

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Katedra za splošno hidrotehniko

Hajdrihova 28

1000 Ljubljana, Slovenija

telefon + 386 (01) 4254 052

faks + 386 (01) 2519 897

RAZVOJ METODOLOGIJE ZA IZRAČUN VISOKOVODNIH VALOV NA PODLAGI EKSTREMNIH PADAVINSKIH DOGODKOV

Končno poročilo

Ljubljana, marec 2023

Ime projekta	Razvoj metodologije za izračun visokovodnih valov na podlagi ekstremnih padavinskih dogodkov
Šifra projekta	V2-2137
Financiranje projekta	Ministrstvo za okolje in prostor (pogodba št. 2550-22-441002) Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije
Vodja projekta	prof. dr. Mojca Šraj, univ. dipl. ing. gr.
Avtorji	doc. dr. Nejc Bezak, univ. dipl. ing. gr. asist. dr. Klaudija Lebar, univ. dipl. inž. vod. in kom. inž. prof. dr. Matjaž Mikoš, univ. dipl. ing. gr. izr. prof. dr. Simon Rusjan, univ. dipl. inž. vod. in kom. inž. prof. dr. Mojca Šraj, univ. dipl. ing. gr.

Kazalo vsebine

1	Uvod	10
1.1	Pregled literature s področja določanja projektnih pretokov in hidrogramov	12
2	Izračun projektnih hidrogramov na podlagi merjenih podatkov o pretokih	22
2.1	Manj kompleksne metode	22
2.2	Kompleksnejša metoda.....	27
3	Izračun projektnih hidrogramov na podlagi podatkov o projektnih padavinah oziroma brez uporabe podatkov o pretokih.....	33
3.1	Manj kompleksne metode	33
3.1.1	Regionalne empirične krivulje	33
3.1.2	Hidrološki modeli z upoštevanjem projektnih padavin.....	37
3.1.2.1	Karte ekstremnih padavin za različne vrednosti povratnih dob (ARSO)	38
3.1.2.2	Karte Huffovih krivulj, ki opisujejo porazdelitev padavin znotraj padavinskega dogodka	39
3.1.2.3	Sočasnost nastopa padavinskih dogodkov v Sloveniji	45
3.1.2.4	Parametri hidrološkega modela in izpeljava nove enačbe za izračun časa zakasnitve za porečja v Sloveniji.....	52
3.2	Kompleksnejša metoda.....	63
3.2.1	Simulacije z uporabo stohastičnega padavinskega modela in uporabo hidrološkega modela padavine-odtok v primeru manjših porečij	64
3.2.2	Vpliv prostorske nehomogenosti ekstremnih padavin z uporabo hidrološkega modela padavine-odtok v primeru večjih porečij.....	69
4	Usklajevanje, sinteza in diseminacija predlagane metodologije za določanje projektnih pretokov in hidrogramov	75
4.1	Usklajevanje predlagane metodologije s stroko in diseminacija.....	75
4.2	Povzetek predlagane metodologije za določanje projektnih pretokov in hidrogramov	77
5	Zaključki.....	79
6	Reference.....	82
	Priloga 1: Interpolirane karte Huffovih krivulj	90

Kazalo slik

Slika 1: Odvisnost visokovodnih konic in pripadajočih prostornin za vodomerno postajo Litija na reki Savi za obdobje 1953-2010 (Brilly et al., 2015).	12
Slika 2: Rezultati verjetnostnih analiz in koeficientov odtoka pripadajočih visokovodnih dogodkov za dve porečji v Avstriji. Privzeto po Merz and Blöschl (2008).....	16
Slika 3: Trije različni primeri rezultatov verjetnostnih analiz z upoštevanjem negotovosti in mej zaupanja (Piry, 2020).	17
Slika 4: Primer prikaza rezultatov verjetnostnih analiz za vodomerno postajo Kobarid na Soči z uporabo teoretične porazdelitvene funkcije GEV za stacionarno stanje in tri nestacionarne modele, kjer NSt predstavlja nestacionarni model z vgrajenim časovnim trendom spreminjanja visokovodnih konic v parameter lokacije, NSt2 predstavlja nestacionarni model z vgrajenim časovnim trendom spreminjanja visokovodnih konic v parameter lokacije in parameter merila in NSP predstavlja nestacionarni model, kjer je v parameter lokacije vgrajena odvisnost od letnih količin padavin (Šraj et al., 2016).....	21
Slika 5: Primer rezultatov verjetnostnih analiz z upoštevanjem intervalov zaupanja. Podobni rezultati so pripravljeni za 179 vodomernih postaj v Sloveniji, kjer so bili na voljo merjeni podatki o pretokih (Piry, 2020).....	24
Slika 6: Primer rezultatov verjetnostnih analiz za postajo Litija na reki Savi z upoštevanjem največjih letnih konic pretokov za obdobje 1895–2018	25
Slika 7: Primer hidrogramov po metodi TFH skupaj z upoštevanjem intervalov zaupanja.	25
Slika 8: Kompleksnejša metodologija določanja projektnih pretokov, ki so jo predlagali Brunner et al. (2017).	28
Slika 9: Primer izločanja baznega odtoka za vodometno postajo Dravograd na reki Dravi. Prikazani so največji letni hidrogrami za obdobje 1996–2001. Prva vrsta hidrogramov prikazuje rezultate po metodi a) (WMO, 2008), druga vrsta po metodi b) Nathan and McMahon (1990) in tretja vrsta po metodi c) (Eckhardt, 2005). X os prikazuje trajanje hidrograma v urah od začetne do končne točke (površinski odtok enak baznemu), glede na izbrano metodo izločanja baznega odtoka. Rdeča črta označuje ocenjeni bazni odtok in črna so merjeni urni podatki o pretokih.	29
Slika 10: Primer normalizacije podatkov o visokovodnih hidrogramih glede na podatek o trajanju visokovodnega vala in razmerju med prostornino in trajanjem visokovodnega vala. Prikazani so visokovodni valovi z vodomerne postaje Dravograd na reki Dravi.	29
Slika 11: Primer izbranega normaliziranega tipičnega hidrograma (modra črta) in poenostavljen opis oblike z uporabo gama porazdelitve (zelena črta).	30
Slika 12: Prikaz ujemanja med izbranimi robnimi porazdelitvenima funkcijama GEV (zgoraj) in izbrano funkcijo kopula Joe (spodaj), kjer je prikazanih 10.000 generiranih parov podatkov na podlagi	

ocenjenega parametra Joe kopule. Črne točke prikazujejo simulirane vrednosti in rdeče izmerjene podatke.	30
Slika 13: Primerjava med povratnimi dobami (OR in AND), ki nastopajo v multivariatnih analizah, in »klasičnimi« povratnimi dobami, s katerimi se srečamo pri univariatnih analizah (npr. verjetnostne analize pretokov). Slika je povzeta po Šraj et al. (2013).	31
Slika 14: Prikaz najprimernejše izbire kombinacije pretoka in volumna vala v primeru multivariatnih povratnih dob. Slika je povzeta po Brunner et al. (2016).	32
Slika 15: Primer projektnih hidrogramov z 10-letno povratno dobo glede na definicijo povratne dobe AND (leva slika) ter glede na definicijo povratne dobe OR (desna slika). X os prikazuje trajanje pretoka v urah, y-os pa vrednosti pretokov v m ³ /s (opomba:skali ordinate nista enaki). Prikazani so rezultati analiz za vodomerno postajo Dravograd na reki Dravi.	32
Slika 16: Prikaz regionalnih verjetnostnih empiričnih krivulj za pretok s 100-letno povratno dobo za porečje reke Ljubljanice (glede na ARSO postaje z oznako 5000). Povzeto po Piry (2020).	35
Slika 17: Prikaz vpliva razporeditve padavin znotraj padavinskega dogodka na vrednosti pretokov (levo) (povzeto po Dolšak et al. (2015)). Prikaz krivulj ITP in Huffovih krivulj za meteorološko postajo Ljubljano-Bežigrad (desno) (povzeto po Bezak et al. (2017))	37
Slika 18: Primer kart količine ekstremnih padavin (v mm) z resolucijo 1 x 1 km (ARSO) za povratno dobo 100 let s trajanjem padavin 30 min (zgoraj) in 1440 min (1 dan; spodaj).	39
Slika 19: Primer Huffovih krivulj za postajo Ljubljana Bežigrad in sicer za dve različni trajanji (manj kot 6 ur (levo) ter med 6 in 12 ur (desno). Povzeto po Dolšak et al. (2015).	40
Slika 20: Prikaz lokacij 30 postaj, ki so služile za izhodišče priprave prostorskih kart Huffovih krivulj. Na zgornji sliki je podlaga digitalni model višin, na spodnji sliki pa letna količina padavin v mm za obdobje 1961–2015.	41
Slika 21: Primer Huffovih krivulj za postajo Bilje za trajanje padavin v 1. razredu. Prikazane so 10- (oranžna), 50- (modra) in 90-percentilne krivulje (siva).	42
Slika 22: Primer rezultatov prostorske interpolacije z uporabo EDK metode glede na upoštevanje LOCV. X-os prikazuje točkovne dejanske vrednosti Huffovih krivulj, Y-os pa ocenjene glede na rezultat interpolacije.	43
Slika 23: Primer interpoliranih vrednosti Huffovih za primer 50-percentilne krivulje in trajanje padavin, krajše od 6 ur. Vsaka izmed kart predstavlja stanje ob določenem normaliziranem času (med 0,1 in 0,9, s korakom 0,1 normaliziranega časa). V času 0 je količina padavin enaka 0, v času 1 pa skupni količini padavin za izbran dogodek (količina, ki je določena glede na povratno dobo padavin in trajanje padavinskega dogodka). Vrednosti na kartah (legenda) prikazujejo normalizirane vrednosti padavin za določen normaliziran časovni korak.	44

