno, kot smo razvrstili vodotoke po skupinah glede na srednje pretoke, vidimo tudi na sliki 31, da izstopata krivulji trajanja pretokov za razred, kjer je $Q_{sr} < 3 \text{ m}^3/\text{s}$ (Podkaštel in Polana). Prav tako izstopata krivulji za vodomerni postaji Gornja Radgona in Litija, ki imata srednji pretok Q_{sr} večji od $150 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 31: Krivulje trajanja pretokov za 16 obravnavanih vodomernih postaj za 10-letno obdobje (2001–2010)

Pri krivuljah trajanja pretokov pa ni samo velikost tista, ki vpliva na obliko krivulje, ampak tudi razmerje pretokov, ki smo ga predstavili v preglednici 3.

Na sliki 32 vidimo, da ima skupina, pri kateri je razmerje med minimalnimi in maksimalnimi pretoki $Q_{\min}:Q_{\max} < 1:300$, zelo položne krivulje. Tu še najbolj izstopa vodomerna postaja Gornja Radgona na reki Muri, kjer je razmerje med minimalnim in maksimalnim pretokom le 1:30. Čeprav ima reka Mura na vodomerni postaji Gornja Radgona maksimalni pretok za kar $500 \text{ m}^3/\text{s}$ manjši od reke Save na vodomerni postaji Litija, je minimalni pretok skoraj 2-krat večji. Ravno ta položnost krivulje omogoča, da lahko izberemo percentil za določitev sušnega praga precej visoko, Q_{95} ali celo Q_{97} .



Slika 32: Krivulje trajanja pretokov za vodotoke, ki imajo razmerje med najmanjšimi in največjimi pretoki $Q_{\min}:Q_{\max} < 1:300$

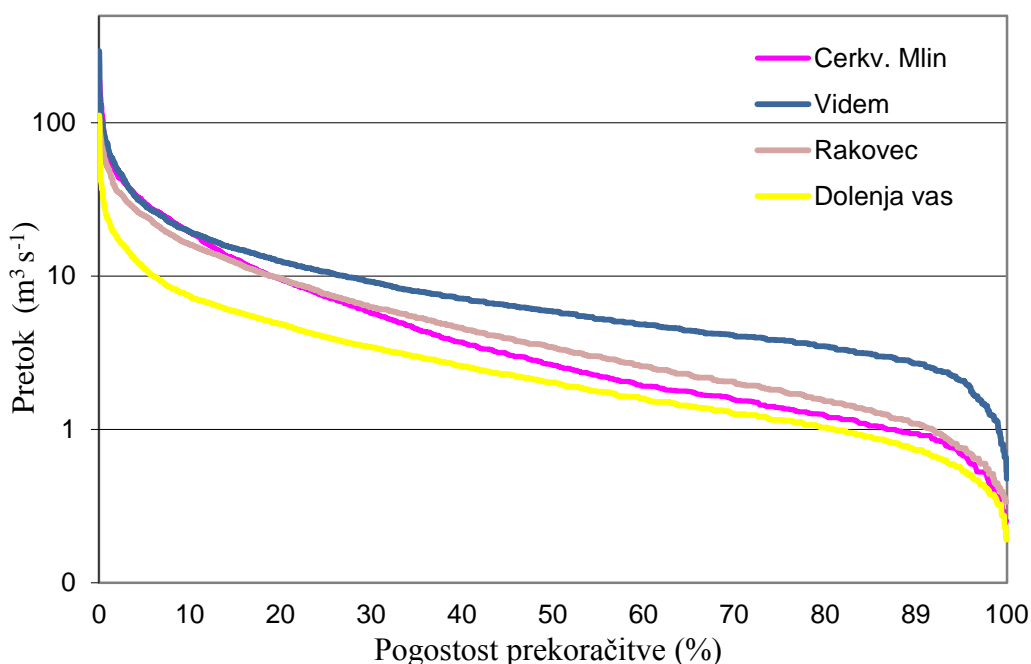
Razlogov, da imajo nekateri vodotoki bolj položne krivulje od drugih, pa je več. Prvi je zagotovo geološki. Na porečju reke Mure prevladujejo neprepustni laporji in peščene glinice z vložki meljastega peska (Kolbezen in Pristov 1998), kar zagotovo preprečuje počasnejše pronicanje vode skozi rečno dno tudi v sušnem času. Tudi pri drugih porečjih v tej skupini se pogosto pojavljajo pri zgradbi površja manj prepustni skrilavci, tufi ter peščenjaki in glinice (Kolbezen in Pristov, 1998).

Vpliv na obliko krivulj trajanja pretokov ima zagotovo tudi rečni režim, saj vidimo, da so v tej skupini skoraj vsi vodotoki z alpskim snežno-dežnim in alpskim dežno-snežnim režimom. Za ta dva režima, predvsem za alpski snežno-dežni režim je značilno, da se vodotoki napajajo v sušnih mesecih tudi z zalogami v obliki snega, kar posledično zmanjša velike razlike med minimalnimi in maksimalnimi pretoki.

Določen vpliv na razporeditev pretokov posameznih vodotokov pa ima tudi človek s svojimi fizičnimi posegi. To so vodotoki, ki imajo spremenjene hidrološke in morfološke značilnosti glede na naravne razmere. To so predvsem zaježitve, ki s svojim delovanjem omilijo visokovodne konice, saj se lahko akumulacije izpraznijo glede na opozorila še preden nastopijo visoke vode in se jih potem del zadrži.

Takšen primer je na pritoku reke Bolske, na reki Trnavci, kjer je zgrajen zadrževalnik za namen namakanja. V primeru opozoril ARSO na nevarnost visokih voda, akumulacijo preventivno izpraznijo in potem vodo postopoma spuščajo nazaj v vodotok v času, ko se padavine umirijo. Takšni posegi imajo velik vpliv na končno obliko krivulje trajanja pretokov.

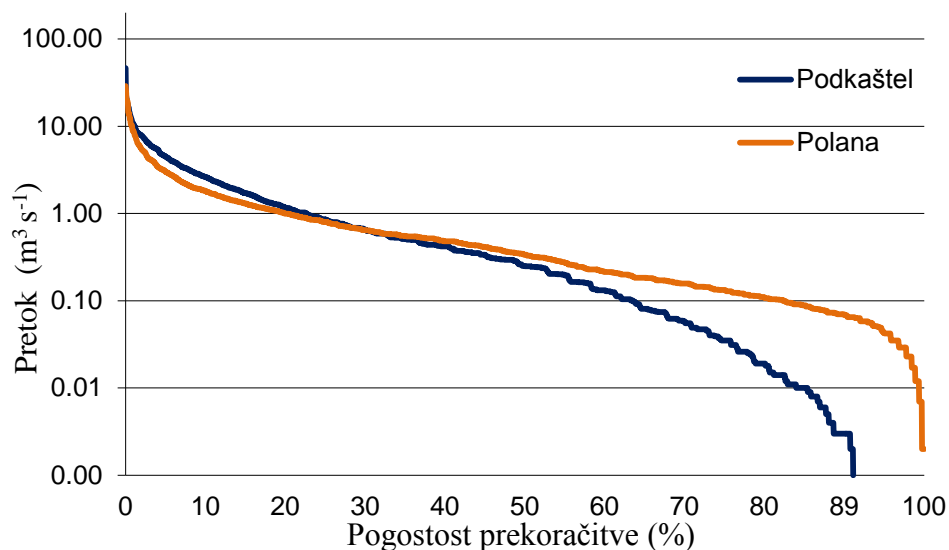
Vodotoki, ki smo jih razvrstili v drugo skupino, kjer je razmerje med najmanjšimi in največjimi pretoki $1:300 < Q_{\min}:Q_{\max} < 1:1000$, so prikazani na sliki 33.



Slika 33: Krivulje trajanja pretokov za vodotoke, ki imajo razmerje med najmanjšimi in največjimi pretoki $1:300 < Q_{\min}:Q_{\max} < 1:1000$

Pri tej skupini je trend malo bolj izrazit in je razlika med začetkom in koncem krivulje precej večja. To razliko bomo morali upoštevati tudi pri določanju percentilov. Pri tem razredu bi nam percentil Q_{95} , kot smo ga izbrali za prejšnji razred, zagotovo postavil sušni prag prenizko in bi bili pretoki, jih imamo za sušne, le stežka doseženi. Zato bo bolje, da se za to skupino predlaga percentil Q_{90} . Bomo pa v nadaljevanju tudi s korelacijskimi matrikami z drugimi metodami določili najustreznejši prag.

V zadnjo skupino pa spadajo vodotoki, ki imajo razliko med najmanjšimi in največjimi pretoki $Q_{\min}:Q_{\max} > 1:1000$ ter vodotoki, ki v sušnem obdobju presušijo. V tem primeru je še težje postaviti enoten sušni prag za celo skupino. V primeru reke Ledave na vodomerni postaji Polana je še percentil Q_{90} postavljen previsoko, saj je krivulja takrat že v padanju. Zato bi bilo bolje izbrati percentil Q_{80} .



Slika 34: Krivulji trajanja pretokov za reko, ki ima razmerje med najmanjšimi in največjimi pretoki $Q_{\min}:Q_{\max} > 1:1000$ ter reko, ki v sušnem obdobju presuši.

Kriterij, kako pogosto so prekoračeni nični pretoki, nam pomaga določiti reprezentativni percentil. Ker je za reko Dragonjo na vodomerni postaji Podkaštel že percentil Q_{90} skoraj ničen in prav tako Q_{80} , bi bilo smotrno izbrati za reprezentativni percentil Q_{70} , ali še celo nižjega.

Preglednica 6: Značilni percentili za izbrane vodomerne postaje (od Q_{95} do Q_{50})

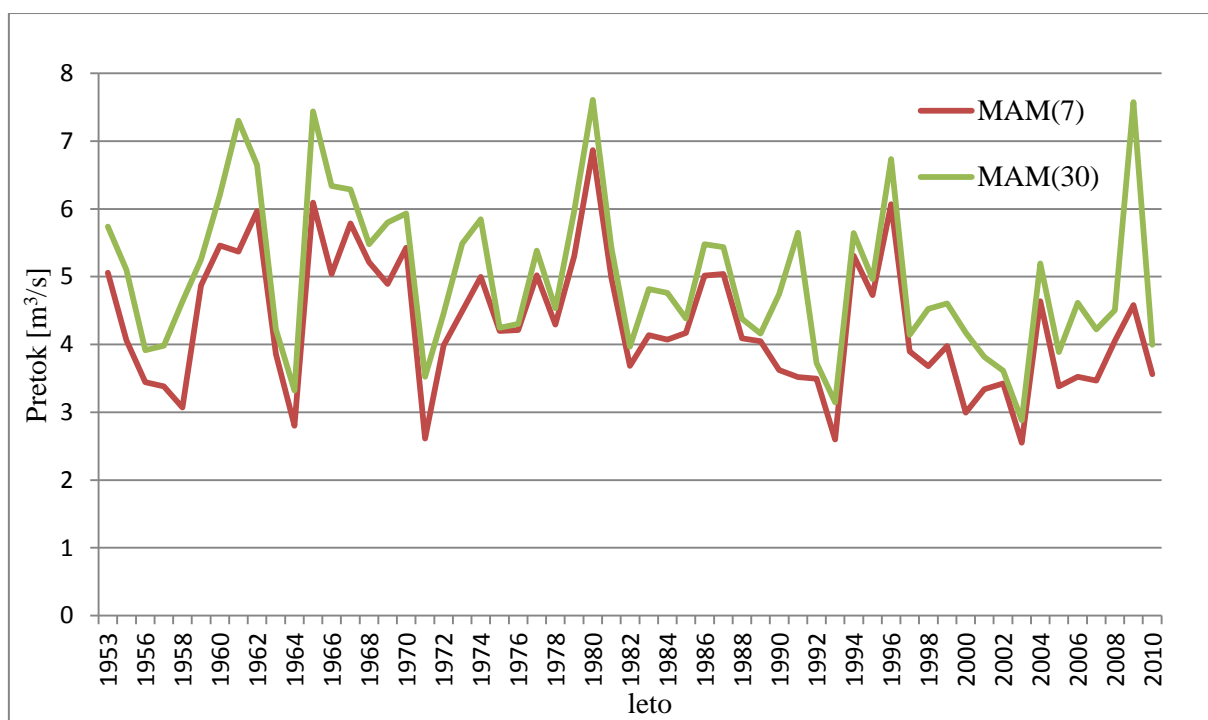
vodomerna postaja	reka	Q_{95} [m ³ /s]	Q_{90} [m ³ /s]	Q_{80} [m ³ /s]	Q_{70} [m ³ /s]	Q_{50} [m ³ /s]
GORNJA RADGONA I	MURA	63.00	71.30	85.70	98.20	129.0
POLANA I	LEDAVA	0.08	0.12	0.21	0.31	0.57
OTIŠKI VRH I	MEŽA	4.18	4.86	5.85	6.77	9.01
VIDEM	DRAVINJA	2.00	2.69	3.74	4.54	6.80
RADOVLJICA I	SAVA	13.90	16.86	21.10	25.40	35.50
LITIJA	SAVA	49.60	58.30	73.82	87.85	124.0
RAKOVEC I	SOTLA	1.00	1.30	1.91	2.45	4.02
RADENCI II	KOLPA	6.82	8.48	11.50	15.20	26.00
MOSTE I	LJUBLJANICA	8.31	11.50	16.80	22.42	37.60
LAŠKO I	SAVINJA	8.47	10.50	13.90	17.60	26.70
DOLENJA VAS II	BOLSKA	0.65	0.82	1.12	1.43	2.22
SOLKAN I	SOČA	22.30	25.75	33.10	40.34	60.40
ŽAGA	UČJA	0.65	0.77	0.96	1.17	1.74
MIREN I	VIPAVA	2.09	2.68	3.75	5.06	8.42
CERKVENIKOV MLIN	REKA	0.62	0.88	1.26	1.67	3.10
PODKAŠTEL I	DRAGONJA	0.00	0.02	0.06	0.09	0.27

