

UDK/UDC: 502/504:627.512(497.4)

Prejeto/Received: 14.08.2020

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 01.09.2020

**POPLAVNA NEVARNOST V SLOVENIJI IN OCENA EKSTREMNIH PROJEKTHNIH
POPLAVNIH PRETOKOV**
FLOOD HAZARD IN SLOVENIA AND ASSESSMENT OF EXTREME DESIGN FLOODS

Matjaž Mikoš¹

¹ Raziskovalni inštitut za geo in hidro tveganja, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani,
Jamova c. 2, 1000 Ljubljana, E-pošta: matjaz.mikos@fgg.uni-lj.si

Izvleček

Zaradi pomanjkanja hidroloških meritev na hudourniških območjih in manjših vodozbornih območjih slovenskih rek skladno z evropsko poplavno direktivo za oceno velikosti 500-letnih pretokov Q500 uporabljamo empirično enačbo. V prispevku kritično ocenimo predlagane empirične povezave za oceno pretoka Q500 iz slovenskega Pravilnika o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti. Pri tej oceni uporabimo javno dostopne merjene podatke slovenskega hidrološkega monitoringa, podatke o ekstremnih pretokih za izbrane slovenske visoke pregrade ter tako podatkovno bazo primerjamo z empiričnimi izrazi za določanje ekstremnih pretokov v svetu in Evropi, ki se uporabljajo za načrtovanje visokih pregrad. Čeprav doseg poplavne linije Q500 določa območje preostale poplavne nevarnosti, je smiselno opustiti določanje ekstremnih pretokov v Sloveniji z uporabo empiričnih enačb in preiti na hidrološko-hidravlično modeliranje z uporabo sodobnih programskih orodij.

Ključne besede: hidrologija, veliki pretoki, poplave, povratne dobe, statistična analiza

Abstract

Due to the lack of hydrological measurements in the torrential areas and smaller catchment areas of Slovenian rivers, in accordance with the European Floods Directive, we used an empirical equation to estimate the magnitude of a 500-year flood (Q500). In this paper, we critically evaluate the proposed empirical equations for estimating the Q500 discharge, as defined in the Slovenian Rules on the methodology for determining areas at risk of floods and related erosion of inland waters and the sea, and on the method of classifying land into risk classes. In this assessment, we use publicly available measured data from Slovenia's hydrological monitoring network and data on extreme flows for selected Slovenian high dams, and thus compare the database with empirical equations for determining extreme flows in Europe and elsewhere in the world that are used for planning high dams. Although the reach of the Q500 flood line determines the area of residual flood danger, it makes sense to abandon the determination of extreme flows in Slovenia using empirical equations and move to a hydrological-hydraulic modelling system using modern software tools.

Keywords: hydrology, high flows, floods, return periods, statistical analysis

¹ Stik / *Correspondence:* matjaz.mikos@fgg.uni-lj.si

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

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

<https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2020.04>

1. Uvod

Celotna poplavna površina ob ekstremnih poplavah (doseg Q100) v Sloveniji je bila ocenjena na 695 km² ali 3,5 % celotne površine, od tega 25 km² urbanih površin (Mikoš et al., 2004). Po sprejetju evropske poplavne direktive leta 2007 (Direktiva, 2007) je Republika Slovenija vložila velik napor v prenos te direktive v slovenski pravni red in v izdelavo strokovnih podlag. Izdelana sta bila Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti (Pravilnik, 2007) in Uredba o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja (Uredba, 2008). Na osnovi metodologije je bila izdelana tudi predhodna ocena poplavne ogroženosti Republike Slovenije (MOP, 2012; 2019), ki določa skupaj 86 območij pomembnega vpliva poplav – OPVP (MOP, 2020).

Po več kot 10 letih razvoja lahko vseeno ugotovimo, da imamo v Sloveniji pri določanju poplavne nevarnosti še nekatere nerešene probleme. Navedimo nekatere:

- V obravnavo poplavne ogroženosti so zajete predvsem rečne poplave večjih vodotokov (rek), ki so opredeljene kot območja pomembnega vpliva poplav (OPVP) in mnogo manj hudourniške poplave vodotokov na manjših hudourniških območjih – dokaz je lahko vpogled v Atlas voda (<https://gisportal.gov.si/portal/apps/webappviewer/index.html>), ki prikazuje, kje v Sloveniji so območja pomembnega vpliva poplav (sloj VK) in kje so območja veljavnosti rezultatov posameznih hidrološko-hidravličnih študij;
- Izdelane metodologije se na da uporabiti za določanje poplavnih območij na hudourniških vršajih zaradi hudourniških poplav, še posebej, kadar take poplave spremlja intenzivno premeščanje erozijskega drobirja (pojavi hudourniških drobirskih tokov, izbruhi hudournika) – nujno je poznavanje razmer v zaledju hudourniškega vršaja in izdelava

scenarijev za ekstremne dogodke (npr. ocena možnih magnitud drobirskih tokov);

- določanje erozijske ogroženosti (gre za po Zakonu o vodah (ZV-1-NPB8, 2020; 87. člen) erozijska območja, ki so stalno ali občasno pod vplivom površinske, globinske ali bočne erozije vode) je ostalo nedorečeno in se v praksi uporablja arbitrarno – morda je to najbolj vidno prav na hudourniških vršajih, kjer prihaja do prekrivanja poplavnih območij zaradi delovanja hudournikov in erozijskih območij. V Atlasu voda so od leta 2019 erozijska območja prikazana kot opozorilna območja, razdeljena v tri razrede (strogo varovanje, zahtevni zaščitni ukrepi, običajni zaščitni ukrepi) – prevzeta je opozorilna karta erozije iz Načrta urejanja voda (NUV1) v merilu 1 : 250.000.

Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti (Pravilnik, 2007): »Pretok Q(500) je vrednost pretoka vode, ki je v določenem letu lahko dosežen ali presežen z verjetnostjo 0,2 % in se lahko določi tudi na naslednji način, in sicer za površino porečja:

- ki je večja od 1000 km²: $Q(500) = 1,2 * Q(100)$,
- med 100 km² in 1000 km²: $Q(500) = 1,3 * Q(100)$,
- ki je manjša od 100 km²: $Q(500) = 1,4 * Q(100)$ «.

Doseg poplav Q500 skladno s poplavnim pravilnikom (Pravilnik, 2007) in s poplavno uredbo (Uredba, 2008; čl. 7) pogojuje in omejuje izvajanje dejavnosti na območju preostale poplavne nevarnosti (območje, omejeno z dosegom poplave Q100 in Q500). Skladno s priložo 2 k poplavni uredbi (2008) je na območju preostale poplavne nevarnosti prepovedano izvajanje dejavnosti:

- v obratih in napravah, zaradi katerih lahko nastane onesnaženje večjega obsega, ali/in dejavnosti, ki pomenijo nevarnost za nastanek nesreč po predpisih o naravnih in drugih nesrečah;
- ki zaradi občasnega ali stalnega zadrževanja večjega števila ljudi lahko škodljivo vplivajo na

človekovo zdravje (na primer: bolnišnice, zdravilišča, šole, vrtci, domovi za starejše občane, podzemne garaže).

Novela uredbe leta 2020 (Uredba, 2020) je spremenila prepovedi iz priloge 2, in sicer je določila, da je izvajanje dejavnosti dovoljeno, če:

- »se v predhodnem postopku, ki se izvede v skladu s predpisi, ki urejajo presojo vplivov na okolje, ugotovi, da presoja vplivov na okolje ni potrebna, ali če
- ugotovitve celovite presoje vplivov na okolje ali presoje vplivov na okolje, ki se izvede v skladu s predpisi, ki urejajo presojo vplivov na okolje, niso ocenjene kot uničujoče ali bistvene in je mogoče s predhodno izvedbo omilitvenih ukrepov v skladu z okoljevarstvenim soglasjem ali vodnim soglasjem zagotoviti, da njihov vpliv ni bistven«.

Hidrološka mreža Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO), prikazana na sliki 1, je relativno redka v hudourniških območjih z velikostjo porečja (prispevno površino) manjšo kot 100 km².



Slika 1: Merilna mesta slovenskega državnega hidrološkega monitoringa površinskih voda, upoštevana v statističnem izračunu povratnih dob (ARSO, 2013).

Figure 1: Measuring sites of the Slovenian state's system of monitoring surface waters, used in the statistical analysis of return periods (ARSO, 2013).

Zato lahko predpostavimo naslednje:

- a. Dolžina niza meritev je v vodomernih postajah kratka (večinoma bistveno krajša od 100 let) in problematična pri uporabi za statistično značilne ocene pretokov s povratnimi dobami,

bistveno večjimi od dolžine niza meritev (tj. Q100 in Q500).

- b. Ocena Q(100) se pogosto izvaja s pomočjo empiričnih enačb ali poenostavljenih hidroloških modelov padavine–odtok (sintetični hidrogram, konstantne padavine v prostoru), saj za umerjanje bolj kompleksnih hidroloških modelov ni primernih terenskih meritev.
- c. Ocena Q(500), četudi bi temeljila na statistični analizi merjenih podatkov o pretokih, bi bila »v zraku«, saj je ekstrapolacija nekajdesetletnih meritev na dobo 500 let statistično zelo vprašljiva – lahko izberemo zelo različne verjetnostne porazdelitve in za oceno Q(500) dobimo zelo različne vrednosti z velikim intervalom zaupanja, ki je pogosto neuporaben za inženirsko načrtovanje ukrepov.

Namen prispevka je na osnovi javno dostopnih podatkov o pretokih v Sloveniji, ki jih zagotavlja Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO), kritično analizirati empirični način določanja ekstremnega pretoka Q(500) in način uporabe tega podatka pri analizah poplavne nevarnosti.