Slika 24: Primerjava prostorsko povprečenih Huffovih krivulj (porečje Savinje) in točkovnih Huffovih krivulj za padavinsko postajo Celje (trajanje padavin, krajše od 6 ur). Upoštevano je porečje Savinje do vodomerne postaje Celje.	45
Slika 25: Izbrane padavinske postaje, kjer je na voljo vsaj 5 let dnevnih podatkov o padavinah v obdobju 2000-2019.....	46
Slika 26: Sočasnost nastopa padavinskih dni z več kot 40 mm padavin. Podane vrednosti so v km in prikazana je povprečna vrednost prostorske sočasnosti nastopa za vse dni z več kot 40 mm padavin.	47
Slika 27: Odvisnost povprečne sočasnosti nastopa padavinskih dni z vsaj 40 mm padavin od nadmorske višine postaje (levo) in X koordinate postaje (desno).	47
Slika 28: Sočasnost nastopa padavinskih dni z več kot 20 mm (zgoraj) in 50 mm (spodaj) padavin. Podane vrednosti so v km in prikazana je povprečna vrednost prostorske sočasnosti nastopa glede na izbrano dnevno mejo (ali vsaj 20 ali vsaj 50 mm).....	48
Slika 29: Interpolirana karta sočasnosti nastopa za primer dnevne količine padavin vsaj 40 mm (povprečna sočasnost) v km (zgoraj). Spodaj so rezultati LOCV za ta primer, uporabljena je bila OK metoda.	49
Slika 30: Prikaz postaj z razpoložljivimi urnimi podatki o padavinah v obdobju 2016–2020, uporabljenih za analizo prostorske sočasnosti nastopa padavin. Povzeto po Serwinska (2022).	50
Slika 31: Analize sočasnosti nastopa padavin z uporabo mejne urne vrednosti padavin 12 mm za postaje na porečju reke Save. Povzeto po Serwinska (2022).	51
Slika 32: Prikaz rezultatov analiz sočasnosti nastopa padavin z urnimi vrednostmi > 6 mm (levo) in > 12 mm (desno). Povzeto po Serwinska (2022).	51
Slika 33: Karta hidroloških skupin tal, ki je bila pripravljena v okviru raziskovalnega projekta V4-1066 (UL BF, 2011)	54
Slika 34: Spreminjanje parametra CN od količine padavin za primer porečja na Poljskem z večinoma kmetijsko rabo (modra krivulja na levi sliki) in za primer porečja Mačkovega grabna (oranžna krivulja na desni sliki). Leva slika je povzeta po Banasik and Woodward (2010), desna pa po Heco (2015) ...	55
Slika 35: Prostorski prikaz izbranih porečij na karti Slovenije. Porečja so prikazana kot poligoni, vodotoki pa kot modre linije. Povzeto po Mavri (2022).	57
Slika 36: Primer izbranega dogodka za postajo Cerknica na Cerkniščici (povzeto po Mavri, 2022). Podatki so bili pridobljeni iz vodomerne postaje Cerknica I in padavinske postaje Iška vas.	57
Slika 37: Primer odvisnosti lastnosti porečij in časa zakasnitve za 20 analiziranih porečij. Zgornji primer prikazuje odvisnost med korenem naklona vodotoka in povprečnih časom zakasnitve T_p , spodnji primer pa odvisnost med razdaljo L_c in časom T_p	58
Slika 38: Primer izračunov časa T_p po enačbi 6 za 20 obravnavanih porečij in primerjava s T_p , ki so bili določeni glede na merjene podatke o pretokih in padavinah (povprečje petih izbranih visokovodnih dogodkov). Vrednost Pearsonovega koeficienta korelacije znaša 0,811. Povzeto po Mavri (2022). ...	60

Slika 39: Primer izračunov časa T_p po enačbi 7 za 20 obravnavanih porečij in primerjava s T_p , ki so bili določeni glede na merjene podatke o pretokih in padavinah (povprečje petih izbranih visokovodnih dogodkov). Vrednost Pearsonovega koeficienta korelacije znaša 0,829. Povzeto po Mavri (2022). ...	60
Slika 40: Primerjava T_p določenih na podlagi meritev in izračunanih glede na splošno enačbo Snyder.	61
Slika 41: Primer enega izmed izbranih dogodkov padavine-odtok za porečje Medije (vodomerna postaja Zagorje), ki smo jih uporabili za validacijo ustreznosti izpeljanih enačb.	62
Slika 42: Primer ujemanja simuliranih (modra črta) in merjenih pretokov (črna črta) za dogodek, ki se je zgodil na vodomerni postaji Zagorje (Medija) julija 2019. Modri stolpci so padle padavine, rdeči stolpci so padavinske izgube. Za oceno časa zakasnitve je bila uporabljena enačba 7.	62
Slika 43: Primer ujemanja simuliranih (modra črta) in merjenih pretokov (črna črta) za dogodek, ki se je zgodil na vodomerni postaji Zagorje (Medija) septembra 2014. Modri stolpci so padle padavine, rdeči stolpci so padavinske izgube. Za oceno časa zakasnitve je bila uporabljena enačba 7.	63
Slika 44: Primer uporabe stohastičnega modela padavin oz. simulacije urnih padavin za približno 13 let z urnim časovnim korakom. Celotna količina simuliranih padavin je znašala 16936 mm (letno približno 1300 mm) v primeru na levi sliki in 19378 mm (letno približno 1490 mm) v primeru na desni sliki. Prikazani so rezultati za padavinsko postajo Hrastnik. Povzeto po UL FGG (2022).	66
Slika 45: Primer simulacije dnevnih vrednosti temperature zraka (rdeča črta) in merjenih dnevnih vrednosti (črna črta). Povprečna vrednost temperature zraka je znašala 11,0 °C v primeru na levi sliki in 11,4 °C v primeru na desni sliki. Prikazani so rezultati za postajo Hrastnik. Povzeto po UL FGG (2022).	66
Slika 46: Primer regionalizacije enega izmed 4 parametrov (X4) modela GR4H. Povezava med povprečno vrednostjo naklona porečja in parametrom X4 (zeleni črta) ter 50 % intervali zaupanja (zeleni črtkani črti). Povzeto po UL FGG (2022).	67
Slika 47: Primer primerjave rezultatov verjetnostnih analiz določenih s predlagano metodologijo in rezultatov na podlagi merjenih podatkov o pretokih. Prikazani so podatki za vodomerno postajo Zagorje na vodotoku Medija. Povzeto po UL FGG (2022).	67
Slika 48: Primer rezultatov za vrednosti nQ_{vk} (1), sQ_{vk} (2) in vQ_{vk} (3) na podlagi 100 simulacij. Rezultati so prikazani z uporabo okvirjev z ročaji. Y-os prikazuje vrednosti pretokov v m^3/s . Prikazani so podatki za lokacijo vodomerne postaje Zagorje na vodotoku Medija z upoštevanjem predlagane metodologije. Povzeto po UL FGG (2022).	68
Slika 49: Prikaz temperaturnih postaj, ki so bile uporabljene v postopku hidrološkega modeliranja Serwinska (2022).	69
Slika 50: Prikaz padavinskih postaj, ki so bile uporabljene v postopku hidrološkega modeliranja Serwinska (2022).	70

Slika 51: Rezultati hidrološkega modela GR4H glede na podatke z vodomerne postaje Čatež v obdobju umerjanja (zgoraj) in obdobju validacije (spodaj). Povzeto po Serwinska (2022).....	71
Slika 52: Prikaz treh različnih scenarijev prostorske porazdelitve padavin (scenarij 1 - zgoraj, scenarij 2 - v sredini, scenarij 3 - spodaj). Povzeto po Serwinska (2022).	73

Kazalo preglednic

Preglednica 1: Primerjava dvoparametrskih in troparametrskih porazdelitvenih funkcij (povzeto po DWA, 2012).....	18
Preglednica 2: Primerjava postopkov ocene parametrov porazdelitve (povzeto po DWA, 2012).....	18
Preglednica 3: Pregled obstoječih praks upoštevanja podnebne spremenljivosti pri določanju projektnih pretokov v posameznih evropskih državah oz. regijah (Center for Ecology and Hydrology, 2013b) ..	20
Preglednica 4: Izpeljane empirične enačbe za oceno 100-letnih projektnih pretokov za posamezna porečja. A je prispevna površina območja v km ² ter Q pretok s 100-letno povratno dobo v m ³ /s. Povzeto po Piry (2020).....	36
Preglednica 5: Primer ocene projektnih pretokov s povratno dobo 100 let (Q ₁₀₀) in mejnih vrednosti po enačbah, ki jih je predlagal Piry (2020). Ocene so narejene za vodotok Draščica pred vtokom v naravni rezervat Ribniki	36
Preglednica 6: Primer odvisnosti parametra CN od določene vrste rabe tal, hidrološke skupine tal in hidroloških pogojev. Povzeto po Brilly in Šraj (2019).....	53
Preglednica 7: SCS klasifikacija zemljin in infiltracijske izgube v odvisnosti od vrste zemljine (Brilly and Šraj, 2019).	54
Preglednica 8: Prikaz osnovnih scenarijev za določitev projektnega padavinskega dogodka in predhodnih padavin, ki so bili analizirani. Povzeto po Serwinska, 2022.....	72
Preglednica 9: Kratek povzetek predlaganih metod za določanje projektnih pretokov in hidrogramov. Podrobnejši opisi metod so podani v prejšnjih poglavjih tega poročila.	77
Preglednica 10: Primeri uporabe posamezne kategorije metod.....	78