5.3 Določitev kazalcev malih pretokov s pomočjo najmanjšega letnega (srednjega dnevnega) pretoka

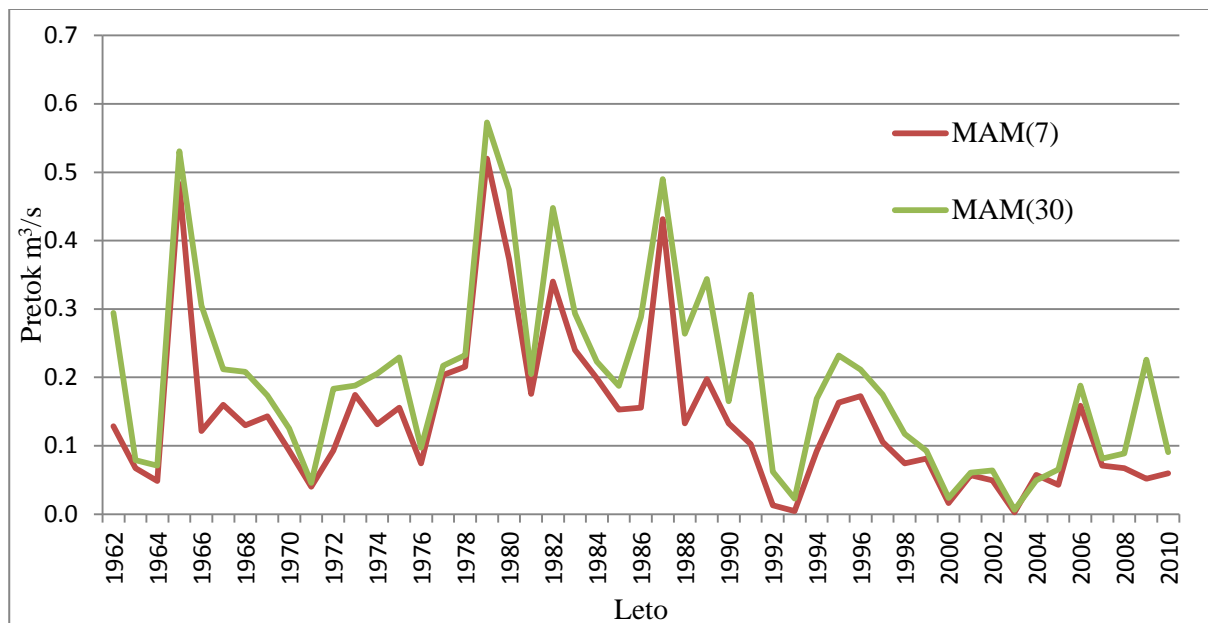
Da smo lažje določili kazalec malega pretoka, smo za vse izbrane vodomerne postaje izračunali kazalec malih pretokov s pomočjo metode za določitev *MAM* (najmanjši letni srednji dnevni pretok).

Kot smo že omenili v poglavju 4.4, se po svetu v ta namen največkrat uporablja 7-dnevni minimalni pretok *MAM(7)*. Vendar pa v naših primerih, kot smo že ugotovili v poglavju 5.2, težko poenotimo en kazalec za vsa porečja, zato smo izračunali tudi večdnevne minimalne pretoke, kot so 30, 60 in 90-dnevni pretok. Tako smo lažje primerjali ta sušni kazalec s kazalcem izračunanim iz krivulje trajanja pretokov in tako natančneje določili prag, pod katerim se pretok smatra za sušni.

Pri tej metodi ne opazimo tako velike razlike med posameznimi vodotoki kot pri krivuljah trajanja pretokov (slike od 35 do 38). Edina razlika, ki se opazi je, da imajo manjši vodotoki bolj izrazite konice letnih minimalnih pretokov, kar je tudi posledica večjih razlik med minimalnimi in maksimalnimi pretoki, kot je prikazano v preglednici 3 (sliki 35 in 36).

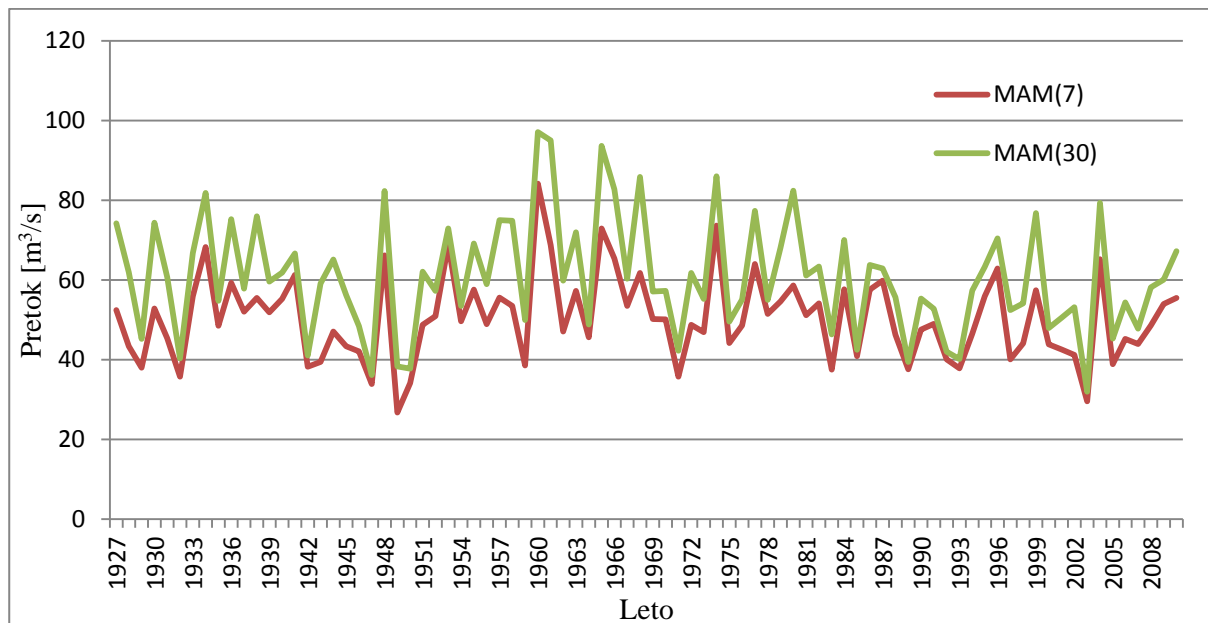


Slika 35: Hidrogram letnih minimalnih n-dnevnih pretokov za vodomerno postajo Otiški vrh na Meži (1953–2010)



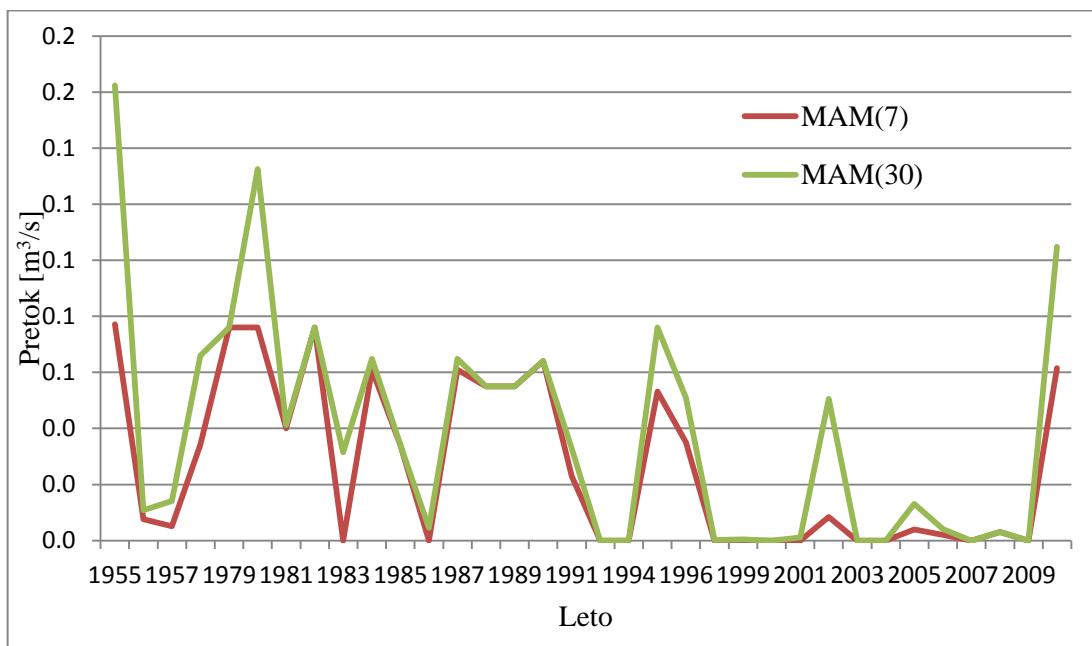
Slika 36: Hidrogram letnih minimalnih n-dnevnih pretokov za vodomerno postajo Polana1 na Ledavi (1962–2010)

Na sliki 37 je prikazan hidrogram letnih minimalnih pretokov za reko Savo. Lahko vidimo, da imajo krivulje nekoliko manj izrazite konice. Trend v zadnjem desetletju (2000–2010) se ne razlikuje bistveno od ostalega niza.



Slika 37: Hidrogram letnih minimalnih n-dnevnih pretokov za vodomerno postajo Litija na Savi (1927–2010)

Enako kot pri metodi določevanja percentilov iz krivulje trajanja pretokov, je tudi hidrogram letnih minimalnih pretokov za reko Dragonjo zelo izrazit. Vendar pa pri tej metodi za razliko od določevanja percentilov, ki temelji na logaritemskem izračunu, lažje izračunamo zeleni sušni kazalec, saj dobimo trivialno rešitev in je manj subjektivnega ocenjevanja (slika 38).



Slika 38: Hidrogram letnih minimalnih n-dnevnih pretokov za vodomerno postajo Podkaštelj na Dragonji (1955–2010)

Preglednica 7: Značilni kazalci malih 1, 7, 30, 60 in 90-dnevnih pretokov (MAM) za izbrane vodomerne postaje

vodomerna postaja	reka	MAM(1) [m ³ /s]	MAM(7) [m ³ /s]	MAM(30) [m ³ /s]	MAM(60) [m ³ /s]	MAM(90) [m ³ /s]
GORNJA RADGONA I	MURA	58.96	62.53	69.06	76.08	71.19
POLANA I	LEDAVA	0.12	0.14	0.20	0.26	0.37
OTIŠKI VRH I	MEŽA	4.04	4.31	4.99	5.78	6.62
VIDEM	DRAVINJA	1.88	2.20	2.92	3.79	3.44
RADOVLJICA I	SAVA	11.66	13.93	16.86	19.86	23.16
LITIJA	SAVA	46.59	50.40	60.74	73.28	86.58
RAKOVEC I	SOTLA	0.89	1.07	1.50	2.16	2.72
RADENCI II	KOLPA	6.21	6.61	8.15	11.31	16.56
MOSTE I	LJUBLJANICA	7.75	9.16	12.19	16.42	21.46
LAŠKO I	SAVINJA	19.68	22.66	27.82	35.97	44.13
DOLENJA VAS II	BOLSKA	0.45	0.51	0.75	0.98	1.21
SOLKAN I	SOČA	19.68	22.66	27.82	35.97	44.13
ŽAGA	UČJA	0.60	0.64	0.82	1.07	1.41
MIREN I	VIPAVA	1.84	2.01	2.72	3.70	5.23
CERKVENIKOV MLIN	REKA	0.59	0.69	0.90	1.20	1.67
PODKAŠTEL I	DRAGONJA	0.02	0.03	0.04	0.06	0.09

6 PRIMERJAVA IN ANALIZA REZULTATOV

Z analizo rezultatov smo poskušali ugotoviti, v kakšni zvezi so kazalci malih pretokov Q_{95} , Q_{90} , Q_{80} ter $MAM(7)$, $MAM(30)$ in $MAM(60)$. Korelacije smo naredili za posamezne skupine in tako skušali poenotiti izbran kazalec za določeno skupino vodotokov s podobnim srednjim pretokom Q_{sr} .