V prvem delu članka prikazujemo uporabljene podatke Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO) o statistično izračunanih velikih pretokih za vodomerne postaje v Sloveniji s 100- in 500-letno povratno dobo kot osnovo za kritično analizo določanja ekstremnega pretoka Q(500). Preverimo tudi razmerje med pretoki Q500 in Q100 v odvisnosti od velikosti prispevne površine. Za štiri večje slovenske reke primerjamo tudi podatke o pretokih Q100 in Q500 v vzdolžnem prerezu reke.

Končamo s primerjavo podatkov ARSO za Q100 in Q500 z izbranimi empiričnimi izrazi za določanje ekstremnih pretokov, ki se v svetu uporabljajo pri načrtovanju visokih pregrad in oceni njihove varnosti. Prispevek zaključimo z oceno uporabnosti empiričnih izrazov za slovenske hidrološke razmere, torej ali bi jih lahko uporabljali tudi v prihodnosti.

2. Material in metode

Uporabili smo javno dostopne podatke meritev površinskih voda v državni mreži monitoringa, ki ga izvaja Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO). Leta 2013 je ARSO izdal publikacijo in v njej predstavil rezultate statistične analize velikih in malih pretokov v mreži monitoringa (ARSO, 2013), ki vsega skupaj obsega 179 merilnih postaj.

Za izračun Q2, Q5, Q10, Q20, Q50, Q100, Q300 in Q500 je ARSO uporabil merjene podatke na vodomernih postajah (v. p.) površinskih voda v Sloveniji. Za 35 od skupno 179 postaj ARSO navaja tudi rezultate različnih drugih študij (sedem v. p. ima samo ta podatek). Za 22 postaj ni podatka o prispevni površini. Za analizo je tako ostalo 150 vodomernih postaj z velikostjo prispevne površine od 6,1 km² (v. p. 8545 Koren – Nova Gorica I) do 14.661,5 km² (v. p. 2150 Drava Borl). Dolžina niza meritev pretokov na 150 vodomernih postajah je bila od 15 let (v. p. 4705 Sevnica – Orešje) do 101 leta (v. p. 3420 Sava – Radovljica I). Niz meritev pretokov je bil krajši od 30 let na 37 vodomernih postajah, daljši od 30 let pa na 113 vodomernih postajah.

Z vsako izbrano vodomerno postajo od 150 razpoložljivih postaj v vzorcu smo imeli na razpolago naslednje podatke:

- velikost prispevne površine v km²
- obdobje meritev pretokov v letih
- izračunane pretoke od Q2 do Q500 v m³/s ob uporabi dveh statističnih porazdelitev (Pearson 3 in log-Pearson 3 porazdelitve)

Pridobili smo tudi naslednje svetovne vire o maksimalnih merjenih pretokih v odvisnosti od prispevne površine do hidrološkega prereza meritev pretoka:

- Svetovni katalog maksimalnih opazovanih poplav (IAHS, 2003), v katerega je Slovenija prispevala podatke iz vodomernih postaj Nazarje (prispevna površina 457 km², niz 1926–1996, manjka obdobje 1941–1945, maksimalni pretok 635 m³/s leta 1990) in Laško (prispevna površina 1664 km², niz 1907–1999, manjka obdobje 1941–1945, maksimalni pretok 1406

m³/s leta 1990) na reki Savinji. Zaključke te študije je povzel Herschy (2002).

- Pregledne študije ekstremnih hudourniških poplav za evropske države: katalog 550 hudourniških poplav v Evropi (brez podatkov iz Slovenije) (Gaume et al., 2009) in 25 ekstremnih hudourniških poplav v 60 hudourniških območjih s prispevno površino med 9,5 in 1856 km² (Marchi et al., 2010).

Podatke iz svetovne literature smo povzeli, da bi lahko ovrednotili statistično ocenjene velike pretoke v mreži monitoringa ARSO v Sloveniji. V nadaljevanju podajamo izbrane enačbe za odvisnost velikih pretokov od velikosti prispevne površine.

Pogosto se za razpoložljive merjene poplavne pretoke določi njihova ovojnica kot zgornja meja maksimalnih opazovanih poplavnih pretokov, in to brez opredelitve povratne dobe njihovega nastopa (Castellarin, 2007):

$$Q = \alpha A^{\beta} \text{ (m}^3\text{/s)}, \quad (1)$$

kjer je Q (m³/s) najvišji opazovani poplavni pretok v izbranem hidrološkem prerezu, α (m³/s/(km²)^(1- β)) je regionalni koeficient – številčno predstavlja specifični odtok z 1 km², A je velikost prispevne površine (km²) in β (-) je eksponent, manjši od 1, in ga običajno imenujemo koeficient hudourniškega značaja porečja – bližje ko je vrednosti 1, bolj hudourniški značaj ima porečje. Po Creagerju et al. (1966, cit. po Castellarin, 2007) se vrednosti koeficienta hudourniškega značaja gibljejo med 0,3 in 0,8. Castellarin (2007) predlaga kot najbolj uporabno vrednost $\beta = 0,6$.

Enačbo (1) enostavno preoblikujemo v izraz:

$$\ln\left(\frac{Q}{A}\right) = a + b \ln(A), \quad (2)$$

kjer sta koeficienta a in b enaka $\ln(\alpha)$ in $\beta - 1$ iz enačbe (1). Ovojnice za poplavne pretoke se pogosto iščejo na dvojnem logaritmskem diagramu, v katerem primerjamo med seboj logaritem razmerja med poplavnim pretokom Q in prispevno površino A , torej $\ln(Q/A)$, in logaritem prispevne površine, torej $\ln(A)$. Razmerje Q/A je dejansko specifični (enotni) pretok Q_s z 1 km² prispevne površine:

$$Q_s = \alpha A^{\beta-1} \text{ (m}^3\text{/s/km}^2\text{)}. \quad (3)$$

Pogosto se določajo ovojnice za poplavne pretoke za določeno (izbrano) regijo, v kateri veljajo homogeni hidrološki, meteorološki in geološki pogoji, ki omogočajo določitev (ene) skupne ovojnice. Evropski projekt HYDRATE (Hydrometeorological Data Resources and Technologies for Effective Flash Flood Forecasting) je zbral podatke iz Španije, Francije, Italije, Avstrije, Slovaške, Romunije in Grčije za prispevne površine od nekaj 10 km² do 2000 km² ter za celotno podatkovno bazo poplavnih pretokov predlagal ovojnico z regresijsko enačbo (Gaume et al., 2009):

$$Q_s = 97 A^{-0,4} \text{ (m}^3\text{/s/km}^2\text{)}. \quad (4)$$

V Kataloniji, južni Franciji in v severozahodni Italiji je bilo dogodkov s specifičnim pretokom preko 75 m³/s/(km²)^{0,6} več kot 10 % vseh poplavnih pretokov. Vseeno je v celotni podatkovni bazi poplavnih pretokov projekta HYDRATE za vse države prevladoval specifični pretok med 25 in 50 m³/s/(km²)^{0,6} – vsaj 60 % podatkov v vsaki državi.

Enačbo (4) je potrdila tudi analiza Marchi et al. (2010), v bazi podatkov o poplavnih pretokih se je znašla poplava na Selški Sori 18. 9. 2007 (Rusjan et al., 2009).

Chaves et al. (2017) je podal pregled možnih enačb za določanje regionalnih ovojnica za potrebe načrtovanja hidrotehničnih pregrad in računanja njihove stabilnosti v pogojih ekstremnih hidroloških pogojev:

- Creagerjeva krivulja (Creager et al., 1945):

$$Q = 1,303 C_c (0,386A)^{0,936A^{-0,048}} \text{ (m}^3\text{/s)}, \quad (5)$$

kjer je C_c brezdimenzijski Creagerjev regionalni koeficient (med 100 in 200) in A je velikost prispevne površine (km²).

- Krivulja Francouja in Rodierja (1967) se pogosto uporablja v Evropi in Afriki:

$$\frac{Q}{Q_0} = \left(\frac{A}{A_0}\right)^{1-\frac{k}{10}} \text{ (m}^3\text{/s)}, \quad (6)$$

kjer je Q maksimalni pretok (m³/s), $Q_0 = 10^6$ m³/s, A je velikost prispevne površine (km²), $A_0 = 10^8$ km², in k je Francou-Rodierjev regionalni koeficient, izražen kot:

$$k = 10 \left(1 - \frac{\log Q - 6}{\log A - 8}\right) (-). \quad (7)$$

Vrednosti regionalnega koeficienta k so med 0 in 6, vrednosti med 6 in 7 so ekstremne v svetovnem merilu (Papp, 2001).

- Crippen (1982) je ovojnico določil po svoji metodologiji kot:

$$Q = k_1 A^{(k_2-1)} (A^{0,5} + 5)^{k_3} \text{ (m}^3\text{/s)}, \quad (8)$$

kjer je A velikost prispevne površine (km²), regionalni koeficienti k_1 , k_2 in k_3 (-) pa so določeni empirično.

V svetovnem katalogu Mednarodne zveze za hidroloških raziskave o poplavnih pretokih (IAHS, 2003), kjer so zbrani podatki iz 50 držav, kot rečeno tudi iz Slovenije, je Herschy (2002) analiziral ovojnico 55 največjih poplavnih pretokov na svetu in podal regresijsko enačbo:

$$\text{za } A > 100 \text{ km}^2: Q = 500 A^{0,43} \text{ (m}^3\text{/s)}, \quad (9)$$

$$\text{za } A < 100 \text{ km}^2: Q = 100 A^{0,8} \text{ (m}^3\text{/s)}. \quad (10)$$

Pri tem je nujno opozoriti, da so prispevne površine večinoma večje od 100 (1000) km².