1 Uvod

Za načrtovanje hidrotehničnih objektov in/ali protipoplavnih gradbenih in negradbenih ukrepov za zmanjševanje poplavnih tveganj so ključnega pomena podatki o projektnih pretokih oziroma projektnih hidrogramih. Metodologija določanja projektnih pretokov oziroma hidrogramov v Sloveniji ni predpisana oz. v ta namen ni podanih niti strokovnih usmeritev (smernic, priporočil); posledično se v praksi uporabljajo zelo različne metode različnega nivoja zahtevnosti. Tako se med drugim v praksi pogosto za določitev projektnih pretokov še vedno uporabljajo preproste empirične enačbe, ki so se uveljavile v preteklosti v vsakdanji (terenski in projektantski) inženirski praksi. Drugi relativno pogosto uporabljen način določanja projektnih pretokov so verjetnostne analize visokovodnih konic, s katerimi na podlagi merjenih podatkov o pretokih določimo zvezo med projektnimi pretoki in povratnimi dobami oz. verjetnostjo nastopa pojava poplave. Pri takšnih analizah dobimo samo podatek o verjetnosti pojava določene visokovodne konice, ne pa tudi ostalih informacij o lastnostih poplavnega vala (npr. prostornina poplavnega vala), ki so prav tako pomembne za nadaljnjo inženirsko rabo (npr. hidravlično modeliranje). Relativno redko se v slovenski vodarski praksi uporabljajo umerjeni in validirani hidrološki modeli ali postopki regionalizacije projektnih pretokov, saj gre v večini primerov za kompleksnejše metode. Na splošno se pri vseh omenjenih metodah zelo redko upošteva negotovosti (meje zaupanja) pri določanju projektnih pretokov oziroma projektnih hidrogramov.

Poudariti je treba, da je hidrološki del projektne dokumentacije večinoma zelo kratek in preveč podcenjen glede na pomembnost izvrednotenih hidroloških podatkov za vse nadaljnje korake. Pogosto prihaja do izrazitih nesorazmerij med natančnostjo in kompleksnostjo hidroloških in hidravličnih izračunov, kar zmanjšuje uporabno vrednost oziroma natančnost rezultatov hidrološko-hidravličnih študij. Pri interpretaciji končnih rezultatov hidravličnih modelov pa se po navadi pozabi na kakovost vhodnih hidroloških podatkov in se jih obravnava z močno precenjeno natančnostjo.

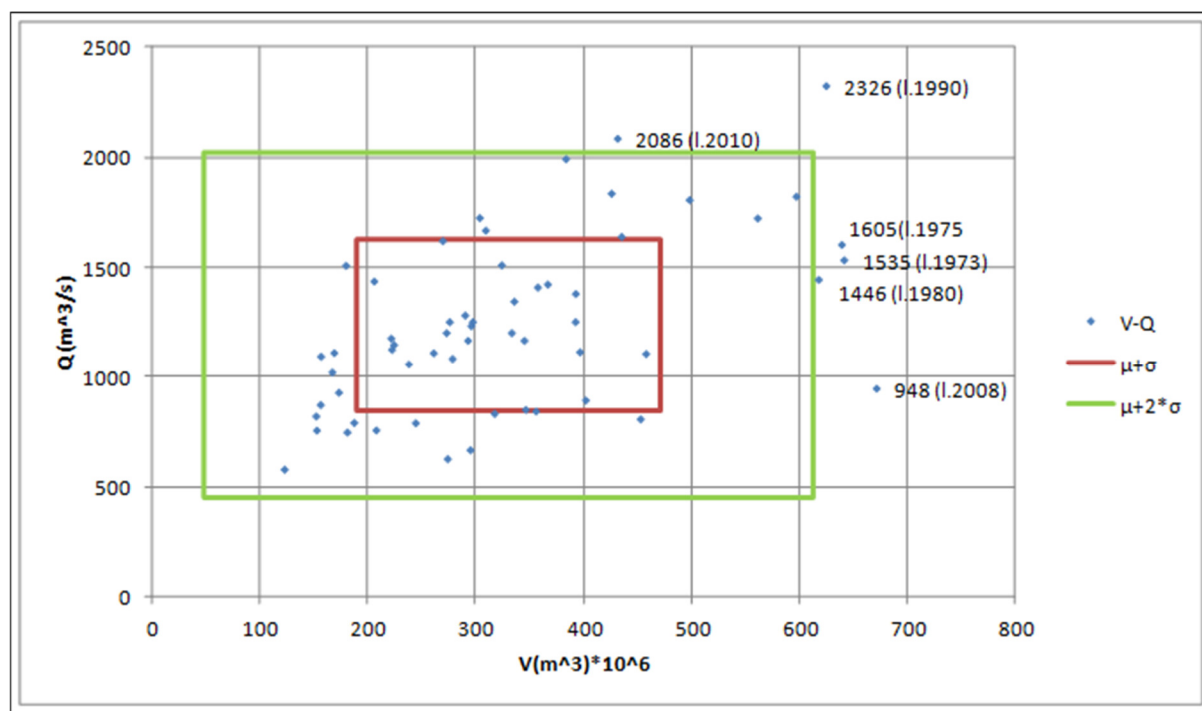
V sklopu ciljnega raziskovalnega projekta Razvoj metodologije za izračun visokovodnih valov na podlagi ekstremnih padavinskih dogodkov, je tako glavni cilj predlog ustrezne metodologije za določanje projektnih pretokov, kjer je vključena tudi metodologija za izračun poplavnih valov oziroma hidrogramov na osnovi ekstremnih padavinskih dogodkov, pri čemer so upoštevane domače in tuje prakse ter izkušnje strokovnjakov na tem področju.

V poročilu so predstavljeni vsi rezultati posameznih delovnih sklopov, in sicer DS1: Pregled ustrezne domače in mednarodne literature in delovnih točk DT2.1 (Razvoj metodologije za določanje projektnih hidrogramov na podlagi merjenih podatkov o pretokih/hidrogramih) in DT2.2 (Razvoj metodologije za določanje projektnih hidrogramov na podlagi podatkov o projektnih padavinah), ki sta del delovnega

sklopa DS2: Razvoj metodologije za določanje projektnih hidrogramov, ter glavni zaključki strokovne delavnice, kjer je bila metodologija predstavljena strokovni javnosti, kar je del DS3: Usklajevanje metodologije, sinteza in diseminacija. V poročilu smo opis predlaganih metod za določanje projektnih pretokov razdelili v dve poglavji, ki se v osnovi ločita glede na to, ali metoda temelji na uporabi merjenih podatkov o pretokih ali ne, nadalje potem še glede na namen uporabe metode z vidika zahtevnosti oziroma kompleksnosti posamezne metode.

1.1 Pregled literature s področja določanja projektnih pretokov in hidrogramov

Hidrološko izrazje (Mikoš et al., 2002) opredeljuje projektni pretok oz. projektno poplavo (tudi projektna visoka voda, računska visoka voda) kot »hidrogram ali konični pretok visokih voda, izbran za izdelavo projektov hidrotehničnih objektov ali ureditev vodotokov ob upoštevanju hidroloških in ekonomskih dejavnikov«. Pri določanju projektnih pretokov se v praksi še vedno najpogosteje uporablja določanje koničnega pretoka ali pretoka z določeno povratno dobo, čeprav s tem pridobimo samo omejeno informacijo o poplavnem dogodku. Za varstvo pred poplavami in načrtovanje hidrotehničnih objektov so namreč pomembne informacije tudi prostornina, oblika in trajanje projektnega (poplavnega) hidrograma (Mediero et al., 2010; Šraj et al., 2013), saj ni nujno, da ima visokovodni val z najvišjo konico tudi največjo prostornino (slika 1).



Slika 1: Odvisnost visokovodnih konic in pripadajočih prostornin za vodomerno postajo Litija na reki Savi za obdobje 1953-2010 (Brilly et al., 2015).

Poleg tega se v slovenski vodarski praksi, predvsem na območjih brez merjenih podatkov o pretokih, konični pretoki pogosto še vedno določajo po relativno preprostih empiričnih enačbah, kot sta npr. enačbi Kresnika in VGI (Mikoš, 2020; Sodnik and Mikoš, 2010), čeprav njihov izračun temelji na zelo splošnih parametrih, kot sta površina porečja in empirični koeficient odtoka, odvisen od splošnih topografskih lastnosti porečja, ki se pogosto določa izkustveno in brez uporabe merjenih podatkov. Ne glede na to, ali gre za določanje projektnih pretokov in hidrogramov na merjenih ali nemerjenih porečjih, je v mednarodni literaturi zaslediti številne metode, ki so bile razvite v zadnjih desetletjih in omogočajo

preseganje uporabe empiričnih metod. Določanje projektnih hidrogramov je namreč eden izmed bolj pogostih praktičnih problemov, s katerimi se srečujemo na področju inženirske hidrologije. Tudi Mednarodno združenje hidroloških znanosti, IAHS (angl. *International Association of Hydrological Sciences*), je prepoznalo izzive, s katerimi se srečamo pri določanju projektnih pretokov, zaradi česar je v preteklosti podprlo 10-letno pobudo z naslovom "Predictions In Ungauged Basins (PUB)", kjer je bilo izvedenih veliko raziskav s tega področja (IAHS, 2012). Omenjena pobuda se ni osredotočala samo na povsem nemerjena porečja, ampak tudi na porečja, kjer je na razpolago omejeno število vhodnih podatkov oziroma na nemerjene lokacije na porečjih, ki so del večjih merjenih porečij. Obsežen pregled pristopov pri določanju projektnih pretokov in projektnih hidrogramov so pripravili Hrachowitz et al. (2013). V omenjenem članku se sklicujejo na 760 strokovnih virov, ki jih seveda na tem mestu ne navajamo, predstavljajo pa zelo dobro izhodišče za izvedbo pregleda tujih strokovnih praks s področja določanja projektnih hidrogramov. Obsežen pregled metod in praks za določanje odтока z nemerjenih porečij je zbran tudi v monografiji "*Runoff Prediction in Ungauged Basins: Synthesis across Processes, Places and Scales*" (Blöschl et al., 2013). Tematika je še vedno zelo aktualna in je omenjena tako v 10-letni pobudi IAHS (Panta Rhei, everything flows 2013–2022) (Montanari et al., 2013), kot tudi v nekaterih izmed pred kratkim opredeljenih 23 nerešenih vprašanj s področja hidrologije (Blöschl et al., 2019a).