6.1 Korelacija med kazalci malih pretokov

V nadaljevanju so prikazane korelacijske matrike, ki prikazujejo odvisnost med izračunanimi kazalci malih pretokov. Korelacijske matrike smo dobili s pomočjo programa Microsoft Office Excel (*CORRELATION*).

Preglednica 8: Korelacijska matrika kazalcev za vodotoke s srednjim pretokom $Q_{sr} < 3 \text{ m}^3/\text{s}$

	$MAM(7)$	$MAM(30)$	$MAM(60)$	Q_{95}	Q_{90}	Q_{80}
$MAM(7)$	1					
$MAM(30)$	0.9974	1				
$MAM(60)$	0.9996	0.9951	1			
Q_{95}	0.9986	0.9923	0.9987	1		
Q_{90}	0.9976	0.9901	0.9991	0.9989	1	
Q_{80}	0.9981	0.9910	0.9994	0.9981	0.9992	1

Ker smo imeli v skupini vodotokov, kjer je $Q_{sr} < 3 \text{ m}^3/\text{s}$ le dva vodotoka, smo za namen računanja korelacijske matrike izračunali sušne kazalce tudi za vodotok Ščavnica pri vodomerni postaji Pristava, ki ima $Q_{sr} 1,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Iz preglednice 8 je razvidno, da sta si najbolj medsebojno odvisna kazalca Q_{80} in $MAM(60)$, saj ima njun koeficient korelacije R vrednost 0,9994. Prav tako so dobro korelirani nekateri drugi kazalci, vendar smo videli že pri določevanju krivulj trajanja pretokov, da bo za to skupino najprimernejši percentil Q_{80} .

Preglednica 9: Korelacijska matrika kazalcev za vodotoke s srednjim pretokom $3 \text{ m}^3/\text{s} < Q_{sr} < 30 \text{ m}^3/\text{s}$

	$MAM(7)$	$MAM(30)$	$MAM(60)$	Q_{95}	Q_{90}	Q_{80}
$MAM(7)$	1					
$MAM(30)$	0.9955	1				
$MAM(60)$	0.9793	0.9938	1			
Q_{95}	0.9971	0.9921	0.9753	1		
Q_{90}	0.9960	0.9982	0.9891	0.9962	1	
Q_{80}	0.9817	0.9944	0.9976	0.9802	0.9934	1

Tudi pri tej skupini je več kazalcev močno medsebojno odvisnih. Največji koeficient korelacije R pa imata kazalca $MAM(30)$ in Q_{90} , za katerega smo tudi pri krivuljah trajanja pretokov videli, da bo za skupino, ki ima srednje pretoke $3 \text{ m}^3/\text{s} < Q_{sr} < 30 \text{ m}^3/\text{s}$, Q_{90} najbolj primeren.

Percentil Q_{90} je tudi v tuji praksi največkrat uporabljen kazalec za določanje sušnega praga (Tallaksen in van Lanen, 2004). V Združenih državah Amerike pa najpogosteje uporabljajo kazalec malih pretokov $MAM(7)$. Vendar vidimo, da je v našem primeru za vodotoke s srednjimi pretoki ta prag postavljen prenizko.

Preglednica 10: Korelacijska matrika kazalcev za vodotoke s srednjim pretokom $Q_{sr} > 30 \text{ m}^3/\text{s}$

	$MAM(7)$	$MAM(30)$	$MAM(60)$	Q_{95}	Q_{90}	Q_{80}
$MAM(7)$	1					
$MAM(30)$	0.9980	1				
$MAM(60)$	0.9902	0.9968	1			
Q_{95}	0.9998	0.9966	0.9874	1		
Q_{90}	0.9893	0.9882	0.9788	0.9897	1	
Q_{80}	0.9987	0.9994	0.9946	0.9975	0.9870	1

V skupini, kjer je $Q_{sr} > 30 \text{ m}^3/\text{s}$, sta medsebojno najbolj odvisna kazalca $MAM(7)$ in Q_{95} . V tej skupini so vodotoki najbolj primerljivi s tistimi v Združenih državah Amerike. Vidimo, da je zanje res najbolj reprezentativen prag za določitev sušnega pretoka Q_{95} , ki se dobro ujema s kazalcem malih pretokov $MAM(7)$ s korelacijskim koeficientom 0.9998. Za te vodotoke smo že v prejšnjih poglavjih ugotovili, da imajo najmanjšo razliko med najmanjšimi in največjimi pretoki in posledično tudi najbolj položno krivuljo trajanja pretokov.

V preglednici 11 so prikazani izračunani kazalci malih pretokov za obe izbrani metodi (percentili iz krivulje trajanja in najmanjši letni pretok) za vseh 16 izbranih vodomernih postaj ter za vodomerno postajo Pristava na reki Ščavnici, ki smo jo dodali za bolj natančen korelacijski izračun. V preglednici 11 so z rdeče obarvanimi številkami označeni tisti kazalci malih pretokov, ki se statistično najbolj ujemajo z obema izračunanima metodama.

Preglednica 11: Primerjava kazalcev malih pretokov po metodi najmanjšega srednjega dnevnega pretoka in po metodi določevanja percentilov iz krivulje trajanja pretokov za 17 vodomernih postaj v Sloveniji

	ime postaje	NAJMANJŠI LETNI (SR. DNEVNI) PRETOK [m ³ /s]			IZ KRIVULJE TRAJANJA PRETOKOV [m ³ /s]		
		MAM(7)	MAM(30)	MAM(60)	Q ₉₅	Q ₉₀	Q ₈₀
$Q_{sr} < 3m^3/s$	Podkaštel	0.03	0.04	0.06	0.00	0.02	0.06
	Polana	0.13	0.17	0.24	0.08	0.12	0.21
	Pristava	0.27	0.35	0.50	0.21	0.30	0.47
$1:300 < Q_{min} \cdot Q_{maks} < 1:1000$	Miren	2.01	2.72	3.70	2.09	2.68	3.75
	Otiški vrh	4.31	4.99	5.78	4.18	4.86	5.85
	Rakovec	1.07	1.50	2.16	1.00	1.30	1.91
	Videm	2.20	2.92	3.79	2.00	2.69	3.74
	Cerkvenikov mlin	0.69	0.90	1.20	0.62	0.88	1.26
	Dolenja vas	0.51	0.75	0.98	0.64	0.80	1.10
	Žaga	0.64	0.82	1.07	0.65	0.77	0.97
$Q_{sr} > 30m^3/s$	Gornja Radgona	62.53	69.06	76.08	63.00	71.30	85.70
	Litija	50.40	60.74	73.28	49.60	58.30	73.82
	Radovljica	13.93	16.86	19.86	13.90	16.86	21.10
	Laško	8.46	11.49	14.80	8.47	10.40	13.69
	Moste	9.16	12.19	16.42	8.31	11.50	16.80
	Solkan	22.66	27.82	35.97	22.30	25.75	33.10
	Radenci	6.61	8.15	11.31	6.82	8.48	11.50

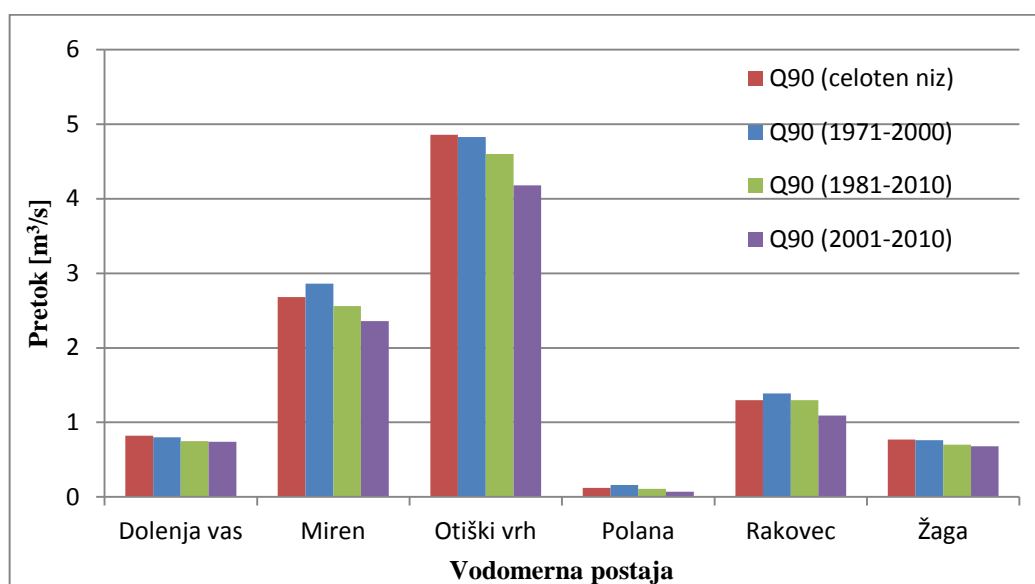
6.2 Vpliv izbranega niza podatkov na končne rezultate

V izračunih smo izbrali celotne nize podatkov, ki so bili zabeleženi na posameznih vodomernih postajah. Zavedamo pa se, da bi bili z izbiro drugačnega niza podatkov tudi rezultati drugačni. Tudi v raziskovalni nalogi Biotehniške fakultete (Pintar 2010), narejene za Ministrstvo za kmetijstvo in okolje, so prišli do podobnih ugotovitev. V njihovi nalogi je obravnavan niz podatkov med leti 1971 in 2000. Omenili so, da bi bilo smiselno upoštevati še zadnje desetletje 2000–2010, ker je bilo v tem obdobju kar nekaj sušnih let. V naših izračunih smo upoštevali tudi zadnje obdobje, vendar v celotnem nizu podatkov tako kratek niz ne pride do posebnega izraza.

Naredili smo primerjavo in analizo rezultatov za celoten niz podatkov, za niz 30 let (1971–2000), ki ga v svoji raziskovalni nalogi upošteva Biotehniška fakulteta (Pintar 2010), niz 30 let (1981–2010) ki ga predlaga Biotehniška fakulteta za izboljšanje natančnosti izračuna (Pintar 2010) in za 10-letni niz (2000–2010), ki ga uporabljajo v Združenih državah Amerike (Tallaksen in van Lanen, 2004) (preglednica 12, slika 39).