Ker podatki za poplavne pretoke iz Evrope niso dosegali svetovnih maksimalnih vrednosti, je Herschy (2002) za poplavne pretoke v Evropi predlagal enačbo:

$$\text{za } A > 100 \text{ km}^2: Q = 230 A^{0,43} \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (11)$$

za Kitajsko in Združene države Amerike (ZDA) pa enačbi:

$$\text{za } A > 100 \text{ km}^2: Q = 850 A^{0,36} \text{ (m}^3\text{/s)}, \quad (12)$$

$$\text{za } A < 100 \text{ km}^2: Q = 90 A \text{ (m}^3\text{/s)}. \quad (13)$$

Končno smo pri analizi razmerij med statistično vrednotenimi poplavnimi pretoki (Q500/Q100) v mreži ARSO upoštevali tudi empirične enačbe iz Pravilnika (2007), ki v odvisnosti od velikosti prispevne površine predpisuje naslednje že v uvodu navedene enačbe:

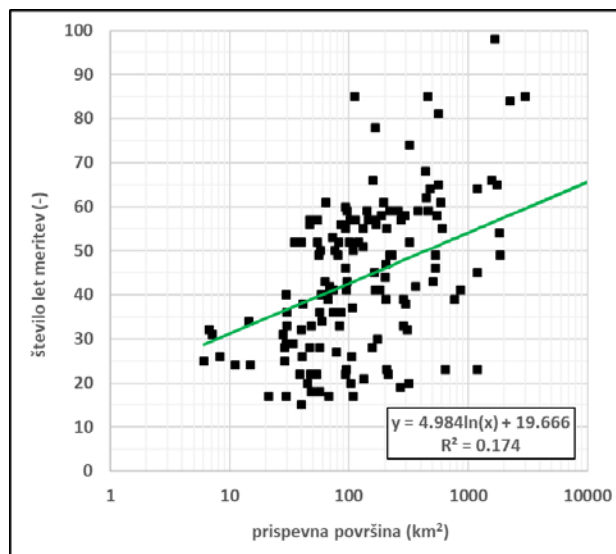
- za površine večje od 1000 km²: Q(500)= 1,2 * Q(100),
- za površine med 100 km² in 1000 km²: Q(500)= 1,3 * Q(100) in
- za površine, manjše od 100 km²: Q(500)= 1,4 * Q(100)

3. Rezultati in razprava

3.1 Odvisnost Q100 in Q500 od prispevne površine in let meritev

Rezultati statistične ocene Q100 in Q500 so prikazani na slikah 2 do 4.

Najprej smo pogledali odnos med dolžino niza meritev in velikostjo prispevne površine za 150 vodomernih postaj (slika 2).



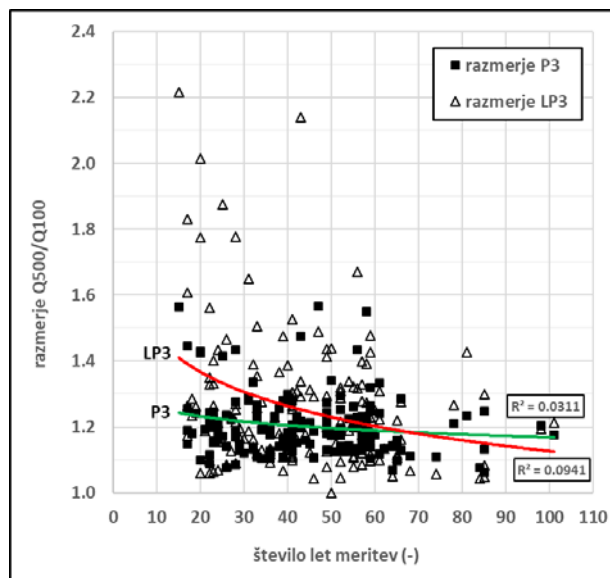
Slika 2: Razmerja med številom let meritev v vodomernih postajah ARSO in velikostjo prispevne površine v km².

Figure 2: Ratio between the number of years of measurements at ARSO gauge stations and the catchment area in km².

Mediana dolžine niza meritev je 43 let in mediana velikosti prispevne površine vodomerne postaje je 108,13 km². Čeprav obstaja trend daljšanja niza meritev za večje prispevne površine A v km² ($R^2 = 0,174$):

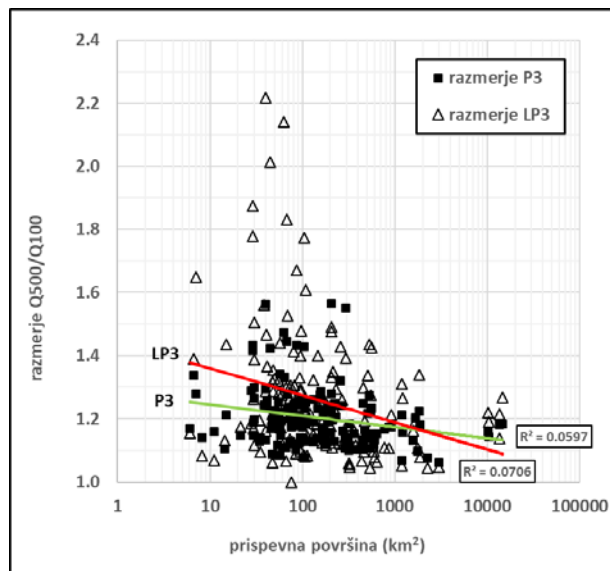
$$\text{št. let} = 20 \text{ let} + 5 \text{ let} \times \ln(A) \quad (14)$$

je Pearsonov koeficient korelacije le 0,043 in raztros torej velik (slika 2).



Slika 3: Razmerja Q500/Q100, določena z metodama Pearson 3 (P3) in log-Pearson 3 (LP3) v odvisnosti od števila let meritev na vodomernih postajah ARSO z logaritmično črto trenda.

Figure 3: Ratio Q500/Q100 determined by Pearson 3 (P3) and log-Pearson 3 (LP3) methods as a function of years of measurements at ARSO gauge stations. The trend line is logarithmic function.



Slika 4: Razmerja Q500/Q100, določena z metodama Pearson 3 (P3) in log-Pearson 3 (LP3) v odvisnosti od velikosti prispevne površine v km² z logaritmično črto trenda.

Figure 4: Ratio Q500/Q100 determined by Pearson 3 (P3) and log-Pearson 3 (LP3) methods as a function of catchment area in km². The trend line is a logarithmic function.

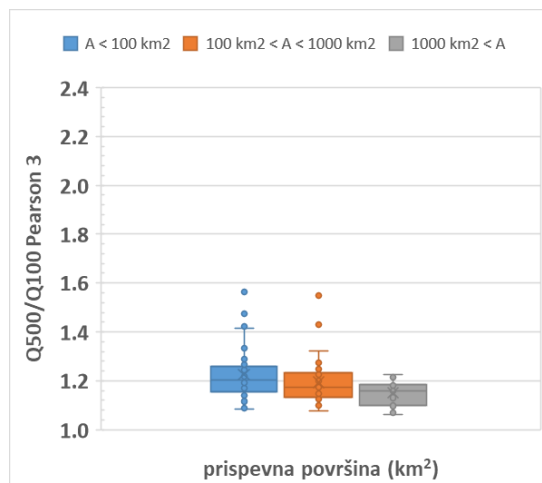
Vseeno poudarimo dejstvo, da se z manjšanjem prispevne površine krajša tudi čas trajanja meritev in s tem povečuje negotovost statistične ocene velikih pretokov istega trajanja.

Nadalje smo analizirali razmerje med statistično ocenjenimi pretoki Q100 in Q500 za dve statistični porazdelitvi: Pearson 3 in log-Pearson 3 za 150 vodomernih postaj v odvisnosti od števila let meritev na posamezni vodomerni postaji (slika 3) in v odvisnosti od velikosti prispevne površine porečja do vodomerne postaje (slika 4). Narisane so tudi logaritmične trendne črte za obe statistični porazdelitvi. Regresijski koeficienti so zelo nizki, tako za odvisnost od števila let meritev (LP3: $R^2 = 0,0941$ & P3: $R^2 = 0,0311$), kot tudi za odvisnost od velikosti prispevne površine (LP3: $R^2 = 0,0706$ & P3: $R^2 = 0,0597$). Iz slik 3 in 4 tudi sledi, da so razmerja med Q500 in Q100 za porazdelitev log-Pearson 3 (LP3) večja od razmerij za porazdelitev Pearson 3 (P3) – razmerja Q500/Q100 za posamezno postajo ARSO so lahko tudi večja od vrednosti 1,6 (trikotniki na slikah 3 in 4).

Tudi logaritmična trendna črta za razmerje Q500/Q100 v odvisnosti od velikosti prispevne površine (slika 4) je bolj usklajena z empiričnimi vrednostmi iz pravilnika (Pravilnik, 2007), kot bi to veljalo za vrednosti Q500/Q100 za porazdelitev Pearson 3.