Za učinkovito upravljanje voda in zmanjševanje poplavne nevarnosti, kar obsega tudi načrtovanje ureditev in vključevanje objektov ter infrastrukture v območje vodotokov, je točnost določitve projektnih pretokov ključnega pomena. Kot omenjeno, se v slovenski hidrotehnični praksi še vedno pogosto uporabljajo ali preproste empirične enačbe ali v nekaterih primerih verjetnostne analize, medtem ko so umerjeni in validirani hidrološki modeli za določitev projektnih pretokov in/ali hidrogramov uporabljeni redkeje. V literaturi je možno zaslediti številne, različno kompleksne metode za določitev projektnih pretokov in/ali hidrogramov, ki se med seboj razlikujejo tudi po tem, ali uporabljajo razpoložljive merjene podatke o pretokih (angl. *gauged catchments*) ali pa merjeni podatki o pretokih niso na voljo (angl. *ungauged catchments*). V tem poglavju smo zato zbrali pregled nekaterih najpogostejše uporabljenih metod za določanje projektnih pretokov in hidrogramov ter prakse, ki jih uporabljajo v nekaterih drugih državah za določitev projektnih pretokov in hidrogramov na t. i. merjenih in nemerjenih porečjih.

Pristope za določanje projektnih poplav lahko v osnovi razdelimo na i) verjetnostne ali statistične metode in ii) deterministične metode, obstajajo tudi pristopi, ki so iii) kombinacija obeh omenjenih (Rogger et al., 2012). Za prve so osnova dovolj dolgi podatkovni nizi o pretokih, druge pa temeljijo na padavinskih podatkih in konceptualnem opisu procesov, ki se odvijajo na porečju (Brunner et al., 2016). Na merjenih porečjih, kjer se izvajajo meritve pretokov in so podatkovni nizi dovolj dolgi, se za

določitev projektnih pretokov z določeno povratno dobo oziroma verjetnostjo nastopa najpogosteje uporabljajo verjetnostne analize visokovodnih konic (angl. *flood frequency analysis*). So pa že tekom izdelave takih analiz potrebne številne odločitve, saj lahko v literaturi zasledimo različne pristope, ki se med seboj razlikujejo v izbiri metode za pripravo vzorca (npr. metoda letnih maksimumov (angl. *annual maxima* AM)), metoda vrednosti nad izbranim pragom (angl. *peaks over threshold* POT), v velikosti vzorca (število let z merjenimi podatki), časovni ločljivosti vhodnih podatkov (npr. dnevni, urni podatki), izbiri teoretične porazdelitvene funkcije (npr. Gumbel, log-normalna, log-Pearson III, Pearson III, GEV), izbiri metode za določitev parametrov porazdelitve (npr. metoda največjega verjetja, metoda momentov, metoda momentov L) itd. (Bezák et al., 2014; Kučić, 2007; Šraj et al., 2012). Metoda letnih maksimumov (AM) za izbiro vzorca je med inženirji zaradi enostavnosti bolj priljubljena (Pan et al., 2022), pri izbiri teoretičnih porazdelitvenih funkcij je raznolikost precej večja. Subjektivnost izbire v postopkih ocene projektnih hidrogramov ali pretokov se pojavlja praktično v vsakem posameznem koraku (npr. izbira vzorca, izbira porazdelitve, v primeru modeliranja tudi izbira modelov idr.) in je posledica nestandardiziranosti postopkov in metod tako na ravni Evropske unije kot na ravni posameznih držav. To vpliva tudi na rezultate oz. vrednosti projektnih pretokov in hidrogramov (npr. Koutsoyiannis, 2007; Šraj et al., 2012). Smernice ali navodila za oceno projektnih pretokov in hidrogramov so na voljo v redkih državah. V okviru projekta COST FloodFreq je bil izdelan pregled metod, ki se uporabljajo v posameznih državah (Center for Ecology and Hydrology, 2013a). V nadaljevanju tega poročila povzemamo metode in pristope za države, ki imajo področje urejeno s smernicami ali navodili za izbiro metode in/ali izvedbo postopkov.

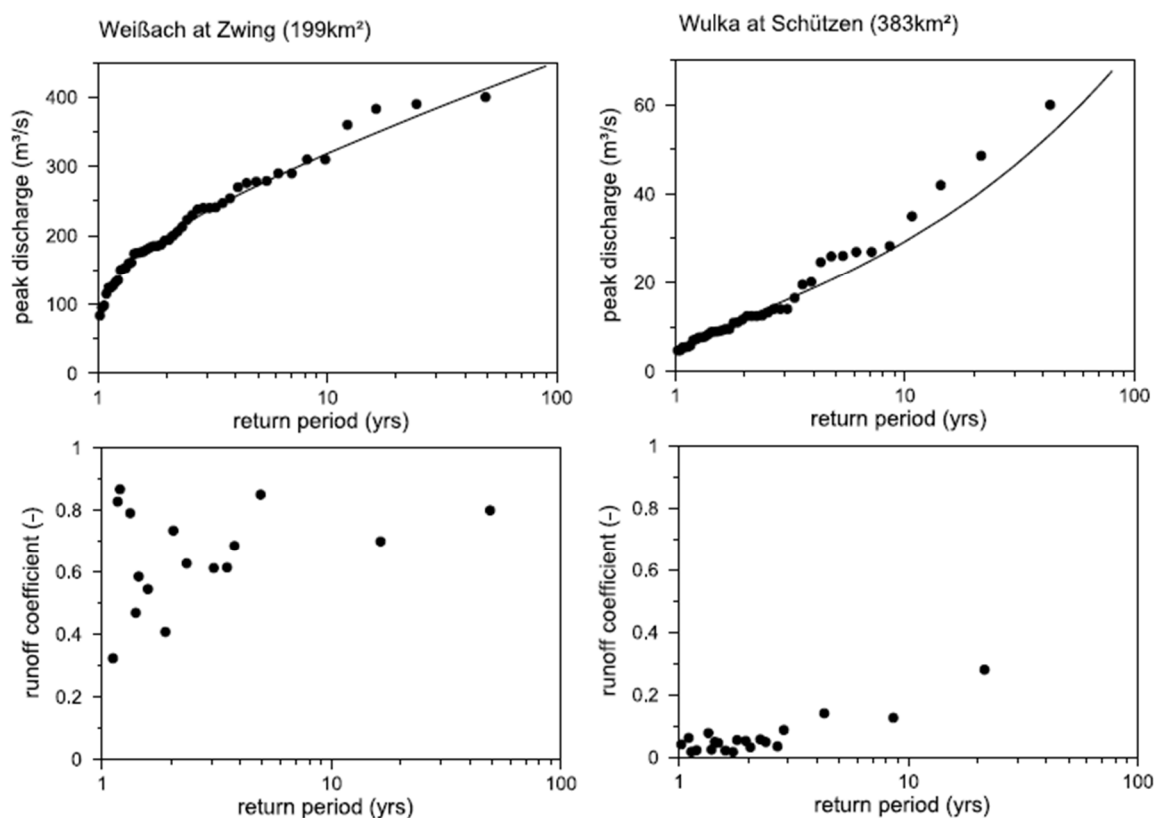
V priročniku Združenega kraljestva, ki ga skupno sestavlja pet zvezkov, so ustrezne in priporočene metode za oceno projektnih pretokov v osnovi razdeljene na statistične postopke, ki so opisani v zvezku 3 (Robson and Reed, 2008), in postopke z uporabo FSR (angl. *Flood studies report*) metode padavine-odtok, ki je predstavljena v zvezku 4 (Houghton-Carr, 2008). FSR je okrajšava za predhodne smernice za oceno projektnih pretokov v ZK. Predlagane statistične metode so primerne predvsem za povratne dobe pretokov od 2 do 200 let, medtem ko je metoda padavine-odtok (FSR) uporabna za širši razpon povratnih dob pretokov, vendar avtorji opozarjajo na previdnost pri uporabi metode predvsem pri daljših povratnih dobah (npr. 10.000 let) z vidika validacije rezultatov (Reed, 2008). Predlagana statistična metoda temelji na izdelavi krivulje odvisnosti verjetnost (povratna doba)-pretok kot produkta tipične poplave Q_{med} (angl. *index flood* ali *typical flood*) in rastne krivulje (angl. *growth curve*). Metoda določitve tipične poplave je odvisna od velikosti vzorca, priročnik omenja metodi AM in POT. Metoda AM naj se ob uporabi metode tipične poplave uporablja za lokacije, kjer je podatkovni niz pretokov dolg vsaj 14 let. Za podatkovni niz dolžine med 2 in 13 let priporočajo metodo POT (Robson and Reed, 2008). Izbira metode za oceno rastne krivulje temelji na dolžini razpoložljivega podatkovnega niza in ciljni povratni dobi pretoka. Robson and Reed (2008) najkrajši možni niz podatkov za oceno rastne