Preglednica 12: Primerjava kazalcev malih pretokov izračunanih kot percentili iz krivulje trajanja pretokov za različna časovna obdobja za izbrane vodomerne postaje v Sloveniji. Z rdečo so označeni rezultati vodomernih postaj, ki so predstavljeni na sliki 39.

	celoten niz podatkov [m ³ /s]		30-letni niz (1971–2010) [m ³ /s]		30-letni niz (1981–2000) [m ³ /s]		10-letni niz (2001–2010) [m ³ /s]	
	<i>Q</i> ₉₀	<i>Q</i> ₈₀	<i>Q</i> ₉₀	<i>Q</i> ₈₀	<i>Q</i> ₉₀	<i>Q</i> ₈₀	<i>Q</i> ₉₀	<i>Q</i> ₈₀
Dolenja vas	0.82	1.12	0.80	1.10	0.75	1.05	0.74	1.03
Cerkvenikov mlin	0.88	1.26	0.96	1.28	1.02	1.30	0.94	1.22
Gornja Radgona	71.30	85.70	73.00	86.30	74.23	87.10	70.78	85.97
Laško	10.50	13.90	10.50	13.60	10.10	12.98	9.23	12.05
Litija	58.30	73.82	58.30	72.46	55.20	68.20	54.38	66.34
Miren	2.68	3.75	2.86	3.83	2.56	3.47	2.36	3.13
Moste	11.50	16.80	12.10	17.70	10.67	15.19	9.67	13.64
Otiški vrh	4.86	5.85	4.83	5.78	4.60	5.61	4.18	5.11
Podkaštel	0.020	0.059	/	/	0.015	0.055	0.003	0.018
Polana	0.123	0.210	0.164	0.251	0.110	0.180	0.068	0.107
Radenci	8.48	11.50	8.03	11.00	7.72	10.40	7.85	10.50
Radovljica	16.86	21.10	14.00	18.00	15.17	18.80	15.74	19.36
Rakovec	1.30	1.91	1.39	2.04	1.28	1.88	1.09	1.53
Solkan	25.75	33.10	25.40	32.00	24.12	30.26	23.06	29.35
Videm	2.69	3.74	2.81	3.94	2.76	3.78	2.69	3.47
Žaga	0.77	0.96	0.76	0.95	0.70	0.88	0.68	0.88



Slika 39: Grafični prikaz vpliva različnih časovnih obdobj na percentil Q_{90} iz krivulje trajanja pretokov za izbrane vodomerne postaje

Primerjava percentilov Q_{90} in Q_{80} , izračunanih iz krivulje trajanja pretokov, za celoten niz podatkov ter 30-letni niz (1981–2010), ne kaže velikega odstopanja. Kaže pa se rahel trend upadanja pretokov, saj so percentili za 30-letni niz večinoma manjši od tistih, ki so izračunani iz celotnega niza podatkov. Za računanje sušnega praga je torej očitno bolje vzeti zadnji, krajši niz podatkov.

Do podobne ugotovitve smo prišli, ko smo upoštevali smernice Združenih držav Amerike. Ko smo primerjali kazalce, izračunane za zadnjih 10 let (2001–2010), smo ugotovili, da je na nekaterih vodotokih trend upadanja pretokov zelo opazen in se razlikuje od izračunanih iz 30-letnega niza in tistih iz celotnega niza podatkov. Moramo pa tu poudariti da se celotni nizi podatkov kar precej razlikujejo glede na izbrano vodomerno postajo (preglednica 1).

Zato se tu postavi vprašanje, kateri niz je bolj reprezentativen. Naš predlog je, da bi bilo najbolje v nadaljnjih izračunih uporabljati 10-letni niz podatkov. Podatki o pretokih, padavinah in tudi kmetijski indikatorji kažejo, da se trend števila sušnih let povečuje, čemur smo bili priča tudi v letu 2013. Zato je še toliko bolj smiselno v računih uporabljati nize podatkov za zadnje obdobje, ki ni predolgo, a vseeno zajema reprezentativne podatke.

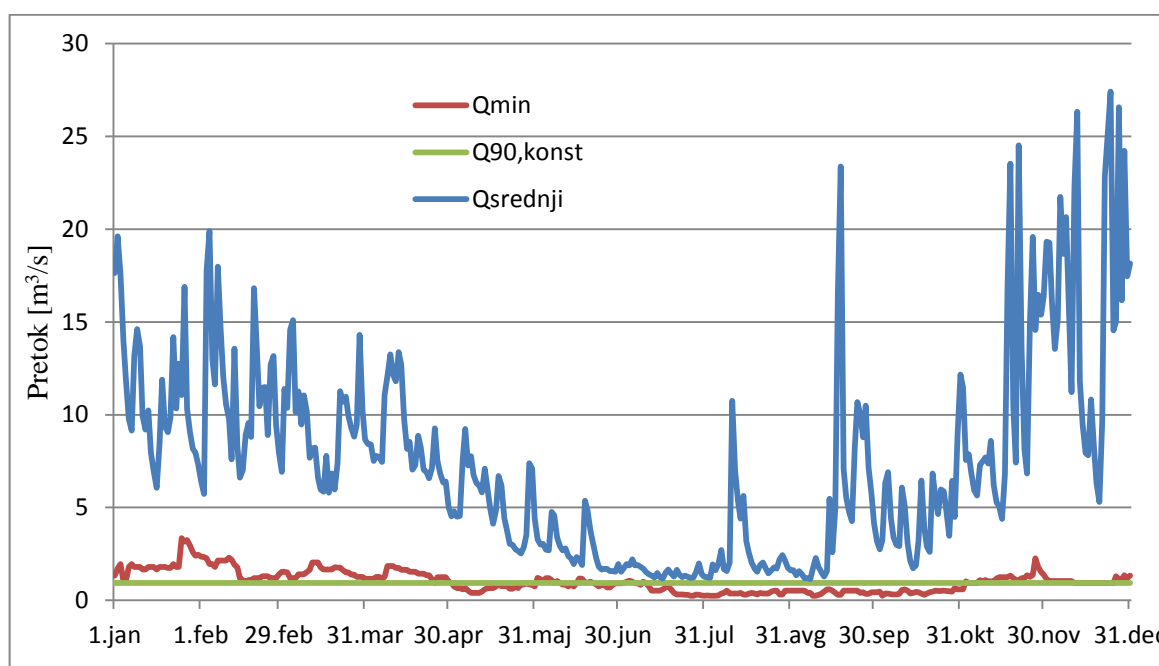
Analizo in primerjavo pa smo naredili tudi med kazalci, izračunanimi za dve različni 30-letni obdobji in zadnje, 10-letno obdobje. Raziskovalna naloga Biotehniške fakultete (Pintar 2010) v svojih izračunih upošteva 30-letni niz, v katerem pa je ravno zadnje 10-letno obdobje izvzeto. Razlika med kazalci malih pretokov se opazi že med obema 30-letnima nizoma, saj vidimo, da so v skoraj vseh primerih percentili izračunani iz 30-letnega niza podatkov obdobja 1981–2010 manjši od tistih izračunani iz 30-letnega niza podatkov obdobja 1971–2000. Pri reki Savi na vodomerni postaji Litija je odstopanje med percentiloma Q_{80} za več kot $4 \text{ m}^3/\text{s}$ (preglednica 12).

Tudi med 10-letnim nizom podatkov (2001–2010) in 30-letnim (1981–2010) je opazno zmanjšanje kazalca malih pretokov. Največja pa je zagotovo razlika med percentili izračunanimi iz 10-letnega (2001–2010) in 30-letnega (1971–2000) niza podatkov. V povprečju so se pretoki izračunani iz 10-letnega obdobja (2001–2010) zmanjšali za 11,6 % v primerjavi s pretoki izračunani iz 30-letnega (1971–2000) niza podatkov. Zato lahko sklenemo, da je 30-letno obdobje (1971–2000) še najmanj reprezentativno za določanje kazalcev malih pretokov.

6.3 Izbira praga

Sedaj, ko smo dokončno določili, kako bomo računali sušni prag, pod katerim se pretok smatra, da je v deficitu, moramo ta prag še prilagoditi posameznemu vodotoku. Kot smo opisali že v poglavju 4.4.1.1, je lahko prag sušnega deficita konstanten, ali pa se skozi leto spreminja (slika 23).

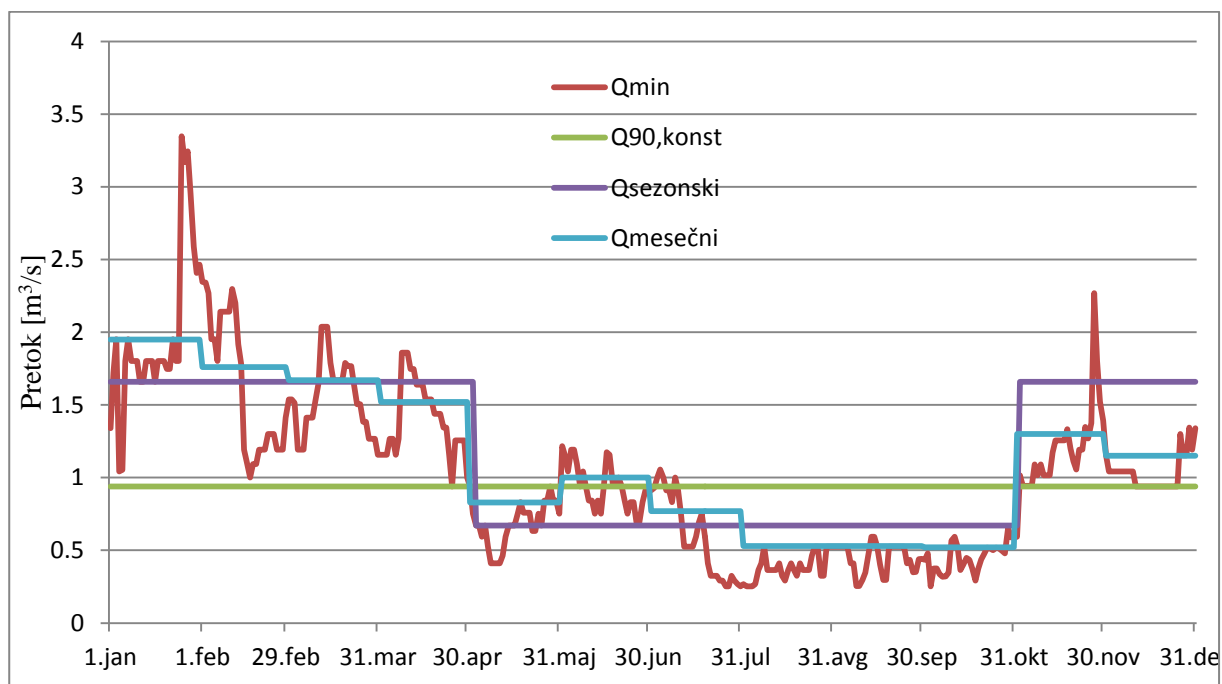
Končni cilj in namen diplomske naloge je zadovoljiti želje in potrebe ARSO, da se ob znanem podatku pretoka, pridobljenega iz avtomatske merilne postaje, lahko takoj določi, ali je dani pretok v deficitu ali ne in se na podlagi tega razglasi hidrološko sušo. Tu je zelo pomembna tudi izbira praga. Na sliki 23a vidimo, da je ena možnost izbira konstantnega praga, ki je za naše prejšnje izračune še najbolj primerna. Tako izračun percentilov iz krivulje trajanja pretokov kot izračun najmanjšega letnega (srednjega dnevnega) pretoka temeljita na nizu podatkov celega leta. Posledično je lahko prag konstanten čez celo leto (slika 40). Verjetno pa je bolj smiselno izbrati sezonski prag, ki posebej obravnava poletno sezono oziroma mesece v namakalnem obdobju, ko je odvzem vode najpomembnejši (maj do september) (slika 41).



Slika 40: Letna krivulja pretokov, izračunana iz srednjih dnevni in minimalnih povprečij 10-letnega niza (2001–2010) za vodomerno postajo Cerkevnikov mlin.

Letno krivuljo pretokov smo izračunali iz enakega 10-letnega niza podatkov (2001–2010) kot ostale kazalce malih pretokov. Za vsak dan smo izračunali povprečni srednji dnevni pretok iz obravnavanega niza 10-ih let. Na sliki 40 vidimo takšen graf za vodomerno postajo Cerkevnikov mlin. Zrisane so krivulje srednjih dnevni pretokov in minimalnih dnevni pretokov. Za potrebe ARSO pri vrednotenju tekočih dnevni pretokov je to najprimernejši prikaz, vendar bomo v nadaljnjih grafikonih srednje dnevne pretoke izločili zaradi boljšega pregleda sušnih pragov.

Slika 41 prikazuje letno krivuljo pretokov, ki je izračunana iz dnevni minimalni povprečij. Poleg tega so dodani trije različni tipi sušni pragov: konstantni, sezonski in mesečni. Poiskati moramo tisti sušni prag, ki se najboljše ujema z dano krivuljo pretokov. Sušne prage smo računali s pomočjo programske opreme MS Excel. Najprej v program vnesemo podatke o pretokih za obravnavani niz, jih rangiramo in potem za vsak podatek posebej izračunamo pogostost prekoračitve. Ko dobimo vse te rezultate, lahko konstruiramo krivuljo trajanja pretokov in odčitamo želeni percentil. Če računamo konstantni prag, lahko vse podatke računamo združeno, medtem ko si moramo za sezonski in mesečni sušni prag podatke ustrezno urediti in za vsak niz podatkov izrisati krivuljo trajanja pretokov in iz nje odčitati ustrezen percentil.