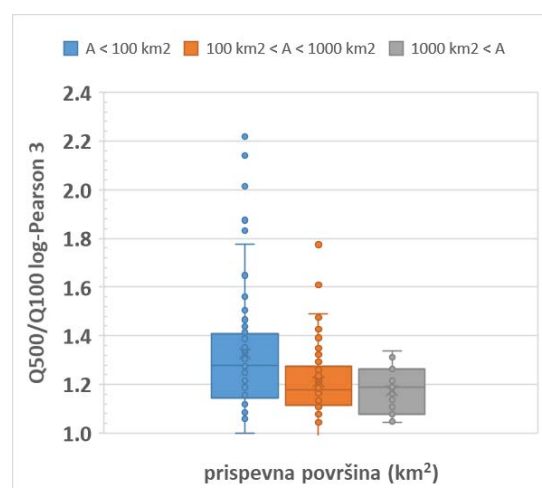
Razmerja med Q500 in Q100 smo posebej prikazali še po treh skupinah velikosti prispevne površine vodomernih postaj ARSO (sliki 5 in 6). Opazno velik raztros razmerij Q500/Q100 za manjše prispevne površine ($A < 100 \text{ km}^2$) je viden predvsem pri porazdelitvi Pearson 3 (slika 6) in je bistveno manjši za log-Pearsonovo porazdelitev (slika 6). Večinoma gre za hudourniška območja v Sloveniji, ki so značilno manjša od 100 km^2 . Med 150 vodomernimi postajami z znano prispevno površino ima 69 postaj prispevno površino manjšo od 100 km^2 , 66 postaj jo ima med 100 in 1000 km^2 , in 15 postaj ima prispevno površino nad 1000 km^2 .

Tako smo oblikovali tri skupine, skladno s pravilnikom (Pravilnik, 2007), ki podaja empirična razmerja med Q500 in Q100.



Slika 5: Razmerja Q500/Q100 po metodi Pearson 3 za različne velikosti prispevne površine 150 vodomernih postaj ARSO.

Figure 5: Q500/Q100 ratios according to the Pearson 3 method for different catchment areas of 150 ARSO monitoring stations.

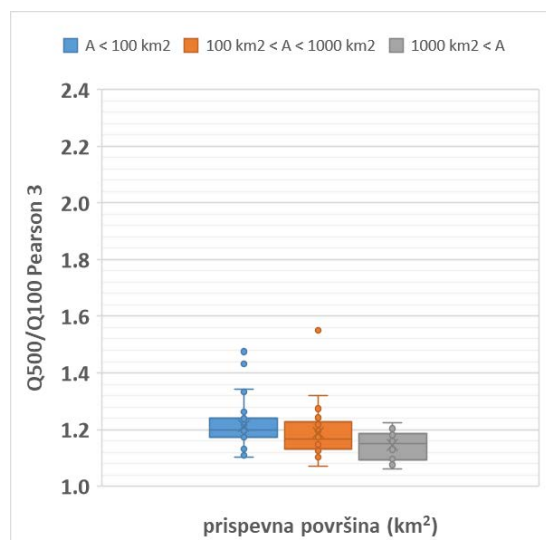


Slika 6: Razmerja Q500/Q100 po metodi log-Pearson 3 za različne velikosti prispevne površine 150 vodomernih postaj ARSO.

Figure 6: Q500/Q100 ratios according to the log-Pearson 3 method for different catchment areas of 150 ARSO monitoring stations.

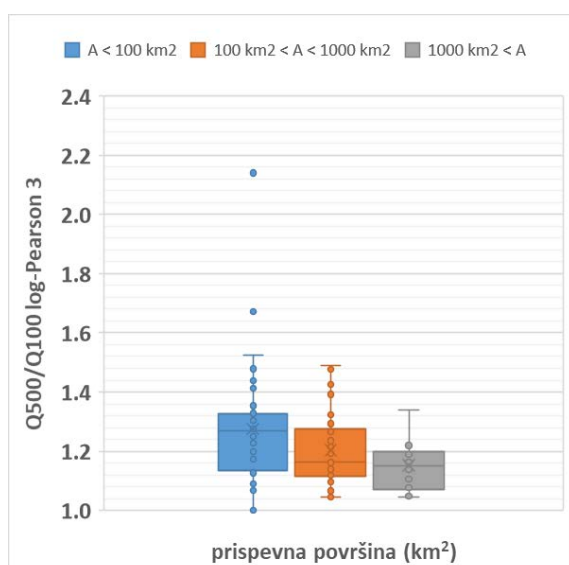
Kot je razvidno iz slik 5 in 6, je bolj skladna s pravilnikom porazdelitev log-Pearson 3, prikazana na sliki 6, ki pa kljub vsemu ne sledi popolnoma vrednostim iz Pravilnika (2007).

Za prispevne površine nad 1000 km^2 velja izraz iz pravilnika $Q500 = 1,2 Q100$ le za 50. centil, pri velikosti prispevne površine pod 100 km^2 pa velja izraz $Q500 = 1,4 Q100$ za 75. centil.



Slika 7: Razmerja Q_{500}/Q_{100} po metodi Pearson 3 za različne velikosti prispevne površine 113 vodomernih postaj ARSO z nad 30 let meritev.

Figure 7: Q_{500}/Q_{100} ratios according to the Pearson 3 method for different catchment areas of 113 ARSO monitoring stations with over 30 years of measurements.



Slika 8: Razmerja Q_{500}/Q_{100} po metodi log-Pearson 3 za različne velikosti prispevne površine 113 vodomernih postaj ARSO z nad 30 let meritev.

Figure 8: Q_{500}/Q_{100} ratios according to the log-Pearson 3 method for different catchment areas of 113 ARSO monitoring stations with over 30 years of measurements.

Še bolj zanimive rezultate primerjave Q_{500}/Q_{100} dobimo, če med seboj primerjamo le vodomerne postaje z vsaj 30 let meritev (sliki 7 in 8). Število

vodomernih postaj se ob upoštevanju tega pogoja seveda zmanjša, in sicer na 113 postaj: 45 postaj ima prispevno površino do 100 km², 56 postaj ima prispevno površino med 100 in 1000 km², ter 12 postaj nad 1000 km².

Merilo razmerij med Q_{500} in Q_{100} smo na slikah 7 in 8 ohranili enake kot na slikah 6 in 7 (od 1,0 do 2,4). Raztros vrednosti razmerij Q_{500}/Q_{100} je sedaj manjši za obe statistični porazdelitvi, morda bolj izrazito za porazdelitev Pearson 3 kot za log-Pearsonovo porazdelitev. V tej primerjavi vrednosti za razmerje Q_{500}/Q_{100} iz Pravilnika (2007) postanejo »višje« in presegajo 75. centil merjenih podatkov vodomernih postaj ARSO.

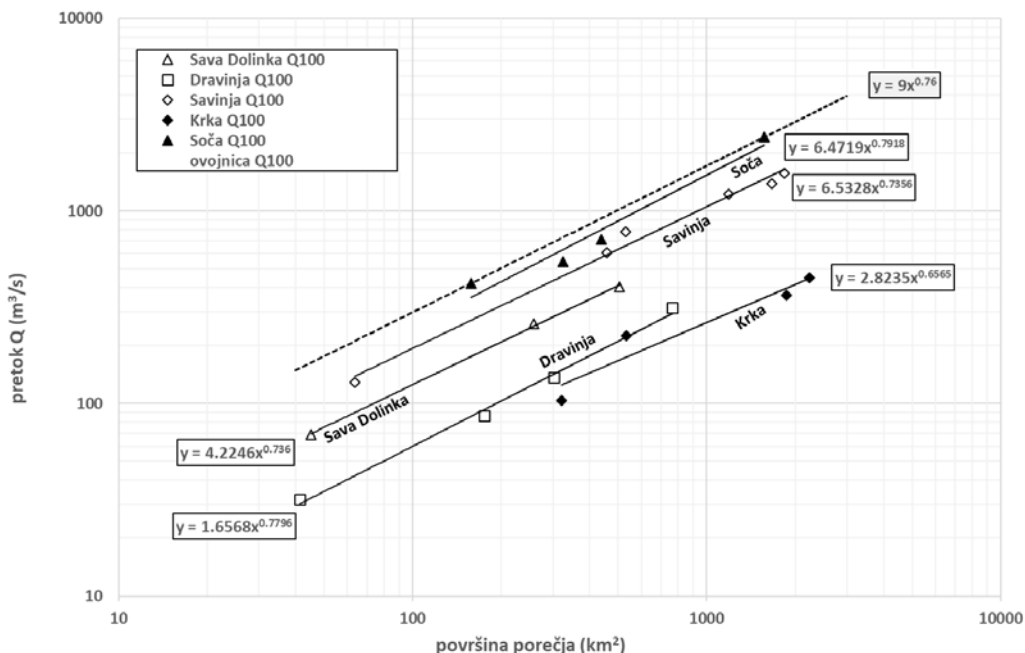
3.2 Odvisnost Q_{100} in Q_{500} od prispevne površine porečja v vzdolžnem prerezu

Da bi dobili boljši vpogled v statistično vrednotene pretoke Q_{100} in Q_{500} po obeh statističnih metodah, smo dodatno analizirali pretoke tudi v vzdolžnem prerezu izbranih vodotokov, kjer smo lahko imeli na istem vodotoku vsaj štiri vodomerne postaje, ki niso pod izrazitim človekovim posegom. Tako smo izbrali naslednjih pet slovenskih vodotokov: Dravinjo, Krko, Savo Dolinko, Savinjo in Sočo.

V vzdolžnem prerezu (odvisnost od prispevne površine) navedenih petih slovenskih rek smo primerjali statistične pretoke Q_{100} na sliki 9 in pretoke Q_{500} na sliki 10 za Pearsonovo 3 porazdelitev in za pretoke Q_{100} na sliki 11 in za pretoke Q_{500} na sliki 12 za log-Pearsonovo 3 porazdelitev. Analiza naj bi za vseh pet rek podala korelacijske izraze za odvisnost ekstremnih poplavnih pretokov Q_{100} in Q_{500} (m³/s) v odvisnosti od velikosti prispevne površine A (km²).