krivulje definirata v odvisnosti od povratne dobe, za katero določamo projektne pretoke. Kot ustrezno dolžino niza merjenih podatkov o pretokih za klasične verjetnostne analize visokovodnih konic priporočata vsaj dvakrat več let merjenih podatkov, kot je izbrana povratna doba (T). V praksi velikokrat tako dolgi nizi meritev niso na voljo, zato za izdelavo rastne krivulje v odvisnosti od ciljne povratne dobe in razpoložljive dolžine podatkovnega predlagajo še druge metode, ki obsegajo vključevanje podatkovnih nizov s podobnih porečij (angl. *pooling analysis*). Avtorji priročnika priporočajo uporabo generalizirane logistične (GL) porazdelitve (angl. *generalised logistic*) pred GEV porazdelitvijo. Metoda padavine-odtok (FSR) zajema uporabo troparametrskega modela hidrograma enote in izgub (angl. *unit hydrograph and losses model*). Prvi parameter določa časovne lastnosti odziva odtoka na padavine (čas do nastopa konice v hidrogramu enote), drugi parameter vpliva na količinske lastnosti padavinskega odtoka (kolikšen delež padavin prispeva k odtoku), tretji parameter se nanaša na bazni odtok. Ocena prvega in drugega parametra mora temeljiti na merjenih podatkih, kjer je to mogoče (Houghton-Carr, 2008; Reed, 2008). Po izdaji omenjenega priročnika je izšlo še kar nekaj dopolnjujočih dokumentov s smernicami in dodatnimi pojasnili. Enega takšnih dokumentov so objavili pri UK Environment Agency (2020), v njem uporabniki najdejo nasvete za čim učinkovitejšo rabo priročnika ter pozneje izdanih gradiv v postopku ocene projektnih pretokov oziroma hidrogramov. Med drugim je posebno poglavje namenjeno tudi zahtevanim/potrebnim kompetencam in izobraževanju, ki bi jih uporabniki morali imeti za izvedbo posameznih, različno kompleksnih analiz.

V Nemčiji je smernice za določanje verjetnosti pojava poplav podalo Združenje za vodo, odpadno vodo in odpadke, DWA (angl. *German Association for Water, Wastewater, and Waste*, nem. *Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall*) (DWA, 2012). V dokumentu je poleg opisa ustreznih metod izpostavljeno, da je za zmanjšanje negotovosti ocenjenih projektnih pretokov in hidrogramov, ki izhajajo iz samih podatkov in metod (npr. manjkajoči podatki, kratki nizi podatkov, problem pretočnih krivulj, način določitve vzorca podatkov, izbira teoretične porazdelitvene funkcije pri verjetnostnih analizah, izbira metode za izračun parametrov teoretičnih porazdelitvenih funkcij, določitev parametrov hidroloških modelov, razlike v procesih nastajanja poplav) in stohastične spremenljivosti, priporočeno uporabiti dodatne obstoječe kvalitativne in/ali kvantitativne informacije, ki jih avtorji omenjenih smernic razdelijo na časovne (npr. zgodovinski podatki o poplavah), prostorske (npr. merjeni podatki na podobnih sosednjih porečjih) in vzročne (razumevanje lokalnih vzrokov za nastanek poplav in odziva posameznih porečij). Pomembnost uporabe dodatnih hidrološko relevantnih virov sta v članku na številnih primerih ilustrirala Merz and Blöschl (2008), ki sta tudi soavtorja nemških smernic.

Na sliki 2 (Merz and Blöschl, 2008) je prikazan primer rezultatov verjetnostnih analiz visokih vod za dve porečji v Avstriji ter dodatna analiza koeficientov odtoka pripadajočih visokovodnih dogodkov.

Prvo porečje (slika 2, levo) prejme letno okrog 2000 mm padavin, drugo (slika 2, desno) pa okrog 600 mm padavin. Na sliki je lepo razviden vpliv koeficientov odtoka na rezultate verjetnostnih analiz. Za prvo, bolj mokro porečje (slika 2, levo), se koeficienti odtoka večinoma gibljejo med 0,4 in 0,9, in z večanjem velikosti dogodka koeficient odtoka ostaja okrog 0,8. To pomeni, da v primeru pojava še bolj ekstremnih padavinskih dogodkov težko pričakujemo drastičen porast koeficienta odtoka, saj je že sedaj blizu najvišjih vrednosti. To kaže tudi krivulja verjetnostne analize s svojo konkavno ukrivljenostjo. V primeru drugega bolj suhega porečja (slika 2, desno) so koeficienti odtoka precej nižji. Za najmanjši obravnavani visokovodni dogodek je znašal koeficient odtoka manj kot 0,05, potem pa je relativno hitro naraščal z naraščanjem povratne dobe dogodkov do vrednosti 0,3. V tem primeru lahko pričakujemo, da ob še bolj ekstremnem padavinskem dogodku koeficient odtoka lahko naraste na 0,5 ali celo več. Enako kaže konveksno ukrivljena krivulja verjetnostne analize, ki izkazuje izrazito naraščanje v območju večjih povratnih dob (Merz and Blöschl, 2008).

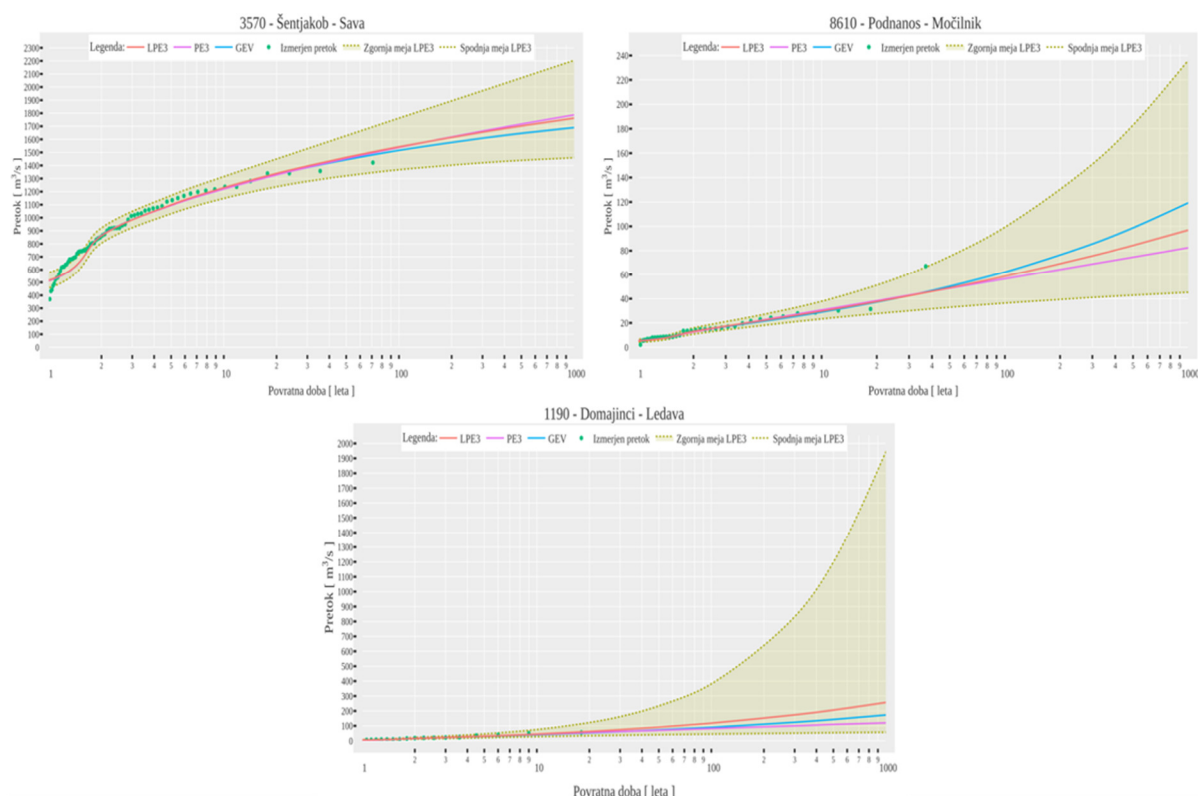


Slika 2: Rezultati verjetnostnih analiz in koeficientov odtoka pripadajočih visokovodnih dogodkov za dve porečji v Avstriji. Privzeto po Merz and Blöschl (2008).

Z dodatno vzročno informacijo o koeficientih odtoka lahko izdelovalec hidrološke študije z veliko večjim zaupanjem ekstrapolira dobljeno krivuljo verjetnostnih analiz tudi v območje izven razpona merjenih podatkov, torej v območje majhnih verjetnosti pojava visokih vod oz. večjih povratnih dob.

Vse to samo potrjuje dejstvo, da je pri izdelavi verjetnostnih analiz visokih vod pomembno celostno poznavanje porečja, njegovih lastnosti in odziva na padavine.