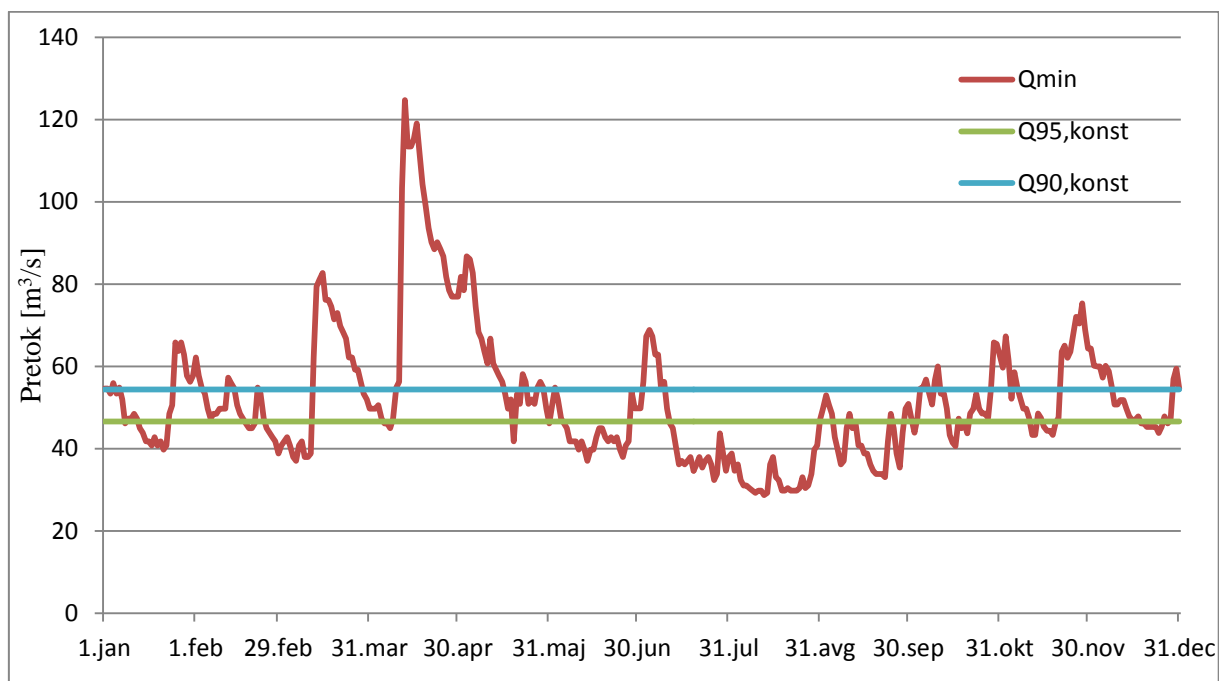
Slika 41: Letna krivulja pretokov izračunana iz dnevni minimalnih povprečij 10-letnega niza (2001–2010) za vodomerno postajo Cerkevnikov mlin.

Kot smo že ugotovili, zajame konstanten sušni prag pretoke skozi celo leto in nam za najbolj sušne mesece ne daje prave slike. Bolj natančen je zagotovo sezonski sušni prag, ki posebej zajame najbolj sušne mesece, ko je tudi potreba po namakanju največja. Ker smo ugotovili, da se tudi med posameznimi sušnimi meseci pojavljajo anomalije, smo izračunali še mesečni sušni prag, ki je zagotovo najbolj točen in se najbolje ujema z dano letno krivuljo pretokov (slika 41).

Pri izračunu korelacijske matrike smo opazili, da je za vodomerno postajo Litija na reki Savi (preglednica 13) bolj primeren kazalec malih pretokov percentil Q_{90} , kot pa percentil Q_{95} .

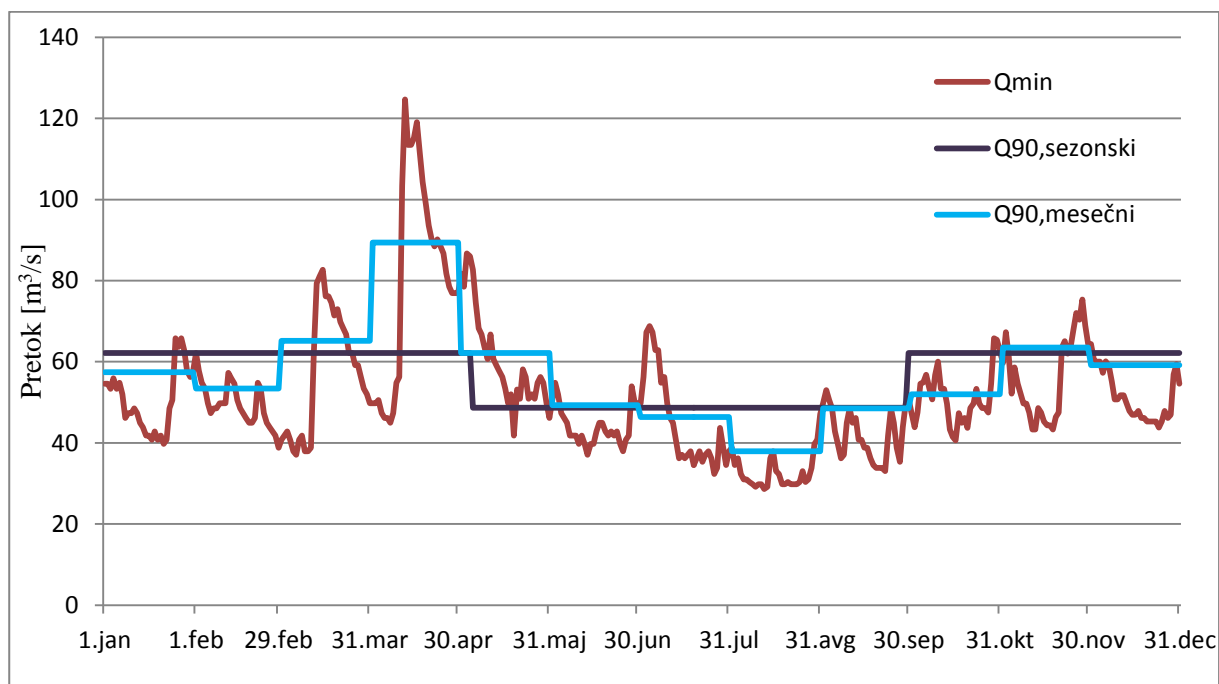
Preglednica 13: Korelacijska matrika kazalcev malih pretokov za reko Savo, pri vodomerni postaji Litija za 10-letno obdobje (2001–2010).

	Q_{95}	Q_{90}	Q_{80}	$MAM(7)$	$MAM(30)$	$MAM(60)$
Q_{95}	1					
Q_{90}	0.96	1				
Q_{80}	0.89	0.97	1			
$MAM(7)$	0.97	0.97	0.93	1		
$MAM(30)$	0.96	0.99	0.94	0.98	1	
$MAM(60)$	0.94	0.92	0.89	0.96	0.93	1



Slika 42: Letna krivulja pretokov izračunana iz dnevni minimalnih povprečij 10-letnega niza (2001–2010) za vodomerno postajo Litija s konstantnima sušima pragoma Q_{95} in Q_{90} .

Prav tako smo za vodomerno postajo Litija na reki Savi ugotovili, da je najprimernejši mesečni sušni prag. Iz slike 43 so razvidne velike razlike med mesečnimi nihanji minimalnih pretokov, kar je razlog, da sezonski prag ne opiše najboljše krivulje minimalnih pretokov. Mesec avgust ima npr. sušni prag ($37,93\text{m}^3/\text{s}$) za skoraj $10\text{ m}^3/\text{s}$ nižji od sosednjih mesecev (julij $46,37\text{ m}^3/\text{s}$ in september $48,50\text{ m}^3/\text{s}$). Velika pa je razlika tudi med ostalimi meseci, ki smo jih s sezonskim pragom obravnavali skupaj. Mesec april ($89,4\text{ m}^3/\text{s}$) ima za kar $36\text{ m}^3/\text{s}$ višji prag kot februar ($53,4\text{ m}^3/\text{s}$).



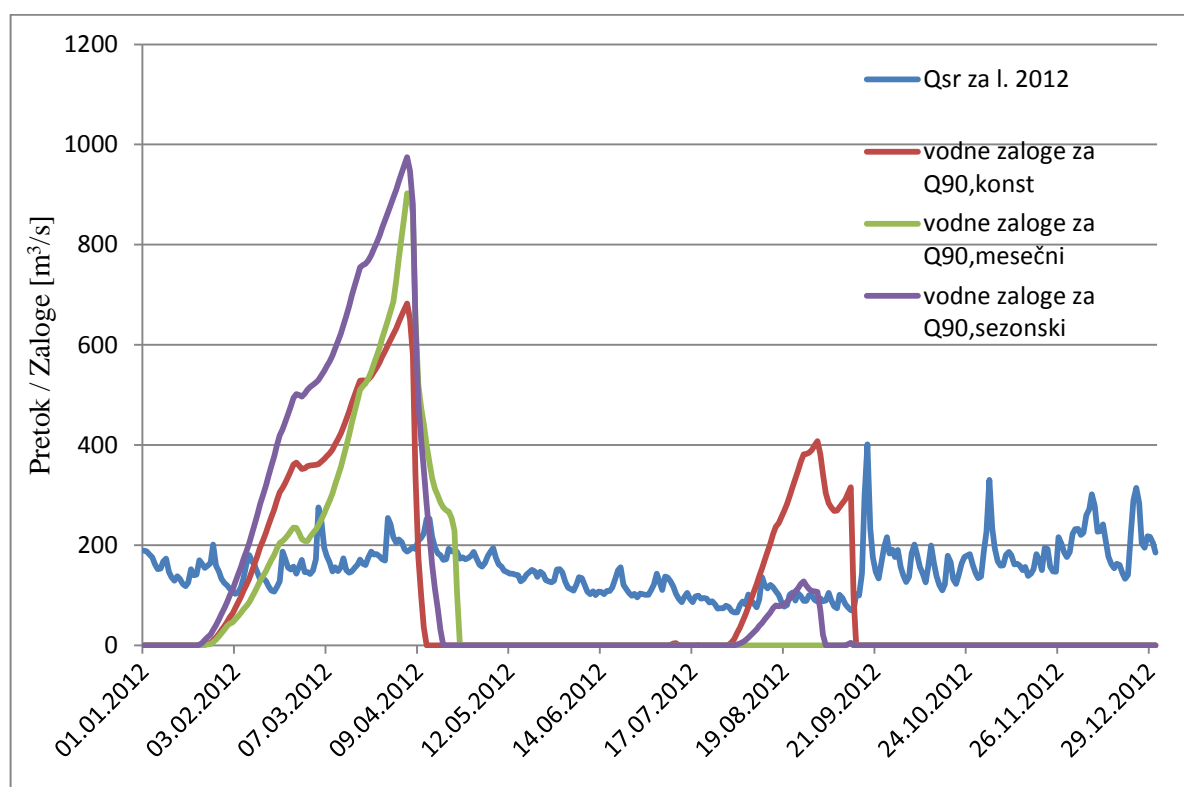
Slika 43: Letna krivulja pretokov izračunana iz dnevni minimalnih povprečij 10-letnega niza (2001–2010) za vodomerno postajo Litija, z mesečnim in sezonskim sušnim pragom.

6.4 Določitev začetka in konca sušnega obdobja

Do sedaj smo samo določili, kdaj nastopi mali (sušni) pretok, še vedno pa nismo ugotovili, kdaj nastopi hidrološka suša. To bomo določili s pomočjo algoritma zaporednih konic, kot je prikazano v poglavju 4.5.2.

Z razliko od določevanja sušnega praga, kjer smo za računanje uporabili daljše časovno obdobje npr. 10 let, bomo pri tej metodi za vhodne podatke vzeli samo obravnavano leto oziroma krajše obdobje. Vodni deficit oziroma potrebne vodne zaloge računamo na trenutnih pretokih in ne kot večletno povprečje.

V programsko orodje MS Excel vnesemo podatke o srednjih dnevni pretokih za obravnavano leto in s pomočjo določenega sušnega praga, ki smo ga izračunali v prejšnjem poglavju (6.3) in enačb predstavljenih v poglavju 4.3.2.1, izračunamo zaloge, ki bi bile potrebne, da bi bila hidrološka suša preprečena (slika 44).