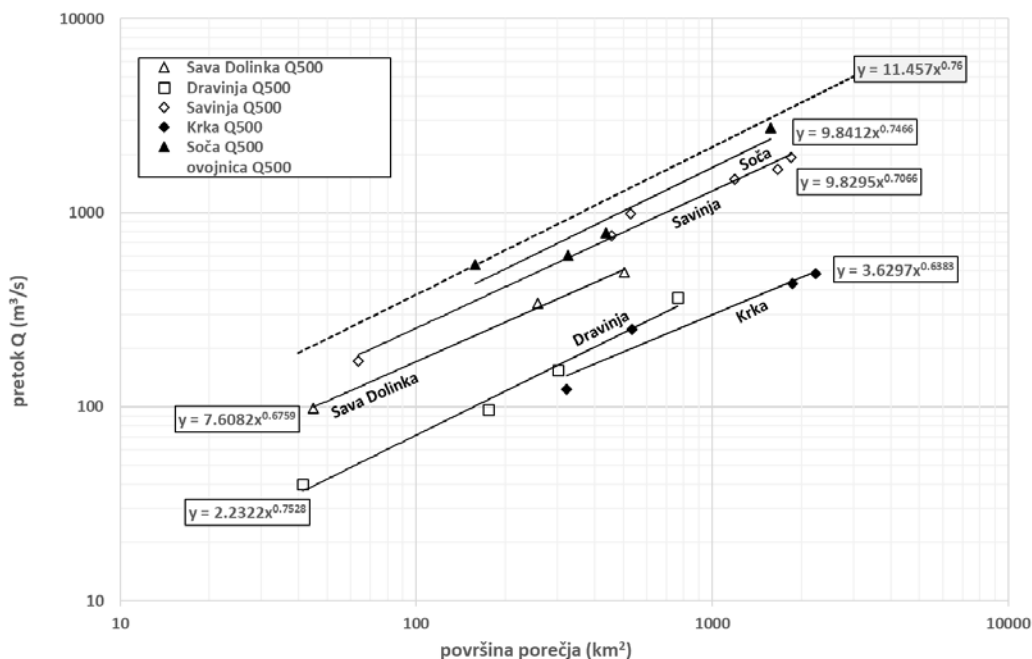
Iz obravnave smo izločili vodomerno postajo 3010 Podkoren na Savi Dolinki (obdobje meritev 1959–1991, 33 let), saj je statistični pretok $Q_{100} = 10,7$ m³/s in $Q_{500} = 14,4$ m³/s pri prispevni površini 30,22 km² nesorazmerno majhen – gre za problem ponikanja površinske vode iz doline Planice, ki se ne pojavi na vodomerni postaji Podkoren.

Na dvojnem logaritmičnem prikazu odvisnosti statistično izračunanih poplavnih pretokov Q_{100} in Q_{500} po obeh porazdelitvah (slike 9 do 12)



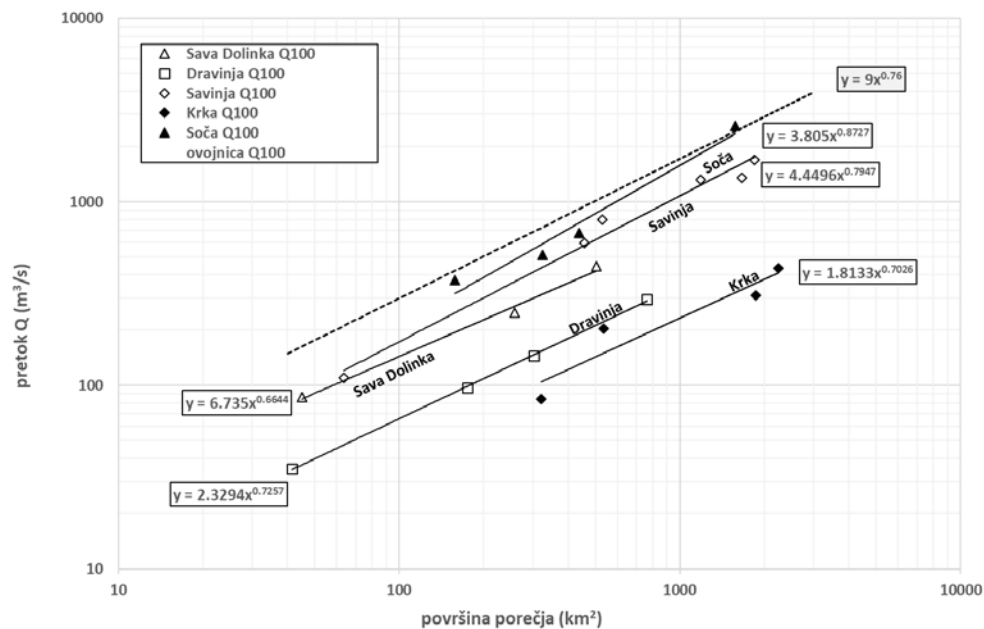
Slika 9: Pretoki Q_{100} v m^3/s za izbrane slovenske reke v odvisnosti od prispevne površine v km^2 z uporabo podatkov iz hidrološke mreže vodomernih postaj ARSO in porazdelitve Pearson 3. Ovojnica Q_{100} je podana s črtkano črto.

Figure 9: Q_{100} discharges in m^3/s for selected Slovenian rivers as a function of the catchment area in km^2 using data from ARSO hydrological monitoring stations and Pearson 3 distribution. The envelope Q_{100} is a dotted line.



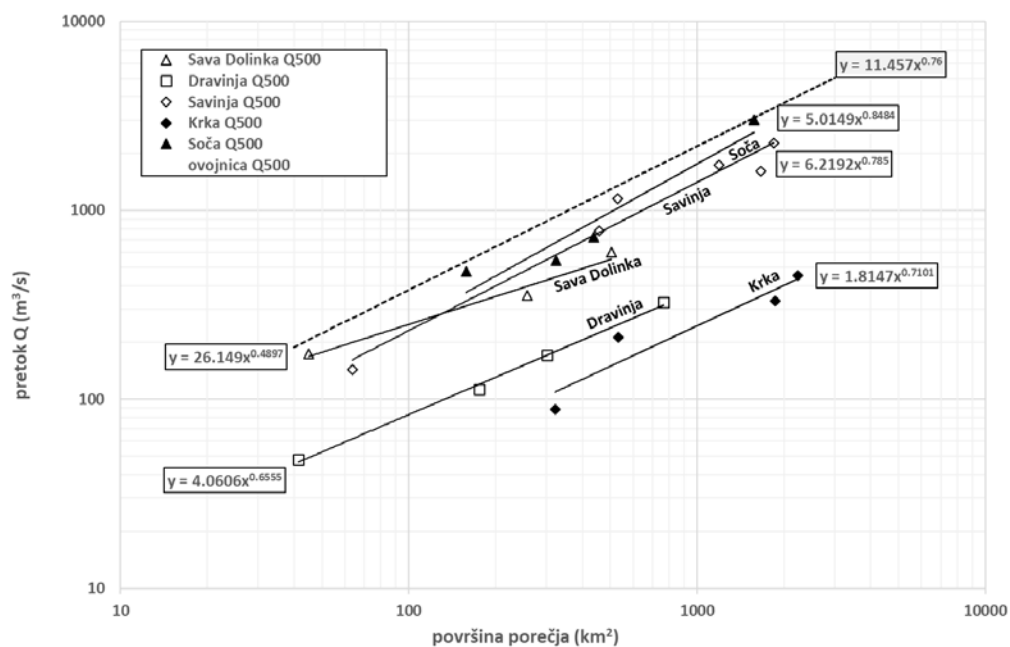
Slika 10: Pretoki Q_{500} v m^3/s za izbrane slovenske reke v odvisnosti od prispevne površine v km^2 z uporabo podatkov iz hidrološke mreže vodomernih postaj ARSO in porazdelitve Pearson 3. Ovojnica Q_{500} je podana s črtkano črto.

Figure 10: Q_{500} discharges in m^3/s for selected Slovenian rivers as a function of the catchment area in km^2 using data from ARSO hydrological monitoring stations and Pearson 3 distribution. The envelope Q_{500} is a dotted line.



Slika 11: Pretoki Q_{100} v m^3/s za izbrane slovenske reke v odvisnosti od prispevne površine v km^2 z uporabo podatkov iz hidrološke mreže vodomernih postaj ARSO in porazdelitve log-Pearson 3. Ovojnica Q_{100} je podana s črtkano črto.

Figure 11: Q_{100} discharges in m^3/s for selected Slovenian rivers as a function of the catchment area in km^2 using data from ARSO hydrological monitoring stations and log-Pearson 3 distribution. The envelope Q_{100} is a dotted line.



Slika 12: Pretoki Q_{500} v m^3/s za izbrane slovenske reke v odvisnosti od prispevne površine v km^2 z uporabo podatkov iz hidrološke mreže vodomernih postaj ARSO in porazdelitve log-Pearson 3. Ovojnica Q_{500} je podana s črtkano črto.

Figure 12: Q_{500} discharges in m^3/s for selected Slovenian rivers as a function of the catchment area in km^2 using data from ARSO hydrological monitoring stations and log-Pearson 3 distribution. The envelope Q_{500} is a dotted line.

lahko opazujemo povečevanje poplavnih pretokov z naraščanjem prispevne površine za vse slovenske reke.

Na slikah 9 do 12 ne podajamo ob enačbi podatka o regresijskem koeficientu R^2 , saj so vrednosti zaradi majhnega števila merjenih točk (3 do 5) večinoma višje od 0,9 in celo blizu 1,0, razen za reko Krko, kjer so vrednosti R^2 nekaj pod 0,9.