Za kritično presojo rezultatov in zmanjšanje negotovosti ocenjenih projektnih pretokov je vsekakor nujno tudi upoštevanje mej zaupanja (slika 3). Prikaz mej zaupanja pri npr. klasičnih verjetnostnih analizah nam omogoča dodaten vpogled v analize in kritično presojo rezultatov, saj izdelovalcu hidrološke študije in uporabnikom pokaže, kako daleč v območje izven razpona merjenih podatkov je še smiselno ekstrapolirati krivuljo oz. koliko lahko zaupamo v ocenjene vrednosti projektnih pretokov večjih povratnih dob.



Slika 3: Trije različni primeri rezultatov verjetnostnih analiz z upoštevanjem negotovosti in mej zaupanja (Piry, 2020).

V dokumentu DWA (2012) avtorji izpostavljajo tudi dejstvo, da so se v preteklosti odločitve o izbiri teoretične porazdelitvene funkcije v sklopu verjetnostnih analiz izvajale na podlagi kazalnikov ustreznosti prileganja (npr. koeficienta determinacije). Težava se (lahko) pojavi pri ekstrapolaciji krivulj za daljše povratne dobe, kjer na podlagi teh kazalnikov ne moremo sklepati o ustreznosti izbrane porazdelitvene funkcije. Posledično avtorji smernic (DWA, 2012) ne predlagajo univerzalne specifične porazdelitvene funkcije, temveč uporabnikom svetujejo, da se o izbiri teoretične porazdelitvene funkcije odločijo na podlagi strokovnih izkušenj in vseh razpoložljivih informacij. Pri tem dodajajo, da so dvo-parametrski porazdelitveni funkcije, kot je npr. Gumbelova ali log-normalna, ustrežnejše za krajše

podatkovne nize (do 30 let), tri-parametrške porazdelitvene funkcije, kot so npr. GEV, Pearson III, log-Pearson III, Weibull, za vzorce daljšega trajanja (nad 50 let). Prednosti in slabosti dvo- in tro-parametrških funkcij so zbrane v preglednici 1, ki jo povzemamo iz smernic DWA (2012). Podoben pregled glede ustreznosti uporabe posameznih metod za oceno parametrov porazdelitvenih funkcij je prikazan v preglednici 2.

Preglednica 1: Primerjava dvoparametrških in troparametrških porazdelitvenih funkcij (povzeto po DWA, 2012)

Porazdelitvena funkcija	Prednosti	Slabosti	Ustreznost rabe
Dvoparametrška	Robustnost; ustrežnejša, ko je na voljo malo informacij;	Manjša prilagodljivost; slabše prilaganje; slabše odraža stanje na območju kot troparametrška porazdelitvena funkcija	Predvsem za podatkovne nize do 30 let
Troparametrška	Boljše prilaganje; fleksibilnost;	Potrebni več informacij (daljši podatkovni nizi ali dodatne informacije); odvisnost od koeficienta asimetričnosti	Predvsem za podatkovne nize, daljše od 50 let

Preglednica 2: Primerjava postopkov ocene parametrov porazdelitve (povzeto po DWA, 2012)

Postopek	Prednosti	Slabosti
Metoda momentov	Večje izmerjene vrednosti pretokov imajo večji vpliv na oceno parametrov	Višje vrednosti pretokov so negotove; njihova verjetnost je neznana
Metoda verjetnostno uteženih momentov	Stabilnost; manjši vpliv ubežnikov/osamelcev	Na oceno parametrov močno vplivajo manjše poplave (pretoki).
Metoda največjega verjetja	Robustna; vrednosti pretokov so upoštevane uravnoteženo	Potrebna posebna programska orodja za iskanje iterativnih rešitev

V Združenih državah Amerike so bile smernice za oceno projektnih pretokov objavljene že leta 1967 in so bile od takrat nekajkrat posodobljene, vendar vedno brez velikih sprememb, vezanih na metode. Že od prvotnega dokumenta tako ostaja kot priporočena teoretična porazdelitev letnih visokovodnih konic (AM) log-Pearsonova III porazdelitev (England et al., 2019). Se pa hidrologi v ZDA že več kot dve desetletji trudijo to priporočilo spremeniti, a imajo pri tem velike administrativne težave.

V Avstriji se je na podlagi primerjav rezultatov uporabe različnih porazdelitvenih funkcij kot najustreznejša izkazala porazdelitev GEV (Center for Ecology and Hydrology, 2013a). GEV je ena najpogostejše uporabljenih porazdelitvenih funkcij za oceno projektnih pretokov tudi v Franciji, kjer se poleg nje uporablja tudi generalizirana Paretova porazdelitvena funkcija (Center for Ecology and Hydrology, 2013a).

Na Cipru, kjer se soočajo predvsem s problemom pomanjkanja vode, se verjetnostne analize visokovodnih valov izvajajo za načrtovanje pregrad oziroma zadrževalnikov, mostove in prepuste ter za kanalizacijo, pri čemer se v prvem primeru uporablja metoda analize ekstremnih vrednosti skupaj z analizo posameznih padavinskih dogodkov, v drugih dveh primerih prevladujejo analize padavinskih dogodkov (Center for Ecology and Hydrology, 2013a).

V Grčiji so dovolj dolgi podatkovni nizi merjenih podatkov o pretokih, ki bi zagotavljali rezultate z dovolj majhno negotovostjo pri velikih povratnih dobah, redki. Zato za oceno projektnih pretokov dajejo velik poudarek modeliranju ekstremnih padavin, pri čemer so za opis verjetnosti padavinskih dogodkov najpogostejše uporabljene ITP (angl. *intensity-duration-frequency* oz. *IDF*) krivulje. Do nedavnega je bila v Grčiji za oceno tveganj ekstremnih hidroloških dogodkov prevladujoča izbira Gumbelova porazdelitev, pri čemer se je pogostejše uporabljala za ekstremne padavine kot za pretoke. Poznejše študije so pokazale, da Gumbelova porazdelitev lahko bistveno podceni ekstremne količine padavin (npr. Koutsoyiannis, 2007).

Na Finskem je uradno priporočena metoda porazdelitve vzorca visokovodnih konic (AM) Gumbelova porazdelitev, za oceno parametrov porazdelitve pa metoda momentov. V primeru nemerjenih območij se uporabijo podatki bližnjih merilnih mest znotraj istega porečja ali podatki s hidrološko primerljivih porečij (Center for Ecology and Hydrology, 2013a).

Dodatno neznanko in velik problem pri določanju projektnih pretokov v zadnjih desetletjih predstavlja vpliv spremenljivosti podnebja oz. njegova nestacionarnost (Blöschl et al., 2019b; Šraj et al., 2016). Ta dokazano vpliva tudi na pretoke v Sloveniji (ARSO, 2021; Oblak et al., 2021), zato bi jo bilo potrebno smiselno upoštevati oz. vključiti v metode določanja projektnih pretokov (Šraj et al., 2016; Šraj and Bezak, 2020).

Vseevropski pregled metod upoštevanja podnebne spremenljivosti pri določanju projektnih pretokov, ki se v ta namen uporabljajo v posameznih državah oz. so se vsaj do leta 2013, je pripravila delovna skupina WG4 v okviru COST akcije projekta FLOODFREQ, ki je naslavljal postopke določanja verjetnosti

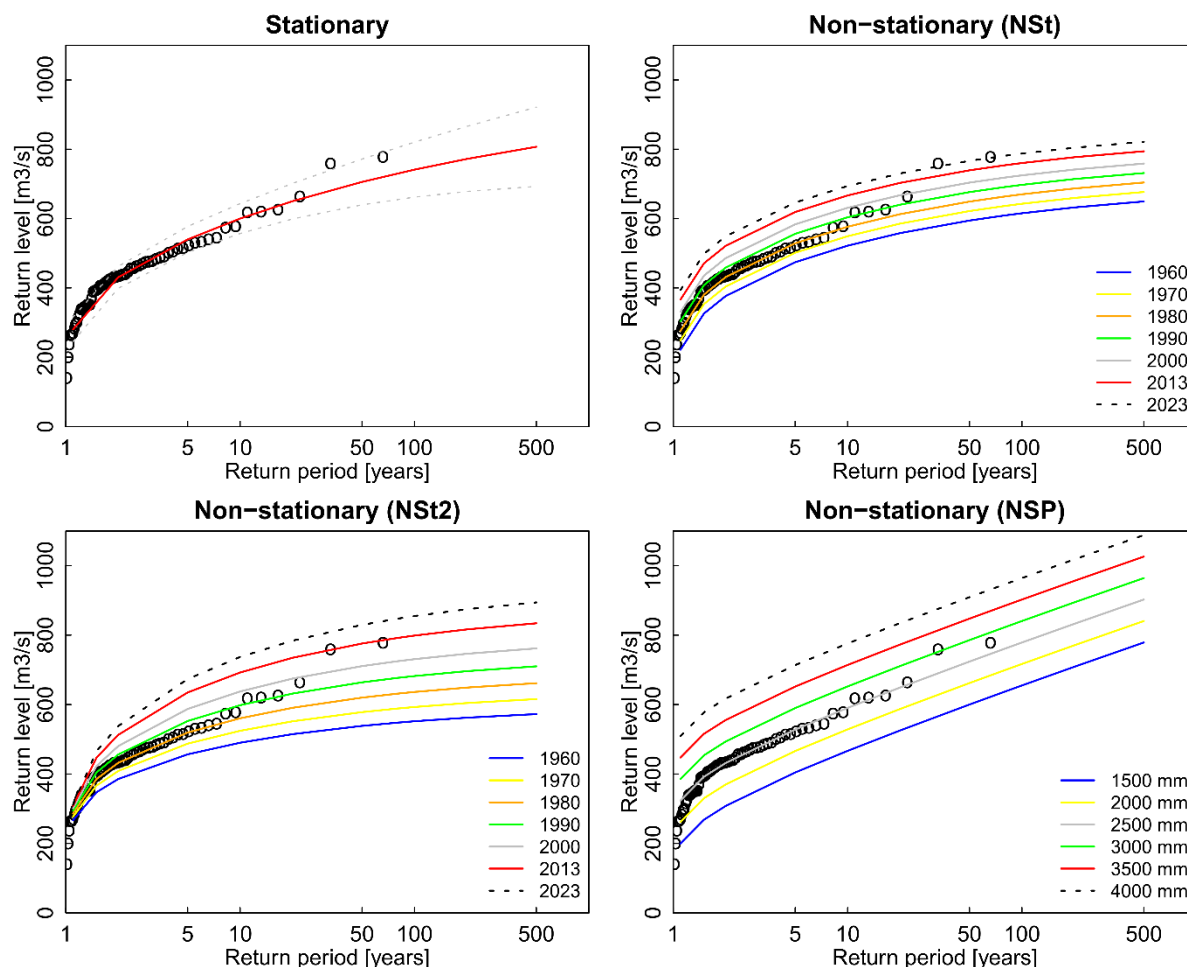
visokih vod v spremenjenem podnebju v Evropi (Center for Ecology and Hydrology, 2013b). V poročilu so zbrane informacije o podatkih in metodah za 19 evropskih držav, ki so jih za posamezno državo pripravile nacionalne organizacije, v preglednici 3 pa je predstavljen pregled takratnih obstoječih praks upoštevanja podnebne spremenljivosti pri določanju projektnih pretokov v nekaterih evropskih državah oz. regijah.