Slika 44: Srednji dnevni pretok in vodne zaloge, ki bi bile potrebne, da bi bila hidrološka suša preprečena, za leto 2012 na reki Savi za vodomerno postajo Litija, za različne sušne pragove

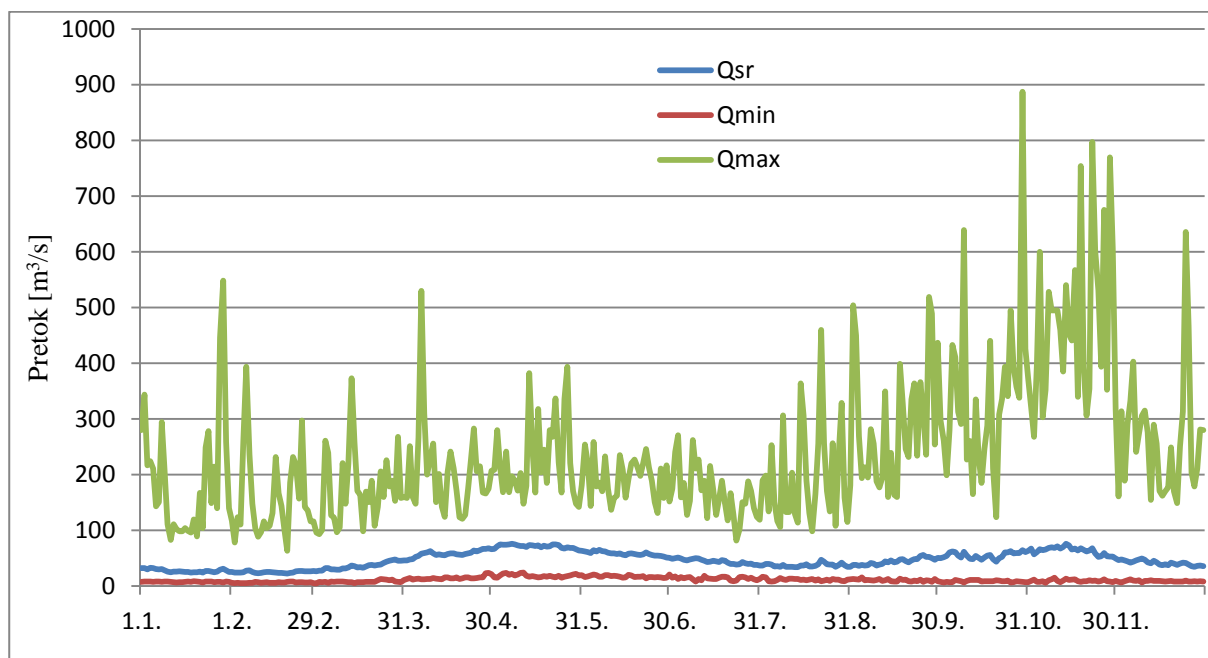
Na sliki 44 vidimo, da ima tudi pri računu potrebnih vodnih zalog izbira ustreznega praga velik pomen na končne rezultate. Pri konstantnem in pri sezonskem sušnem pragu se nam v letu 2012 na reki Savi pri vodomerni postaji Litija pojavita dve letni hidrološki suši, medtem ko pri mesečnem sušnem pragu le ena. Je pa ta bolj izrazita, ker je mesečni sušni prag za zimske in pomladne mesece postavljen nižje, kot pri konstantnem sušnem pragu.

Hidrološka suša se začne, ko začne krivulja potrebnih vodnih zalog rasti. Z vrhom krivulje doseže hidrološka suša največjo intenziteto. Padanje krivulje potrebnih vodnih zalog, lahko označimo za zmanjševanje hidrološke suše. Ko pa krivulja zopet doseže abscisno os, pa lahko govorimo o koncu hidrološke suše.

7 UGOTOVITVE, SMERNICE IN PREDLOGI ZA SPROTNO SPREMLJANJE IN VREDNOTENJE HIDROLOŠKE SUŠE

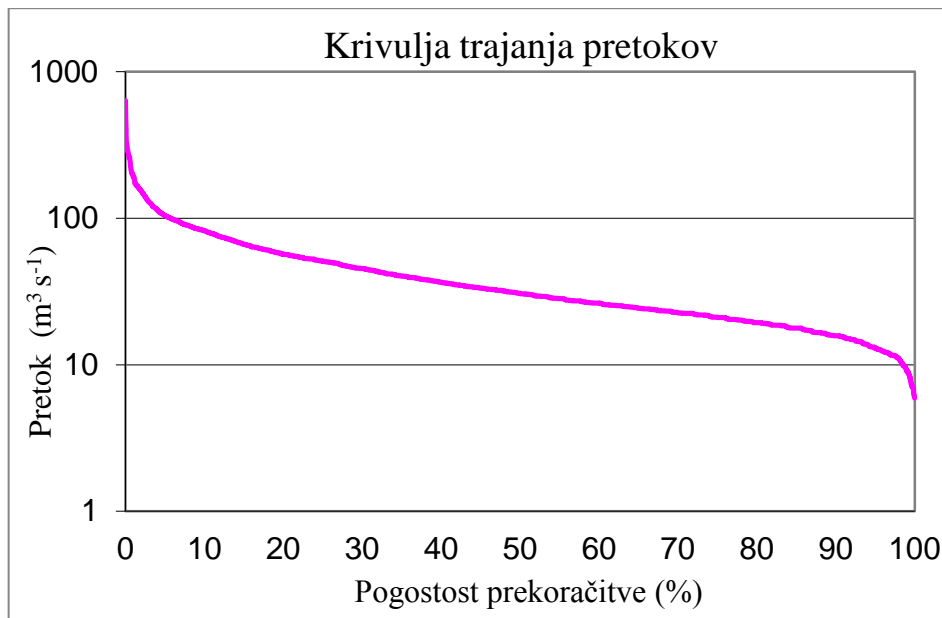
Tako za potrebe ARSO kot za ostale, ki bodo določali sušne pretoke na podlagi vseh izdelanih analiz in primerjav, podajamo predlog postopka za izračun in določitev sušnega praga. Metodologija ima več korakov:

1. Za vse dni v letu izrišemo krivulje srednjih, maksimalnih in minimalnih letnih pretokov, izračunanih iz niza podatkov za zadnjih 10 let (v našem primeru od leta 2001 do 2010) (slika 45).



Slika 45: Srednji, minimalni in maksimalni letni pretoki, za vodomerno postajo Radovljica I na reki Savi

2. Izrišemo krivuljo trajanja pretokov (slika 46) in izračunamo najbolj pogosto uporabljene percentile (Q_{95} , Q_{90} in Q_{80}) (preglednica 14).



Slika 46: Krivulja trajanja pretokov za vodomerno postajo Radovljica I

3. Izračunamo še ustrezne kazalce malih pretokov z najmanjšim letnim (srednjim dnevni) pretokom ($MAM(7)$, $MAM(30)$ in $MAM(60)$) (preglednica 14)

Preglednica 14: Izračunani kazalci malih pretokov iz krivulje trajanja pretokov in z metodo najmanjših letnih (srednje dnevni) pretokov za vodomerno postajo Radovljica I za 10-letno obdobje (2001–2010).

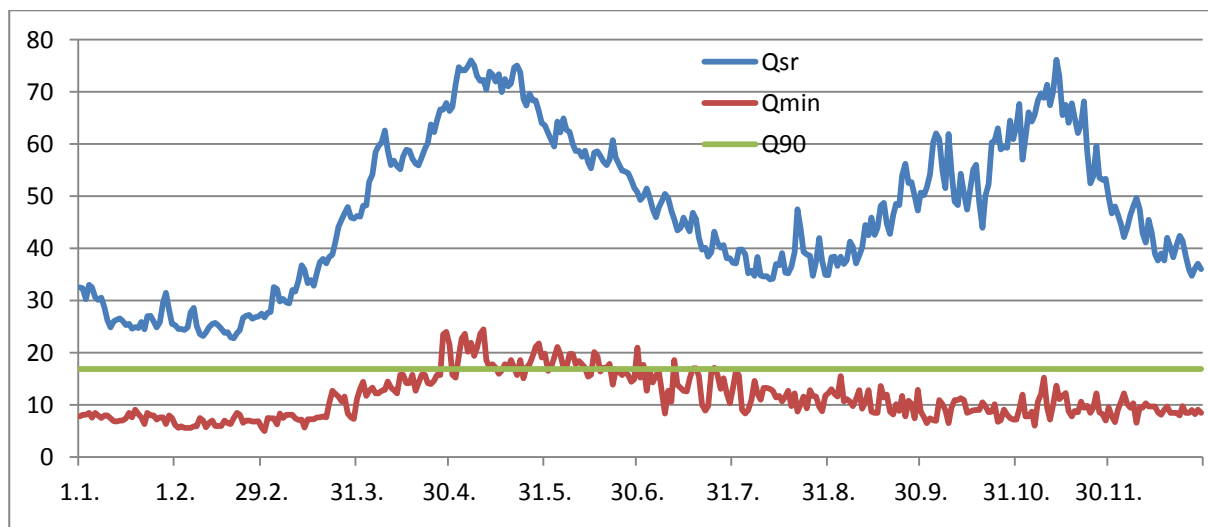
leto	Q_{95}	Q_{90}	Q_{80}	$MAM(7)$	$MAM(30)$	$MAM(60)$
2001	12.870	16.102	22.485	12.213	13.995	21.071
2002	9.806	12.389	16.299	9.202	10.822	11.514
2003	13.753	15.106	16.567	11.455	14.401	17.080
2004	14.824	17.778	22.946	13.281	16.405	19.468
2005	9.731	12.146	15.736	8.931	9.975	12.411
2006	8.899	12.146	15.736	9.072	10.508	11.931
2007	12.198	14.598	17.205	12.301	15.611	18.775
2008	15.426	17.821	21.232	12.858	14.926	19.250
2009	21.172	22.624	25.118	19.836	23.444	32.845
2010	19.247	22.182	24.650	18.705	21.122	25.771

4. Izračunamo korelacijsko matriko podatkov iz preglednice 14 in vzamemo tisti percentil, ki je korelacijsko najbolj močno povezan s kazalcem malih pretokov po metodi najmanjših letnih (srednje dnevni) pretokov (preglednica 15) in ga narišemo na graf (slika 47).

Preglednica 15: Korelacijska matrika kazalcev malih pretokov za vodomerno postajo Radovljica I na reki Savi za 10-letno obdobje (2001-2010).

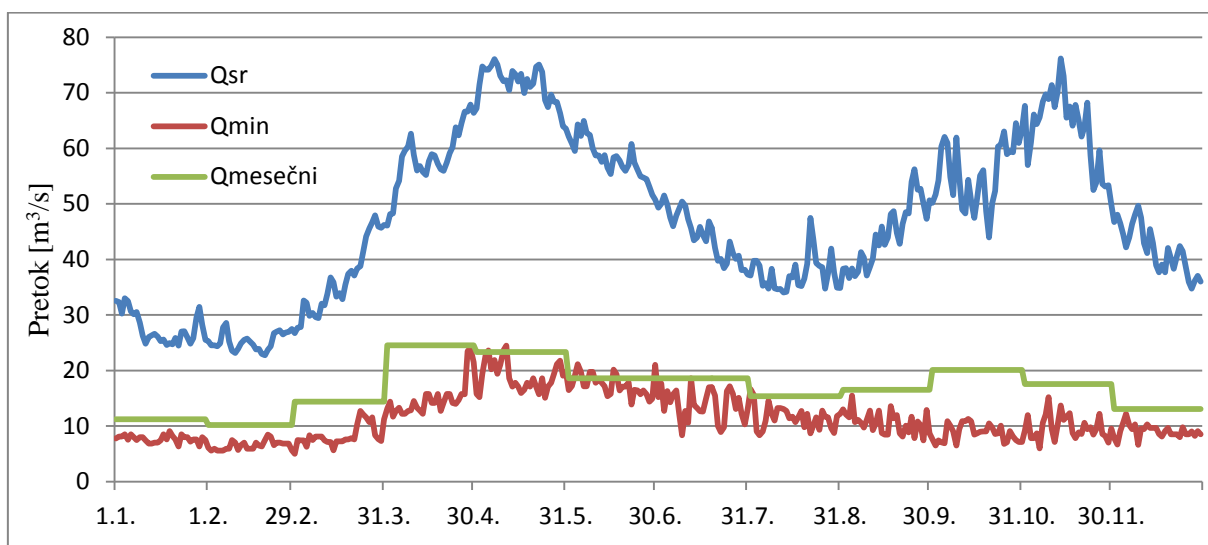
	Q_{95}	Q_{90}	Q_{80}	$MAM(7)$	$MAM(30)$	$MAM(60)$
Q_{95}	1					
Q_{90}	0.99	1				
Q_{80}	0.88	0.93	1			
$MAM(7)$	0.97	0.98	0.88	1		
$MAM(30)$	0.97	0.96	0.85	0.99	1	
$MAM(60)$	0.95	0.94	0.88	0.97	0.97	1

Pri izračunu korelacijske matrike smo ugotovili, da sta korelacijsko najbolj močno povezana kazalca malih pretokov Q_{90} in $MAM(7)$.