Večjih anomalij v poteku ni videti, regresijske krivulje tako za Q100 kot za Q500 potekajo za vseh pet rek v glavnem vzporedno – eksponent v potenčni enačbi (1) – gre za koeficient hudourniškega značaja porečja β – se giblje v večinoma med 0,65 in 0,80, z robnimi vrednostmi za pretok Q100:

$$\text{Krka: } Q_{100} = 2,824 A^{0,6565} \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (15)$$

$$\text{Soča: } Q_{100} = 3,805 A^{0,8727} \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (16)$$

in za pretok Q500:

$$\text{Krka: } Q_{500} = 3,6297 A^{0,6383} \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (17)$$

$$\text{Soča: } Q_{500} = 5,015 A^{0,8484} \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (18)$$

Regresijski enačbi za ovojnici sta za pretok Q100 (črtkana črta na sliki 9 in 11):

$$Q_{100} = 9,0 A^{0,76} \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (19)$$

in za pretok Q500 (črtkana črta na sliki 10 in 12):

$$Q_{500} = 11,457 A^{0,76} \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (20)$$

določeni neodvisno od statistične porazdelitve.

Povezava med ovojnicami za Q100 in Q500 sledi pogosto uporabljeni zvezi med poplavami različnih povratnih dob v istem hidrološkem prerezu:

$$Q_x = \left(\frac{t_x}{t_{100}}\right)^\gamma Q_{100} \text{ (m}^3\text{/s)}, \quad (21)$$

kjer je $t_{100} = 100$ let in Q_{100} (m³/s) poplava s 100-letno povratno dobo, Q_x (m³/s) poplava iskane povratne dobe t_x (let) ter γ (-) brezdimenzijski koeficient hidrološkega odziva porečja, neodvisen od povratne dobe in velikosti porečja. Vrednosti koeficienta γ se tipično gibljejo med 0,1 in 0,25 ter nakazujejo ekstremnost poplavnih dogodkov, nizke vrednosti ($\gamma \sim 0,10$) nakazujejo majhne razlike med pojavi povratne dobe 20 let, 100 let in 500 let –

Q20:Q100:Q500 = 0,851:1:1,175, visoke vrednosti ($\gamma \sim 0,25$) pa velike razlike – Q20:Q100:Q500 = 0,669:1:1,495.

3.3 Ovojnice poplavnih pretokov Q100 in Q500

Za slovenske reke se kažeta za določitev ovojnic poplavnih pretokov Q100 in Q500, določenih statistično na osnovi izmerjenih pretokov hidrološkega monitoringa ARSO naslednji vrednosti koeficientov v potenčni enačbi (1):

- specifični odtok z 1 km² porečja $\alpha = 9,0$ m³/s/km²,
- koeficient hudourniškega značaja porečja $\beta = 0,76$,
- koeficient hidrološkega odziva porečja $\gamma = 0,16$.

Vrednosti se lahko uporabljajo za prispevne površine večje od 100 km² do nekaj 1000 km².

V naslednjem koraku smo primerjali slovenske podatke o statistično izračunanih poplavnih pretokih s podatki iz mednarodne literature.

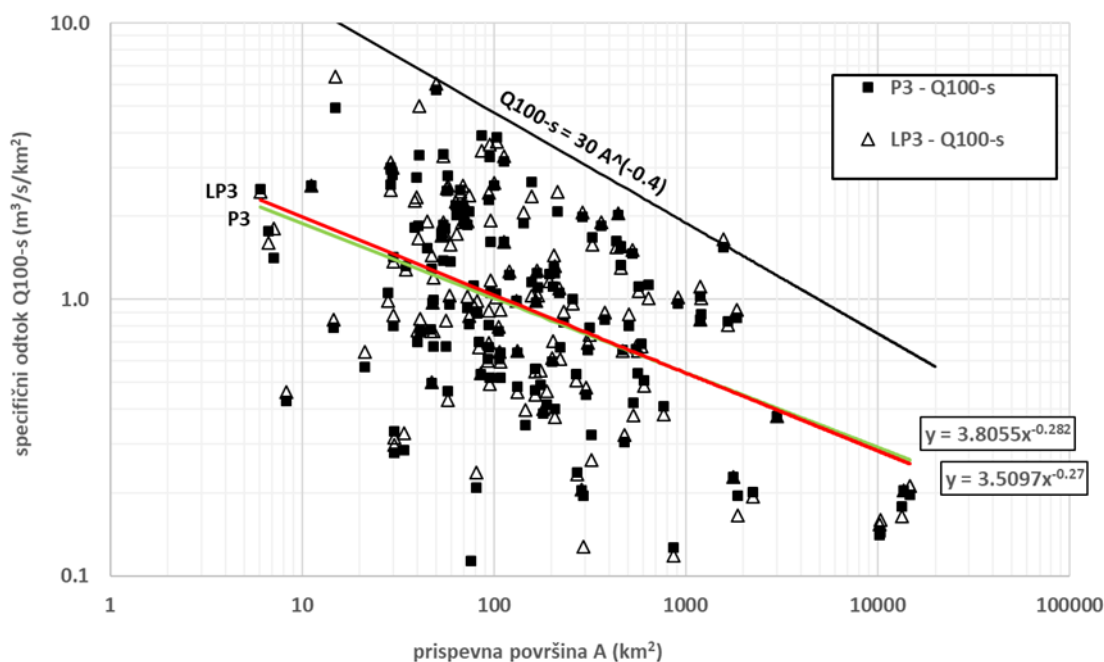
Najprej prikazujemo poplavne pretoke kot specifični odtok z 1 km² prispevne površine v odvisnosti od prispevne površine, torej skladno z enačbo (3) (sliki 13 in 14). Regresijski enačbi za obe statistični porazdelitvi (Pearsonovo 3 porazdelitev in log-Pearsonovo porazdelitev) sta zelo podobni, vrednosti regresijskega koeficienta za Q100-s sta nizki, a podobni za obe porazdelitvi (P3: $R^2 = 0,2394$ & LP3: $R^2 = 0,2342$), enako velja za Q500-s (P3: $R^2 = 0,2453$ & LP3: $R^2 = 0,2416$). Vrednosti kažejo na velik raztros statistično določenih vrednosti specifičnega odtoka v merilni mreži ARSO.

Kot ovojnici za pretoke Q100-s in Q500-s lahko zapišemo izraza:

$$Q_{100-s} = 30 A^{-0,4} \text{ (m}^3\text{/s/km}^2\text{)} \quad (22)$$

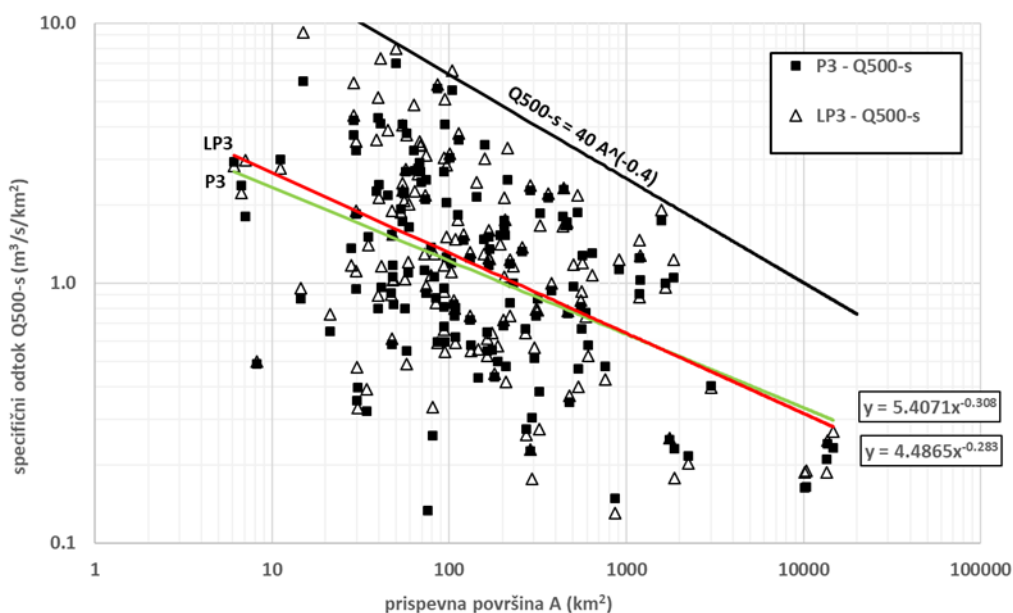
$$Q_{500-s} = 40 A^{-0,4} \text{ (m}^3\text{/s/km}^2\text{)} \quad (23)$$

kar je skladno z zaključki projekta HYDRATE, ki predlaga za ta del Evrope podobne vrednosti za ekstremne poplavne pretoke, vsekakor nižje od ovojnice v enačbi (4).