Preglednica 3: Pregled obstoječih praks upoštevanja podnebne spremenljivosti pri določanju projektnih pretokov v posameznih evropskih državah oz. regijah (Center for Ecology and Hydrology, 2013b)

Država	Regija	Spremenljivka	Smernice upoštevanja podnebnih sprememb
Belgija	Flandrija	projektni pretoki	30 % povečanje
Belgija	Nacionalno	projektne padavine	30 % povečanje
Danska	Nacionalno	projektne padavine	20 %, 30 % in 40 % povečanje za povratne dobe 2, 10 in 100 let
Nemčija	Bavarska	projektni pretoki s 100-letno povratno dobo	15 % povečanje
Nemčija	Baden-Württemberg	projektni pretoki	Povečanje od 0 % do 75 %, odvisno od lokacije in povratne dobe
Norveška	Nacionalno	projektni pretoki	0 %, 20% in 40 % povečanje, odvisno od regije, prevladujoče sezone poplav in velikosti porečja
Švedska	Nacionalno	projektne padavine	Povečanje med 5 % in 30 %, odvisno od lokacije
Združeno kraljestvo	Nacionalno	projektni pretoki	20 % povečanje za leto 2085
Združeno kraljestvo	Nacionalno	projektne padavine	10 %, 20 % in 30 % povečanje za leta 2055, 2085 in 2115

Eden od možnih načinov upoštevanja nestacionarnosti podnebja so tudi verjetnostne analize, pri katerih v parametre izbranih teoretičnih porazdelitvenih funkcij vgradimo časovno odvisnost izbranih spremenljivk (npr. visokovodnih konic, padavin) (Šraj et al., 2016; Šraj and Bezak, 2020). Primer rezultatov takih analiz je prikazan na sliki 4 (Šraj et al., 2016). Iz slike 4 je razvidno, da ob upoštevanju stacionarnega stanja izbrana porazdelitev GEV podceni dva ekstremna dogodka iz preteklosti. Uporaba nestacionarnih modelov v tem primeru bistveno izboljša rezultate, predvsem uporaba modela NSt2 z

vgrajenim časovnim trendom spreminjanja visokovodnih konic v dva parametra porazdelitvene funkcije GEV (slika 4). Iz rezultatov nestacionarnih modelov NSt in NSt2 lahko vidimo, da povratna doba izbrane visokovodne konice pada, ko se premikamo iz preteklosti v sedanjost. Nestacionarni model, ki upošteva odvisnost od padavin (NSP), pa kaže, da dogodek, ki je imel v stacionarnih pogojih 100-letno povratno dobo, v tem primeru pri povprečnih letnih padavinah postane dogodek s 67-letno povratno dobo in pri maksimalnih letnih padavinah postane dogodek z 9-letno povratno dobo.



Slika 4: Primer prikaza rezultatov verjetnostnih analiz za vodomerno postajo Kobarid na Soči z uporabo teoretične porazdelitvene funkcije GEV za stacionarno stanje in tri nestacionarne modele, kjer NSt predstavlja nestacionarni model z vgrajenim časovnim trendom spreminjanja visokovodnih konic v parameter lokacije, NSt2 predstavlja nestacionarni model z vgrajenim časovnim trendom spreminjanja visokovodnih konic v parameter lokacije in parameter merila in NSP predstavlja nestacionarni model, kjer je v parameter lokacije vgrajena odvisnost od letnih količin padavin (Šraj et al., 2016).

2 Izračun projektnih hidrogramov na podlagi merjenih podatkov o pretokih

2.1 Manj kompleksne metode

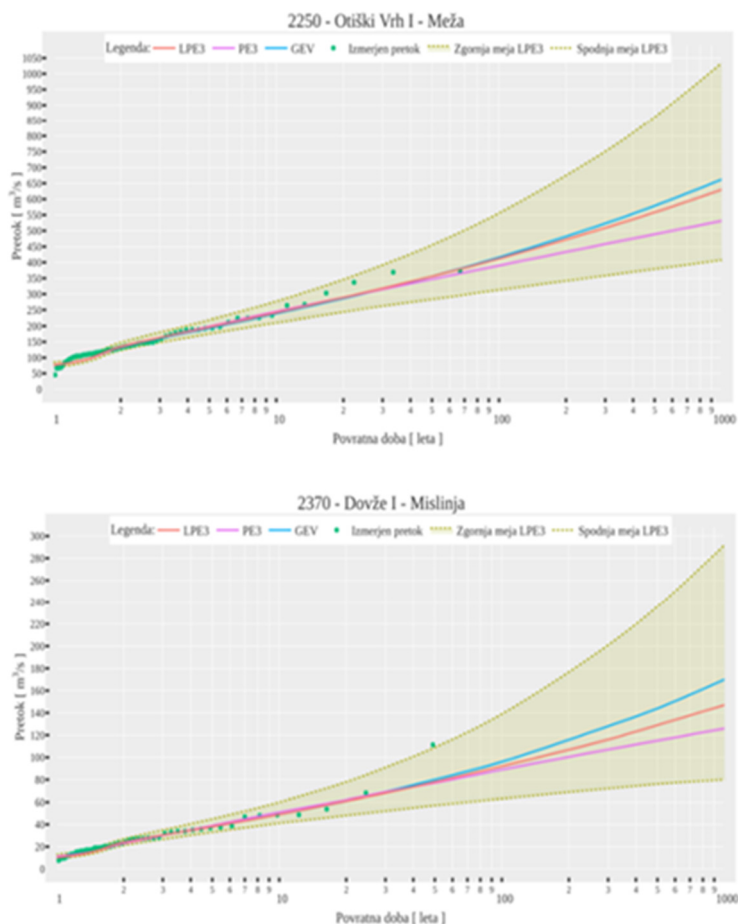
V primeru, da imamo na voljo dovolj merjenih podatkov o pretokih za izvedbo verjetnostnih analiz, lahko projektne hidrograme določimo na podlagi merjenih podatkov o pretokih. Ocenjuje se, da je za izvedbo verjetnostnih analiz smiselno upoštevati vsaj 15–20 let zveznih meritev pretokov zadnjega obdobja (zaradi sodobnejšega načina merjenja in podnebne spremenljivosti), kar nam omogoča ustrezno izbiro vzorca (AM ali POT). Podatki o pretokih morajo biti seveda ustrezne kakovosti, kar se nanaša na stabilen merski profil, ustrezno pretočno krivuljo ipd. Vsekakor pa se moramo zavedati, da v primeru tako kratkih nizov podatkov negotovost ocenjenih projektnih pretokov z večanjem povratne dobe strmo narašča (slika 3). Določitev in upoštevanje intervalov zaupanja ter previdnost pri določanju povratnih dob, ki so daljše od dvakratnika dolžine niza merjenih podatkov, je zato v takih primerih nujna (Robson and Reed, 2008; Viessman and Lewis, 2003).

Manj kompleksna metoda, ki jo predlagamo za določanje projektnih hidrogramov na podlagi merjenih pretokov, je zelo podobna tisti, ki jo povzemajo Yue et al. (2002) v uvodu, in kjer gre za uporabo tipičnega visokovodnega hidrograma (angl. *typical flood hydrograph*) (TFH). Predlagana metoda tako vključuje naslednje korake:

- Izbira vzorca za izvedbo verjetnostnih analiz (npr. metoda največjih letnih visokovodnih konic (AM), v primeru, da imamo na voljo dovolj dolg niz merjenih pretokov, kar pomeni, da iz dolgoletnih merjenih nizov podatkov o pretokih v vzorec uvrstimo največjo visokovodno konico v posameznem letu, v primeru krajših nizov merjenih podatkov o pretokih je priporočljiveje vzorec oblikovati po metodi vrednosti nad izbranim pragom (POT));
- Ocena parametrov več izbranih porazdelitvenih funkcij (npr. log-normalna, Pearsonova III, log-Pearsonova III, Gumbelova, generalizirana porazdelitev ekstremnih vrednosti (GEV)) na podlagi metode momentov ali metode momentov L);
- Ocena ustreznosti posamezne porazdelitve glede na ujemanje z merjenimi podatki o pretokih ali z uporabo grafičnih prikazov ali z uporabo statističnih testov. Pri oceni ustreznosti porazdelitve in interpretaciji rezultatov (predvsem v primeru daljših povratnih dob) je vsekakor priporočljivo uporabiti vse dodatne razpoložljive kvalitativne in/ali kvantitativne informacije (glej sliko 2) ter se o ustreznosti porazdelitve in interpretaciji rezultatov odločiti na podlagi strokovnih izkušenj;

- Izbira ustreznih reprezentativnih hidrogramov v odvisnosti od namena uporabe rezultatov (npr. krajši dogodki, daljši dogodki, več različnih kombinacij);
- Upoštevanje rezultatov verjetnostnih analiz (skupaj s pripadajočimi intervali zaupanja, ki zajemajo vpliv negotovosti) in izbranih reprezentativnih hidrogramov za določitev projektnih hidrogramov za različne vrednosti povratnih dob in z upoštevanjem negotovosti.