Slika 47: Krivulje srednjih in minimalnih letnih pretokov s konstantnim sušnim pragom Q_{90} za vodomerno postajo Radovljica I na reki Savi

5. Za izbrani percentil izračunamo mesečne sušne prage (slika 48).

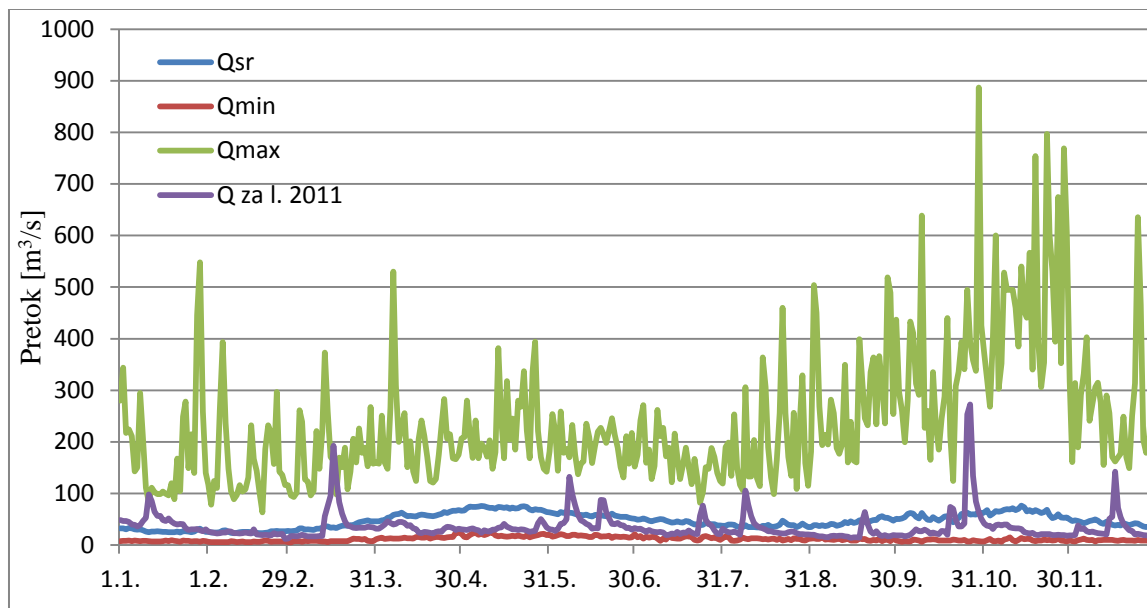


Slika 48: Krivulji srednjih in minimalnih letnih pretokov z mesečnim sušnim pragom za vodomerno postajo Radovljica I na reki Savi

Na sliki 48 vidimo, da se mesečni sušni prag ne ujema najbolje z letno krivuljo minimalnih dnevni pretokov. Razlog za odstopanje je ta, da so v letni krivulji upoštevani samo minimalni pretoki iz obravnavanega 10-letnega niza podatkov, mesečni sušni pragi pa so izračunani iz dnevni povprečij pretokov celotnega obravnavanega niza podatkov.

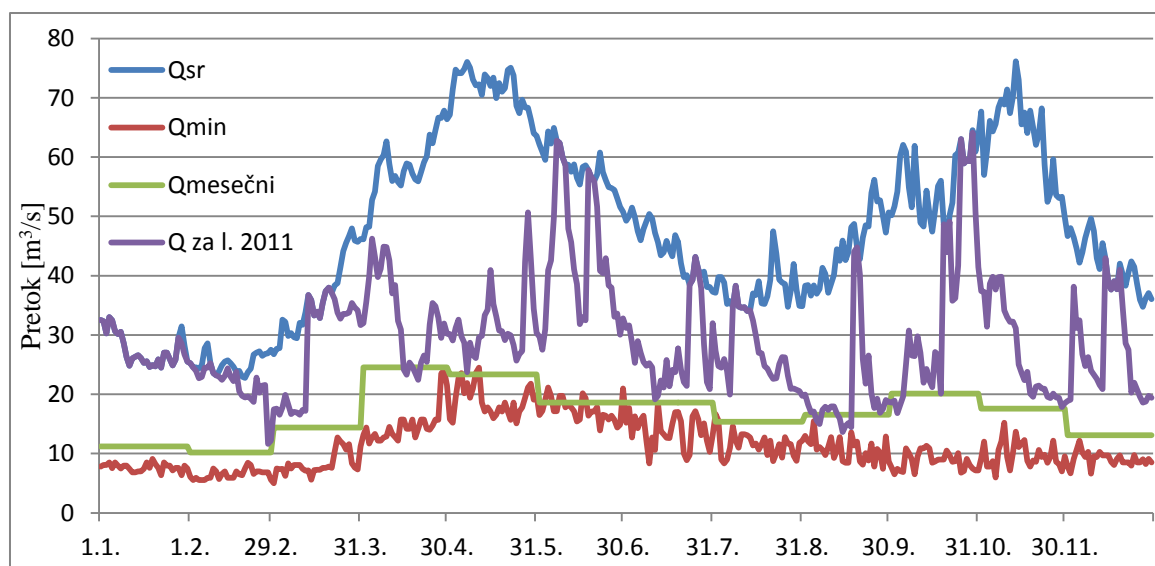
6. Dnevno spremljanje in vrednotenje podatkov

Primerjava hidrograma za leto 2011 s srednjimi, minimalnimi in maksimalnimi letnimi pretoki (slika 49) pokaže, da je bilo tudi leto 2011 kar precej suho oz. pod povprečjem.



Slika 49: Krivulje srednjih, minimalnih in maksimalnih letnih pretokov ter hidrogram za leto 2011 za vodomerno postajo Radovljica I.

Dnevni pretoki so nad krivuljo srednjih dnevni pretokov le 72 dni v letu. Kljub temu pa so pod sušnim pragom le 16 dni, kar je razvidneje na sliki 50, kjer smo konice, ki segajo čez srednje pretoke, odstranili zaradi boljšega pregleda.



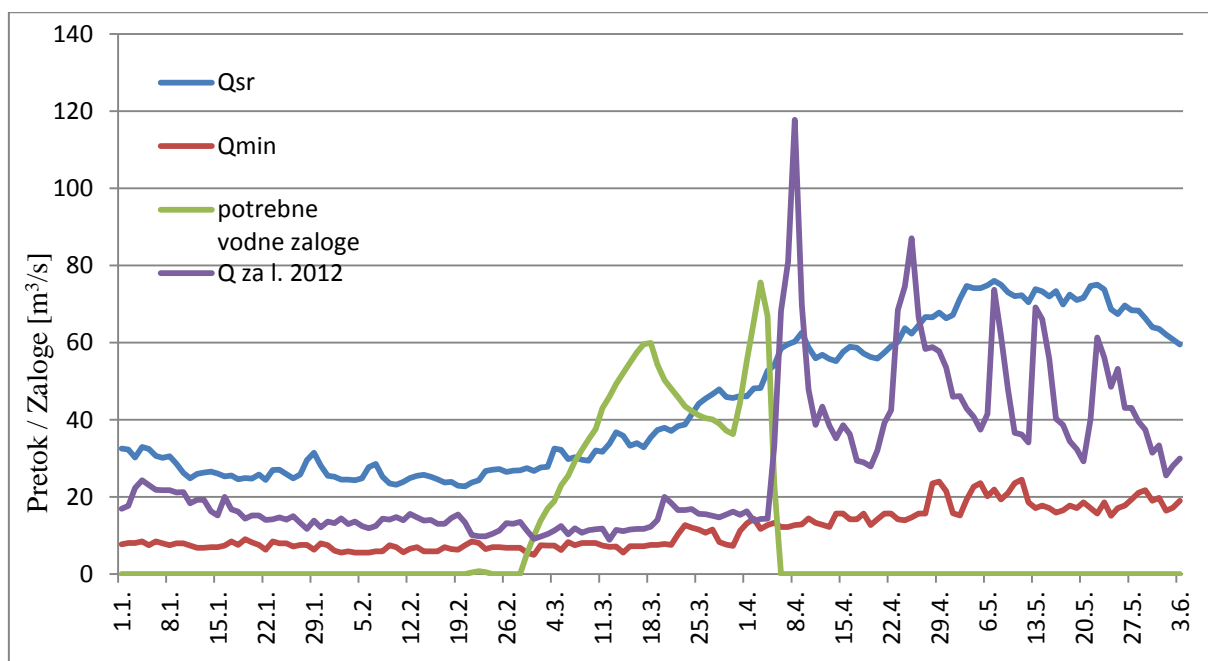
Slika 50: Krivulje srednjih in minimalnih letnih pretokov z mesečnim sušnim pragom ter hidrogram za leto 2011 za vodomerno postajo Radovljica I.

Rezultate smo primerjali tudi z opazovanji ARSO, ki so prikazana v mesečnem biltenu Naše okolje v decembrski izdaji za leto 2011 (Strojan, 2011), kjer je podrobno opisano obravnavano hidrološko leto. Leto 2011 je bilo, kot smo že prej ugotovili, nadpovprečno suho in so zato večji del leta bili zabeleženi mali pretoki. Kljub temu pa to leto ni imelo ekstremnih sušnih obdobj in posledično tudi ne pretokov, ki bi bili velikokrat pod sušnim pragom. Še največ sušnih pretokov smo zabeležili v septembru, kar je bila posledica vročinskega vala konec avgusta in v začetku septembra (Strojan 2011).

7. Določitev hidrološke suše za obravnavani primer

V zadnjem koraku smo rezultate za mesečne sušne prage iz točke 5 uporabili za izračun potrebnih vodnih zalog. V tej točki bomo obravnavali leto 2012, ker leto 2011 kljub temu, da je bilo podpovprečno suho, ni povzročilo vidne hidrološke suše.

V letu 2012 je hidrološka suša na reki Savi pri vodomerni postaji Radovljica I nastopila samo v prvi polovici leta, zato smo na sliki 51, zaradi boljšega pregleda, prikazali pretoke in potrebne vodne zaloge samo za to obdobje.



Slika 51: Krivulje srednjih in minimalnih letnih pretokov s potrebnimi vodnimi zalogami ter hidrogram za leto 2012 za vodomerno postajo Radovljica I.

V letu 2012 so se podpovprečno mali pretoki nadaljevali iz leta 2011 in upadali vse do marca Tako je 28. 2. 2012 nastopila hidrološka suša, ki je trajala do 6.4.2012. Vrh hidrološke suše je nastopil dne 3. 4. 2012. Celotni volumski deficit v tem času pa je znašal 268 653 m³ vode.

8 ZAKLJUČKI

V zadnjih 50-ih leti se je poraba vode za človeške potrebe več kot podvojila, kar posledično vpliva na pretoke rek posameznih območij po svetu (Wada in sod., 2013). Poleg neposrednega odvzema vode iz vodotokov, pa so tudi podnebne spremembe tiste, ki vplivajo na vedno bolj pogost pojav hidroloških suš, tako pri nas kot po svetu. V zadnjem 20-letnem obdobju (1992–2012) se je razlika med trendoma letnih količin padavin in povprečnih letnih temperatur zraka (slika 9) vidno povečala, kar je poleg že omenjenega zagotovo poglaviten razlog za povečano število sušnih let v tem obdobju. Ti dogodki pa so tudi pospešili potrebo k boljšemu razumevanju, vrednotenju in opazovanju pojava hidrološke suše.

Na Agenciji RS za okolje ta pojav spremljajo že dalj časa in ga v primeru posebno sušnih let tudi podrobneje analizirajo (Kobold, 2004). Z njihove strani je prišla želja po pripravi pregleda metod za sprotno vrednotenje suše. Postopek za vrednotenje in določanje praga, pod katerim se pretok smatra za sušni, v Sloveniji še ni bil podan. Naša naloga je bila, da na reprezentativnih slovenskih vodotokih izberemo ustrezne nize podatkov ter jih uporabimo za določitev potrebnih sušnih kazalcev in prikažemo metodo za določevanje hidrološke suše.