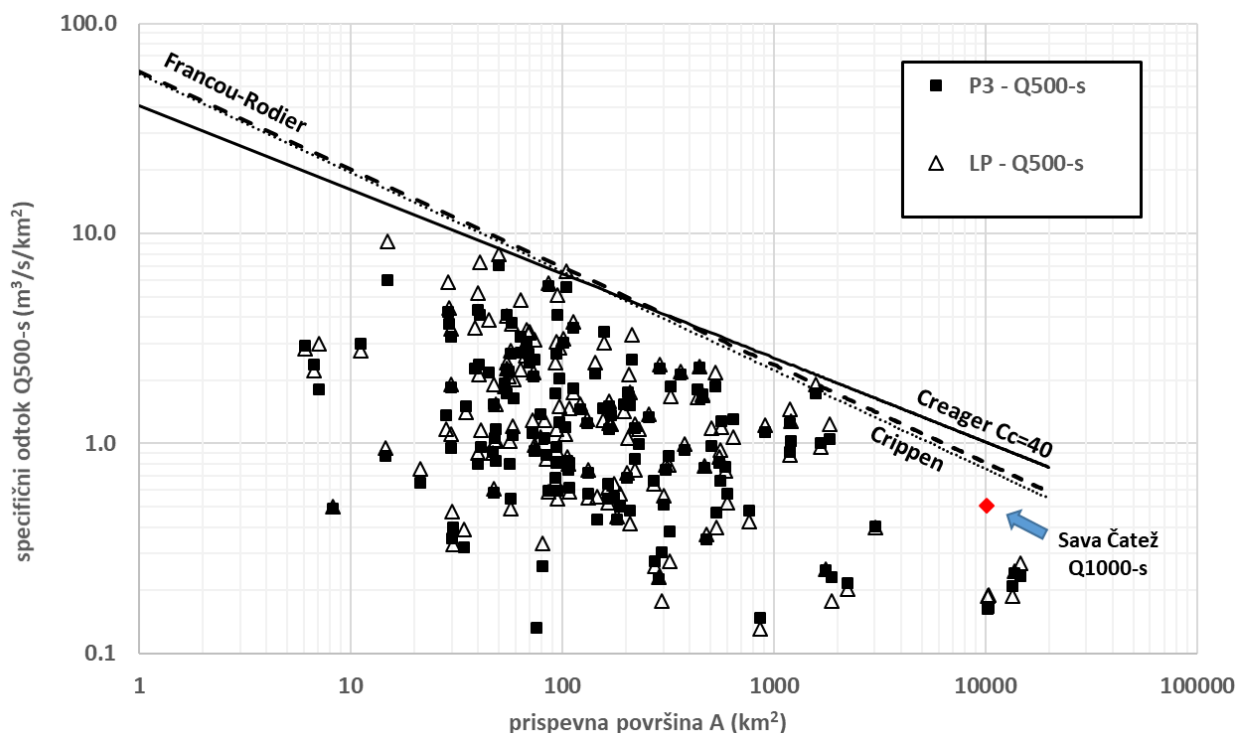
Slika 13: Specifični odtoki Q_{100-s} v $m^3/s/km^2$ za izbrane slovenske reke v odvisnosti od prispevne površine v km^2 z uporabo podatkov iz hidrološke mreže vodomernih postaj ARSO ter Pearson 3 (P3) in log-Pearsonove 3 (LP3) statistične porazdelitve.

Figure 13: Specific discharges Q_{100-s} in $m^3/s/km^2$ for selected Slovenian rivers as a function of the catchment area in km^2 using data from ARSO hydrological monitoring stations and Pearson 3 (P3) and log-Pearson 3 (LP3) distributions.



Slika 14: Specifični odtoki Q_{500-s} v $m^3/s/km^2$ za izbrane slovenske reke v odvisnosti od prispevne površine v km^2 z uporabo podatkov iz hidrološke mreže vodomernih postaj ARSO ter Pearson 3 (P3) in log-Pearsonove 3 (LP3) statistične porazdelitve.

Figure 14: Specific discharges Q_{500-s} in $m^3/s/km^2$ for selected Slovenian rivers as a function of the catchment area in km^2 using data from ARSO hydrological monitoring stations and Pearson 3 (P3) and log-Pearson 3 (LP3) distributions.



Slika 15: Specifični odtoki Q_{500-s} v $m^3/s/km^2$ za izbrane slovenske reke v odvisnosti od prispevne površine v km^2 z uporabo podatkov iz hidrološke mreže vodomernih postaj ARSO ter Pearson 3 (P3) in log-Pearsonove 3 (LP3) statistične porazdelitve – prikaz različnih ovojnica za načrtovanje visokih pregrad.

Figure 15: Specific discharges Q_{500-s} in $m^3/s/km^2$ for selected Slovenian rivers as a function of the catchment area in km^2 using data from ARSO hydrological monitoring stations and Pearson 3 (P3) and log-Pearson 3 (LP3) distributions – different envelope curves used in large dam design are shown.

Rezultate statistične analize ARSO smo primerjali še z empiričnimi enačbami, ki smo jih na področju načrtovanja visokih pregrad v svetu povzeli v poglavju 2. Na sliki 15 smo za slovenske podatke uporabili tri empirične enačbe in izrazi za ovojnico slovenskih ekstremnih poplavnih pretokov so naslednji:

- Creager (1945) in regionalni koeficient za Slovenijo $C_c = 40$:

$$Q = 52,12(0,386A)^{0,936A^{-0,048}} \quad (m^3/s) \quad (24)$$

- Francou-Rodier (1967) in za Slovenijo vrednost koeficienta $k = 4,7$:

$$\frac{Q}{10^6 m^3/s} = \left(\frac{A}{10^8 km^2}\right)^{0,53} \quad (m^3/s) \quad (25)$$

Izraz (25) lahko poenostavimo v:

$$Q = 57,5 A^{0,53} \quad (m^3/s) \quad (26)$$

- Crippen (1982) in za Slovenijo veljavni regionalni koeficienti $k_1 = 52$, $k_2 = 0,5$ in $k_3 = 0,1$:

$$Q = 52 A^{0,5} (A^{0,5} + 5)^{0,1} \quad (m^3/s) \quad (27)$$

Izraz (27) lahko za večja porečja ($A > 100 km^2$) poenostavimo:

$$\lim_{A \rightarrow \infty} (A^{0,5} + 5)^{0,1} = A^{0,05}$$

$$Q = 52 A^{0,55} \quad (m^3/s) \quad (28)$$

Vrednosti so podobne, kot smo jih določili s pomočjo specifičnih pretokov na sliki 14:

$$Q_{500} = 40 A^{0,6} \quad (m^3/s) \quad (29)$$

Če na sliki 15 dodatno upoštevamo podatek na spodnji Savi, in sicer za vodomerno postajo Sava – Čatež ($Q_{1000-s} = 0,50 m^3/s/km^2$; $Q_{1000} = 5130 m^3/s$, $A = 10186,45 km^2$), ki je povzet po študiji ARSO (2013), a ni izračunan s pomočjo Pearsonove 3 ali log-Pearsonove porazdelitve in je prikazan za

povratno dobo 1000 let, bi lahko sklepali, da je za prispevne površine nad 1.000 oz. 10.000 km² bolj primerna ovojnica po Francou-Rodierjevi enačbi (enačba 25 oz. 26) ali po Crippnovi enačbi (enačba 27 oz. 28) kot po Creagerjevi enačbi s koeficientom $C_c = 40$ (enačba 24). Creagerjeva enačba se precej ujema z ocenami maksimalnih možnih poplav (PMF – Maximum Probable Flood), ki so bile na območju spodnje Save ($A \sim 10.000$ km²) ocenjene na 7.000–11.000 m³/s (QPMF-s $\sim 0,7-1,1$ m³/s/km²) (povzeto po Širca, 2016: FGG, 2008; FGG, 2010a; 2010b).

4. Zaključki

Na osnovi izvedene analize statistične ocene poplavnih pretokov s povratno dobo 100 in 500 let, ki jih je na osnovi meritev 150 vodomernih postaj na slovenskih vodotokih opravila ARSO (2013) s pomočjo Pearsonove 3 porazdelitve in log-Pearsonove porazdelitve, lahko zaključimo:

- Empirične vrednosti poplavnih pretokov Q100 in Q500, ki jih je analizirala in povzela Agencija za okolje Republike Slovenije v svoji študiji (ARSO, 2013), naj se uporabljajo le izjemoma, kadar ni možno pripraviti posebne hidrološko-hidravlične študije, torej le za predhodne in grobe ocene pretokov, predvsem na nemerjenih porečjih.
- Uporabo statističnih vrednosti Q100 in Q500 na porečjih s prispevnimi površinami do 100 km² odsvetujemo, saj so večinoma nizi meritev pri teh prispevnih površinah relativno kratki (slika 2) in negotovost ocene Q100 in Q500 prevelika (predvsem pa neznan) za uporabo v inženirski praksi. Prav upoštevanje negotovosti pri načrtovanju inženirskih gradenj in objektov na vodotokih oziroma vodarskih ukrepov je nujen korak, ki ga mora storiti vodarska stroka (Šraj et al., 2019).
- Za porečja (v tem primeru večinoma hudourniška območja) s prispevnimi površinami do 100 km² priporočamo za predhodne ocene poplavnih pretokov višje vrednosti od podanih v študiji ARSO (2013), saj so odstopanja vrednosti v študiji ARSO (2013) s primeri iz svetovne literature velika.

- Prednost pri ocenjevanju ekstremnih poplavnih pretokov za manjša in večja porečja naj dobijo: i) povratne analize dejanskega dogajanja v času ekstremnih hudourniških poplav, ki se izvedejo po dogodkih ob upoštevanju vseh razpoložljivih podatkov in najboljših tehnik in orodij za simulacijo poplavnih dogodkov (npr. Gaume et al., 2009; Rusjan et al., 2009; Grillakis et al., 2010; Lumbroso and Gaume, 2012); ii) kombiniranje poplavnih dogodkov na merjenih mestih z ocenjenimi konicami poplavnih dogodkov na nemerjenih mestih v okviru regionalnih analiz verjetnosti nastopa poplavnih dogodkov (npr. Gaume et al., 2010); iii) uporaba sodobnih simulacijskih orodij, npr. porazdeljenih hidroloških modelov (npr. LISFLOOD in HBV – npr. Van der Knijff et al., 2010; Kobold et al., 2006; Grillakis et al., 2010; Brilly et al., 2018), ki za večja porečja omogočajo umerjanje modelov na pretekle poplavne dogodke (Vidmar et al., 2020).
- Moderni izzivi pred hidrološko znanostjo so povezani z napovedovanjem ekstremnih hidroloških pojavov, v veliki meri povezano s podnebnimi spremembami in iskanjem odgovorov na spreminjanje vodnega kroga (npr. Duethmann et al., 2020), ki je stalnica v hidrologiji (Koutsoyiannis, 2013).