Izbrali smo 16 vodomernih postaj na vodotokih po vsej Sloveniji, ki imajo Q_{sr} od $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (Dragonja in Ledava) pa do $150 \text{ m}^3/\text{s}$ (Sava, Mura). In ravno za srednji pretok Q_{sr} smo pokazali, da je najboljši pokazatelj za razvrstitev vodotokov v tri skupine, na katere smo potem skušali navezati skupne značilnosti kazalcev malih pretokov. Prikazali smo tudi druge možnosti razvrščanja vodotokov, saj je kazalcev, ki vplivajo na določen vodotok, veliko. Vendar ni vedno samo velikost pretoka indikator o obnašanju vodotoka v ekstremnih razmerah. Dva vodotoka imata lahko enak srednji pretok, a kljub temu zelo drugačne kazalce malih pretokov. Npr. Sava pri vodomerni postaji Litija in Mura v Gornji Radgoni imata sicer skoraj enak srednji pretok Q_{sr} ($Q_{sr}(\text{Sava}) = 150,8 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{sr}(\text{Mura}) = 152,19 \text{ m}^3/\text{s}$), kazalec malih pretokov Q_{95} pa različen za več kot $13 \text{ m}^3/\text{s}$ ($Q_{95}(\text{Sava}) = 49,60 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{95}(\text{Mura}) = 63 \text{ m}^3/\text{s}$). Razlog za to je podan v našem drugem razvrščanju (preglednica 4), to je razmerje med minimalnim in maksimalnim pretokom, ki je pri Savi 1:69, pri Muri pa le 1:29. Še večja je to razmerje pri vodotokih z manjšimi pretoki, kot npr. za reko Ledavo pri vodomerni postaji Polana, kjer je razmerje kar 1:22373. In ravno to razmerje je tisto, ki se pri krivulji trajanja pretoka kaže kot bolj položna za manjšo razliko med minimalnim in maksimalnim pretokom in bolj strmo pri večji razliki.

Metoda, ki je zelo primerna za določevanje kazalcev malih pretokov, je najmanjši letni (srednji dnevni) pretok (*MAM*). Ta kazalec se lahko računa za različna trajanja glede na število dni (slika 21). Najpogosteje uporabljeni so srednji letni minimalni pretoki za 1, 7, 30 in 60 dni. Ker pa so vsi ti kazalci statistično zelo povezani z malimi pretoki, izračunanimi iz krivulje trajanja pretokov, lahko naredimo korelacijsko matriko in ugotovimo, katera dva kazalca izmed obeh metod sta korelacijsko najmočneje povezana. Izračune smo primerjali tudi z drugimi podobnimi analizami (Žogan, 2013) in ugotovili, da se rezultati zelo dobro ujemajo. Vodotoke smo nato razdelili glede na srednje pretoke Q_{sr} in jim skupaj določili najbolj ustrezne kazalce malih pretokov. Vidimo, da je koeficient korelacije R pri vseh treh skupinah večji od 0,998, kar kaže, da sta kazalca med seboj res močno povezana.

Velik vpliv na izbiro kazalcev malih pretokov pa ima tudi izbira časovnega niza. Zato je zelo pomembno, da pri računanju uporabimo časovne nize, ki so najnovejši in jih sproti ažuriramo. Prav tako je dobro, da izbrani niz podatkov ni predolg, saj bi se lahko določeni trendi, ki se nakazujejo v zadnjem desetletju ali dvajsetletju, močno zabrisali. Tudi v Združenih državah Amerike za tovrstne analize uporabljajo nize podatkov zadnjih 10-ih let (Tallaksen in van Lanen, 2004). Primerjava različno dolgih nizov podatkov v diplomski nalogi je pokazala, da se ti rezultati lahko bistveno razlikujejo. Ugotovili smo trend upadanja vodnih količin, ko se pomikamo z obdobjem proti letu 2010. V povprečju so se pretoki izračunani iz 10-letnega obdobja (2001–2010) zmanjšali za 11,6 % v primerjavi s pretoki izračunani iz 30-letnega (1971–2000) niza podatkov.

Glavni cilj naloge pa je bil podati ustrezen postopek za sprotno vrednotenje hidroloških suš, ki bo v vsakem trenutku nedvoumno prikazal, ali je pretok v izbranem vodotoku že padel pod določen sušni prag. Sušni prag pa je lahko konstanten čez celo leto, se sezonsko spreminja ali pa je izračunan po mesecih. V naših izračunih smo zbrali slednjega, saj se najbolje prilega izbrani letni krivulji pretokov in posledično dobimo natančnejše rezultate. Ta prag smo nato uporabili še za izračun vodnih zalog, ki bi bile potrebne, da bi bila hidrološka suša preprečena. V trenutku, ko začnejo nastajati te fiktivne vodne zaloge, nastopi v vodotoku hidrološka suša. S to metodo lahko natančno odčitamo začetek, konec, intenziteto in na koncu tudi celoten volumski primanjkljaj vode, ki je povzročen med hidrološko sušo.

V Sloveniji imamo na vodotokih že več kot 50 samodejnih hidroloških postaj, ki sprotno beležijo podatke o vodostajih, temperaturi in pretoku določene reke. Če bi te podatke sproti primerjali z izračunanim sušnim pragom za določeno vodomerno postajo, bi takoj, ko bi pretok padel pod izbran sušni prag, vedeli, da je na izbranem vodotoku nastopila hidrološka suša. Tako bi lahko naredili sušni

alarm, podoben hidrološkemu alarmu, ki ga je ARSO že razvila za visoke vode. Na ta način bi lahko pravočasno izdali opozorila, ki so vezana na upoštevanje ekološko sprejemljivega pretoka in zmanjšanje rabe vode.

VIRI

ARSO 2013. Hidrološke razmere in stanje vodnih zalog v Sloveniji. Ministrstvo za kmetijstvo in okolje, Agencija Republike Slovenije za okolje.

<http://www.arso.gov.si/novice/datoteke/030597->

[Stanje%20vodnih%20zalog%20v%20Sloveni.pdf](#) (Pridobljeno 6.1.2014)

Bates, B.C. (ur.), Kundzewicz, Z.W. (ur.), Palutikof J.P. (ur.), Wu, S. (ur.) 2008. Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, IPCC Secretariat: 210 str.

Bergant, K., Gregorič, G., Kajfež Bogataj, L., Lobnik, F., Suhadolc, M., Sušnik, A. 2010. Izzivi Slovenije na področju degradacije tal. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje: 36 str.

Ceglar, A., Kajfež Bogataj, L. 2008. Obravnava meteorološke suše z različnimi indikatorji. Acta agriculturae Slovenica 91–2, september 2008: 407–425

Cegnar, T. 2003. Podnebne spremembe in padavinski režim. Zbornik referatov, VGB, Maribor. 8 str.

Cegnar, T. 2010. Podnebne spremembe in potreba po prilagajanju nanje. V: Okolje se spreminja. Podnebna spremenljivost Slovenije in njen vpliv na vodno okolje. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje: 3–14.

Dakova, S. 1997. Drought in South-Eastern Europe. FRIEND, Third report: 1994–1997, Lyon, Cemagref, 166 str.

Dakova, S. 2004. Low flow and drought spatial analysis. Proceedings of BALWOIS conference, Ohrid, FY Republic of Macedonia, 1–9.

EM-DAT - Prizadetost ljudi v odstotkih zaradi različnih naravnih nesreč. Percentage of reported people affected by disaster type. 2013.

<http://www.emdat.be/natural-disaster-trends> (Pridobljeno 11. 11. 2013)

Fleig, A. 2004. Hydrological Drought – A comparative study using daily discharge series from around the world. Diplomarbeit. Freiburg, Institut für Hydrologie Freiburg (self-publishing A. Fleig): 144 str.

Frantar, P. 2005. Pretočni režimi slovenskih rek in njihova spremenljivost. Ujma: revija za vprašanja varstva pred naravnimi in drugimi nesrečami 19: 145–153.

Frantar, P., Kobold, M., Ulaga, F. 2008. Trendi pretokov. V: Frantar, P. (ur.). Vodna bilanca Slovenije 1971–2000. Ljubljana, MOP ARSO: 50–61.

Frantar, P. 2010. Pretočni režimi v Sloveniji. V: Okolje se spreminja. Podnebna spremenljivost Slovenije in njen vpliv na vodno okolje. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje: 59–63.

Glavan, M., Pintar, M., 2012. Ciljni raziskovalni program: Vpliv podnebnih sprememb na potrebne vodne količine za namakanje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 93–105.

Gustard, A., Bullock, A., Dixon, J.M. 1992. Low Flow Estimation in the United Kingdom. Institute of Hydrology Report No. 108, Wallingford, Velika Britanija: 292 str.

Kajfež-Bogataj, L., 2006. Podnebne spremembe in nacionalna varnost. Ujma: revija za vprašanja varstva pred naravnimi in drugimi nesrečami. 2006 20: 170–176.

Kobold, M. 2004. Hidrološka suša slovenskih vodotokov v obdobju 2000–2002. Ujma: revija za vprašanja varstva pred naravnimi in drugimi nesrečami 17–18: 102–111.

Kobold, M., Ulaga, F. 2010. Hidrološko stanje voda in podnebna spremenljivost. V: Okolje se spreminja, Podnebna spremenljivost Slovenije in njen vpliv na vodno okolje. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje: 43–56.

Kobold, M., Ulaga, F. 2012. Hidrološko stanje voda in podnebna spremenljivost. V: Okolje v katerem živimo. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje: 61–68.

Kobold, M., Sušnik, M. 2004. Analiza nizkovodnih razmer slovenskih vodotokov leta 2003. Ujma: revija za vprašanja varstva pred naravnimi in drugimi nesrečami 17–18, 120–126.

Kolbezen, M., Pristov, J. 1998. Površinski vodotoki in vodna bilanca Slovenije. Ljubljana, Hidrometeorološki zavod RS: 98 str.

Kovačič, T. 2012. Analiza vpliva lastnosti porečja na indeks baznega odtoka. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba T. Kovačič): 105 str.

Mikoš, M., Krajnc, A., Matičič, B., Müller, J., Rakovec, J., Roš, M., Brilly, M. 2003.

Hidrološko izrazje = Terminology in hydrology. Acta hydrotechnica, 20, 32.

<http://ksh.fgg.uni-lj.si/ksh/acta/> (Pridobljeno 14. 12. 2012).

NDMC, 2002. What is Drought? Understanding and Defining Drought. National Drought Mitigation Center.

<http://www.drought.unl.edu/whatis/concept.htm> (Pridobljeno 2. 12. 2012).

Pintar, M. 2010. Ciljni raziskovalni program: Ocena vodnih perspektiv na območju Slovenije in možnosti rabe vode v kmetijski pridelavi. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 25–73.

Prizadetost ljudi v odstotkih zaradi različnih naravnih nesreč od leta 1980 – 2012. 2013.

<http://www.emdat.be/disaster-trends> (Pridobljeno 11. 11. 2013).

Rossi, G. 2011. Drought risk for water supply systems based on low-flow regionalisation. Dissertation. Florence, University of Florence, Faculty of Engineering (self-publishing G. Rossi): 134 str.

Smakhtin, V.U. 2001. Low flow hydrology: a review. Journal of Hydrology 240: 147–186.

Strojan, I. 2011. Pretoki rek v decembru 2011. V: Naše okolje 18, 12: 66–75.

Sušnik, A., Gregorič, G., Uhan, J., Kobold, M., idr. 2013. Spremenljivost suš v slovenskem prostoru in analiza suše 2013. 24. Mišičev vodarski dan, Maribor, December 4, 2013. Suša ponovno v letu 2013: 102–109.

Šebenik, U. 2012. Analiza suše s pomočjo standardiziranega padavinskega kazalca. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, oddelek za okoljsko gradbeništvo (samozaložba U. Šebenik): 122 str.

Tallaksen M.L., Van Lanen A.J.H. 2004. Hydrological drought, Processes and estimation methods for streamflow and groundwater. Oslo, Developments in Water Science: 139–177.

Tate, E.L., Gustard, A. 2000. Drought Definition: A Hydrological Perspective. V: Vogt, J.V. (ur.), Somma, R. (ur.). Drought and Drought Mitigation in Europe. Dordrecht [etc.], Kluwer academic publishers: 23–48.

Wada, Y., Van Beek, L.P.H., Wanders, N., Bierkens, M.F.P. 2013. Human water consumption intensifies hydrological drought worldwide. Environ. Res. Lett. 8: 14 str.

[doi:10.1088/1748-9326/8/3/034036](https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/034036) (Pridobljeno 16. 10. 2013)

Wilhite, D.A., Glantz, M.H. 1985. Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. Water International 10, 3: 111–120.

World Meteorological Organization (WMO). 2008. Manual of Low-flow Estimation and Prediction. Operational Hydrology Report No. 50. (WMO-No. 1029). Ženeva: 136 str.

Žogán, A. 2013. Analiza nizkih pretokov vodotokov porečja Ljubljanice. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za okoljsko gradbeništvo (samozaložba A. Žogán): 88 str.