Empirične enačbe, ki se uporabljajo v inženirski praksi, so lahko uporabno orodje na terenu in pri iskanju grobih ocen za vrednosti hidroloških spremenljivk, a so stvar preteklosti in so lahko le opora mladim generacijam inženirjev, ko ocenjujejo realnost rezultatov (njihov velikostni razred) vse bolj in bolj kompleksnih računalniških hidroloških modelov.

Zahvala

Analiza je potekala v okviru aktivnosti raziskovalnega programa P2-0180 Vodarstvo in geotehnika, ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS).

Viri

ARSO (2013). Povratne dobe velikih in malih pretokov za merilna mesta državnega hidrološkega monitoringa površinskih voda. Sektor za analize in prognoze površinskih voda, Urad za hidrologijo in stanje okolja, Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana. 33 str.

<http://www.arso.gov.si/vode/podatki/Povratne%20dobe%20Qvk%2cQnp.pdf> (in Slovenian) (Pridobljeno 25. 7. 2020)

Brilly, M., Kryžanowski, A., Šraj, M., Bezak, N., Sapač, K., Vidmar, A., Rusjan, S. (2018). Historical, Hydrological and Hydraulics Studies for Sustainable Flood Management. V: Komatina, D. (ur.): Achievements and Challenges of Integrated River Basin Management, Chapter 5, 69-84. Rijeka: IntechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.74432>.

Castellarin, A. (2007). Probabilistic envelope curves for design flood estimation at ungauged sites. *Water Resources Research* **43**, W04406. <http://dx.doi.org/10.1029/2005WR004384>.

Chaves, L. G., Studart, T. M. C., Campos, J. N. B., Souza Filho, F. A. (2017). Regional envelope curves for the state of Ceará: a tool for verification of hydrological dam safety. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos = Brazilian Journal of Water Resources* **22**, e29. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.021720160062>.

Creager, W. P., Justin, J. D., Hinds, J. (1945). Engineering for Dams, Vol. I. General Design. John Wiley & Sons, New York.

Creager, W. P., Justin, J. D., Hinds, J. (1966). Engineering for Dams, Vol. I. General Design. John Wiley, Hoboken, N. J.

Crippen, J. R. (1982). Envelope curves for extreme flood events. *Journal of the Hydraulics Division* **108**(10), 1208–1212.

Direktiva (2007). Direktiva 2007/60/ES Evropskega parlamenta in Sveta z dne 23. oktobra 2007 o oceni in obvladovanju poplavne ogroženosti (Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks). Official Journal of the European Union, L 288/27, 27–34. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2007/60/oj> (Pridobljeno 31. 7. 2020).

Duethmann, D., Blöschl, G., Parajka, J. (2020). Why does a conceptual hydrological model fail to correctly predict discharge changes in response to climate change?

Hydrology and Earth System Sciences **24**, 3493–3511. <https://doi.org/10.5194/hess-24-3493-2020>.

FGG (2008). Medsebojni vplivi infrastrukturnih in energetskih ureditev na spodnji Savi v času izrednih hidroloških dogodkov – Model Save – Izračun verjetne visoke vode (PMF). Ljubljana; Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko.

FGG (2010a). Izračun PMF na osnovi pretoka reke Save pri poplavnem valu leta 1990 določenega s simulacijo hibridnih modelov. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko.

FGG (2010b). Preparation of a New Revision of the PMF Study and Conceptual Design Package for Flood Protection of NPP Krško (Report according to the ANSI standard). Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Francou, J., Rodier, J.A. (1967). Essai de classification des crues maximales observées dans le monde. *Cahiers ORSTOM, Serie Hydrologie* **4**(3), 19–46.

Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., Blaškovičova, L., Blöschl, G., Borga, M., Dumitrescu, A., Daliakopoulos, I., Garcia, J., Irimescu, A., Kohnova, S., Koutroulis, A., Marchi, L., Matreata, S., Medina, V., Preciso, E., Sempere-Torres, D., Stancalie, G., Szolgay, J., Tsanis, I., Velasco, D., Viglione, A. (2009). A compilation of data on European flash floods, *Journal of Hydrology* **367**, 70–78. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.028>.

Grillakis, M. G., Tsanis, I.K., Koutroulis, A. G. (2010). Application of the HBV hydrological model in a flash flood case in Slovenia. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **10**, 2713–2725. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-10-2713-2010>.

Herschy, R.W. (2002). The world's maximum observed floods. *Flow Measurement and Instrumentation* **13**(5–6), 231–235.

International Association of Hydrological Sciences (IAHS), 2003. World Catalogue of Maximum Observed Floods. IAHS Press, IAHS Publication 284, 285 str. Dostopno na: <http://hydrologie.org/redbooks/a284/RB284.pdf> (Pridobljeno 5. 8. 2020).

Kobold, M., Brilly, M. (2006). The use of HBV model for flash flood forecasting. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **6**, 407–417. <https://doi.org/10.5194/nhess-6-407-2006>.

- Koutsoyiannis, D. (2013). Hydrology and change. *Hydrological Sciences Journal* 58(6), 1177–1197, <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.804626>.
- Lumbroso, D., Gaume, E. (2012). Reducing the uncertainty in indirect estimates of extreme flash flood discharges. *Journal of Hydrology* 414–415, 16–30. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.08.048>.
- Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., Gaume, E. (2010). Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *Journal of Hydrology* 394, 118–133. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.017>.
- Mikoš, M., Brilly, M., Ribičič, M. (2004). Poplave in zemeljski plazovi v Sloveniji = Floods and Landslides in Slovenia. *Acta hydrotechnica* 22/37, 113–133. <https://actahydrotechnica.fgg.uni-lj.si/si/paper/a37mm>.
- MOP (2012). Poročilo o določitvi območij pomembnega vpliva poplav v Republiki Sloveniji in spremljanju aktivnosti obvladovanja poplavne ogroženosti na območjih pomembnega vpliva poplav (Report on the determination of areas of significant flood impact in the Republic of Slovenia and the monitoring of flood risk management activities in areas of significant flood impact). Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor, 28 str. http://mop.arhiv-spletisc.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/podrocja/voda/porocilo_OPVP.pdf. (in Slovenian) (Pridobljeno 31. 7. 2020).
- MOP (2019). Predhodna ocena poplavne ogroženosti Republike Slovenije (2019) (Preliminary assessment of flood risk in the Republic of Slovenia). Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor, 173 str. http://mop.arhiv-spletisc.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/podrocja/voda/predhodna_ocena_poplavne_ogorzenosti/predhodna_ocena_poplavne_ogorzenosti_2019.pdf. (in Slovenian) (Pridobljeno 31. 7. 2020).
- MOP (2020). Karta posodobljenih 86 območij pomembnega vpliva poplav. Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor. http://mop.arhiv-spletisc.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/podrocja/voda/predhodna_ocena_poplavne_ogorzenosti/1_Karta_posodobljenih_86_OPVP.pdf. (in Slovenian) (Pridobljeno 31. 7. 2020).
- Papp, F. (2001). The extremeness of extremes: extraordinary floods. *IAHS Publications* 271, 375–378.
- Pravilnik (2007). Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti (Rules on methodology to define flood risk areas and erosion areas connected to floods and classification of plots into risk classes). Uradni list RS, št. 60. <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV8318> (in Slovenian) (Pridobljeno 1. 12. 2018).
- Rusjan, S., Kobold, M., Mikoš, M. (2009). Characteristics of the extreme rainfall event and consequent flash floods in W Slovenia in September 2007. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9(3), 947–956. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-947-2009>.
- Širca, A. (2016). Ukrepi za prilagoditev NE Krško na stanje po izgradnji HE Brežice. V: Zbornik prispevkov 16. posvetovanja SLOCOLD. Ljubljana: Slovenski nacionalni odbor za velike pregrade, 15–35. <https://www.infra.si/pdf/projekti/he-brezice/16-posvetovanje-Slocold-12-maj-2016.pdf> (in Slovenian) (Pridobljeno 31.8.2020).
- Šraj, M., Mikoš, M., Bezak, N. (2019). Hidrometeorološki ekstremi in vrednotenje njihovih sprememb na osnovi merjenih podatkov (Hydrometeorological extremes and evaluation of their changes on the basis of measured data). Zbornik Mišičevega vodarskega dneva 2019, 75-81. Dostopno na: <http://www.mvd20.com/LETO2019/R11.pdf> (Pridobljeno 27. 7. 2020).
- Uredba (2008). Uredba o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja (Decree on conditions and limitations for constructions and activities on flood risk areas). Uradni list RS, št. 89/08, str. 12205. <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED4840#> (in Slovenian) (Pridobljeno 10. 8. 2020).
- Uredba (2020). Uredba o spremembah in dopolnitvah Uredbe o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja (Decree amending Decree on conditions and limitations for constructions and activities on flood risk areas). Ur. list RS, 49/20. <http://pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED8054> (in Slovenian) (Pridobljeno 10. 8. 2020).
- Van Der Knijff, J.M., Younis, J., De Roo, A.P.J. (2010). LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation. *International Journal of Geographical Information Science* 24(2), 189–212. <https://doi.org/10.1080/13658810802549154>.

Vidmar, A., Brilly, M., Sapač, K., Kryžanowski, A. (2020). Efficient Calibration of a Conceptual Hydrological Model Based on the Enhanced Gauss–Levenberg–Marquardt Procedure. *Applied Sciences* **10(11)**, 3841. <https://doi.org/10.3390/app10113841>

ZV-1-NPB8 (2020). Zakon o vodah (ZV-1) – neuradno prečiščeno besedilo št. 8. <http://pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO1244> (in Slovenian) (Pridobljeno 31. 7. 2020).