V preteklosti je Agencija RS za okolje pripravila prikaz rezultatov verjetnostnih analiz na izbranih vodomernih postajah z uporabo podatkov do vključno leta 2010 (ARSO, 2013). Ker so podatki stari že več kot 10 let in so v tem času tudi v Sloveniji zaznane podnebne spremembe, bi bilo nujno potrebno take analize in rezultate posodabljeni sproti. Poleg tega pa bi bilo rezultate takih verjetnostnih analiz nujno potrebno prikazati skupaj z mejami zaupanja, saj se sicer izgubi predstava o natančnosti ocene projektnih pretokov, posledično pa se jih lahko pri nadaljnji uporabi obravnava z močno precenjeno natančnostjo. Piry (2020) je npr. v svoji magistrski nalogi UL FGG uporabil 8 let daljše nize, do vključno leta 2018. Verjetnostne analize je izdelal za podatke s 179 vodomernih postaj ARSO v Sloveniji z uporabo treh porazdelitvenih funkcij, in sicer Pearsonove porazdelitve tipa III, log-Pearsonove porazdelitve tipa III in generalizirane porazdelitve ekstremnih vrednosti (GEV) in z upoštevanjem intervalov zaupanja (slika 5). Iz teh razlogov predlagamo, da se za lokacije, kjer trenutno so na voljo rezultati verjetnostnih analiz, uporabijo izračuni z upoštevanjem pripadajočih intervalov zaupanja, ki jih je pripravil Piry (2020). Priporočamo pa, da uporabnik teh podatkov za posamezno vodomerno postajo pri ARSO preveri ustreznost Q-H krivulje oz. pridobi dodatne informacije o morebitnih spremembah pretočne krivulje, o načinu merjenja pretokov, o ustreznosti merskega profila, o morebitnih razlivanjih (obtekanjih) ob visokih vodah ipd. Postopek izvedbe verjetnostne analize je podrobneje opisan tudi v drugih virih npr. Bezak in Mikoš (2014), Piry (2020) in Šraj et al. (2012). Piry (2020) v svojem delu prikazuje tudi programsko kodo za orodje R (R Core Team, 2018), ki se lahko v prihodnje uporabi za izračun verjetnostnih analiz z upoštevanjem negotovosti oziroma določitvijo intervalov zaupanja.

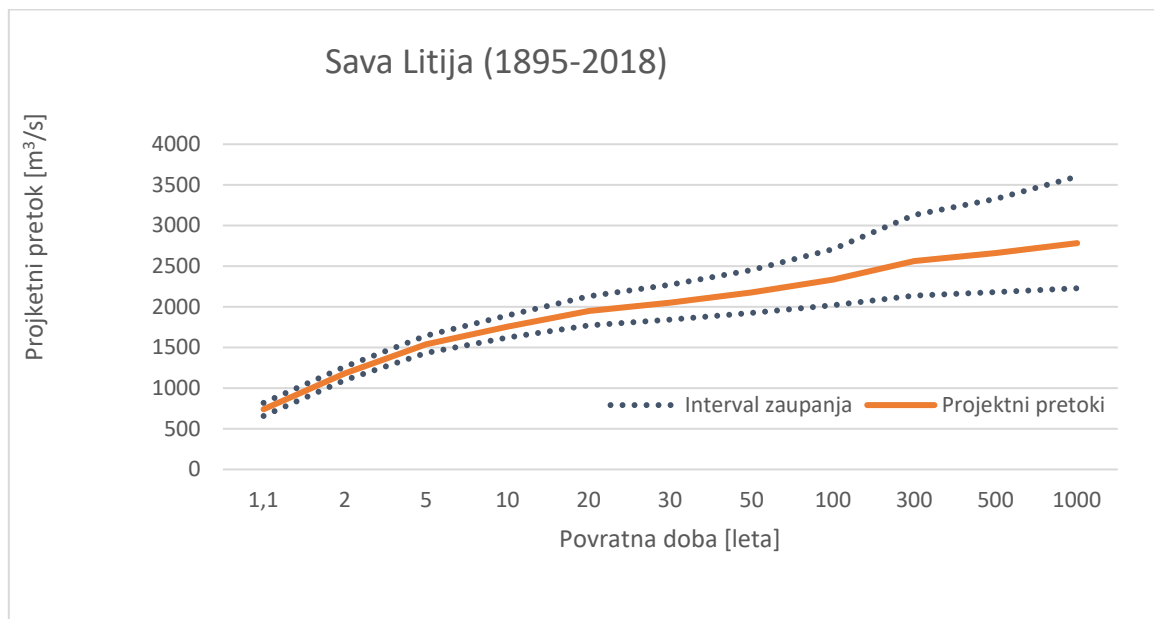


Slika 5: Primer rezultatov verjetnostnih analiz z upoštevanjem intervalov zaupanja. Podobni rezultati so pripravljani za 179 vodomernih postaj v Sloveniji, kjer so bili na voljo merjeni podatki o pretokih (Piry, 2020).

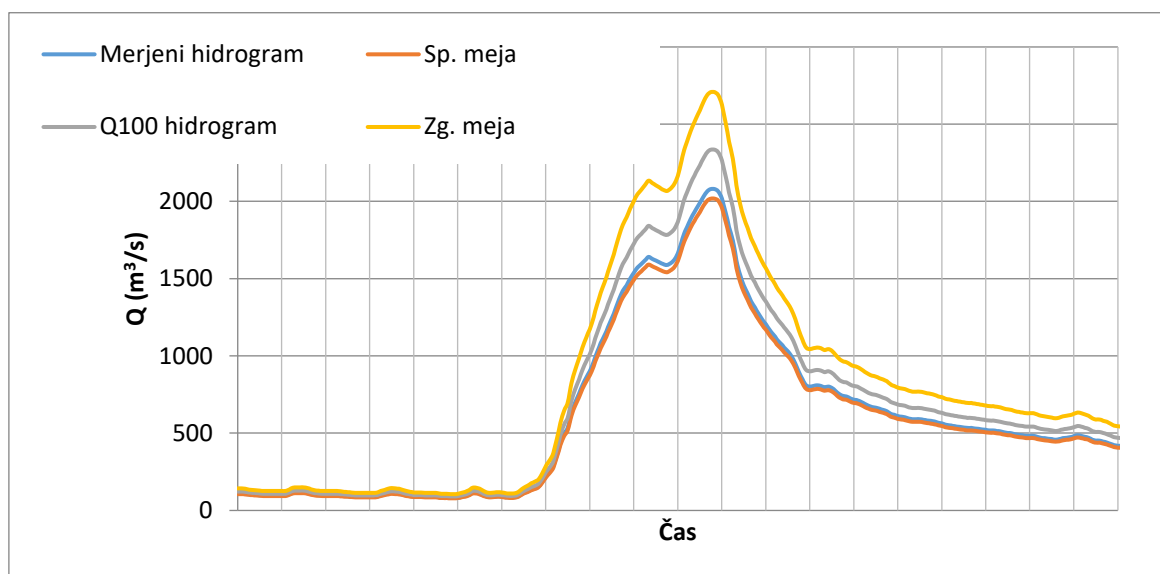
Za določitev projektnega hidrograma na podlagi projektnih pretokov se kot že omenjeno lahko uporabi metoda tipičnega hidrograma (TFH), ki jo omenja Yue et al. (2002). Sliki 6 in 7 prikazujeta primer postopka določanja projektnih hidrogramov z uporabo metodologije TFH. Primer izračuna TFH oz. enačbe za 100-letno povratno dobo je naslednji:

$$Q_{proj,t} = Q_{izbr,t} \cdot \frac{Q_{100}}{Q_{izbr,max}}, \quad (1)$$

kjer je $Q_{proj,t}$ vrednost projektnega hidrograma v času t , $Q_{izbr,t}$ vrednost izbranega tipičnega hidrograma v času t , Q_{100} vrednost pretoka s 100-letno povratno dobo glede na rezultate verjetnostnih analiz in $Q_{izbr,max}$ največji izmerjeni pretok za izbran tipični hidrogram. Analogen postopek se lahko uporabi tudi za katero koli drugo povratno dobo. Omenjena metodologija je bila uporabljena tudi v primeru določanja projektnih hidrogramov na območju srednje Save (UL FGG, 2022).



Slika 6: Primer rezultatov verjetnostnih analiz za postajo Litija na reki Savi z upoštevanjem največjih letnih konic pretokov za obdobje 1895–2018



Slika 7: Primer hidrogramov po metodi TFH skupaj z upoštevanjem intervalov zaupanja.

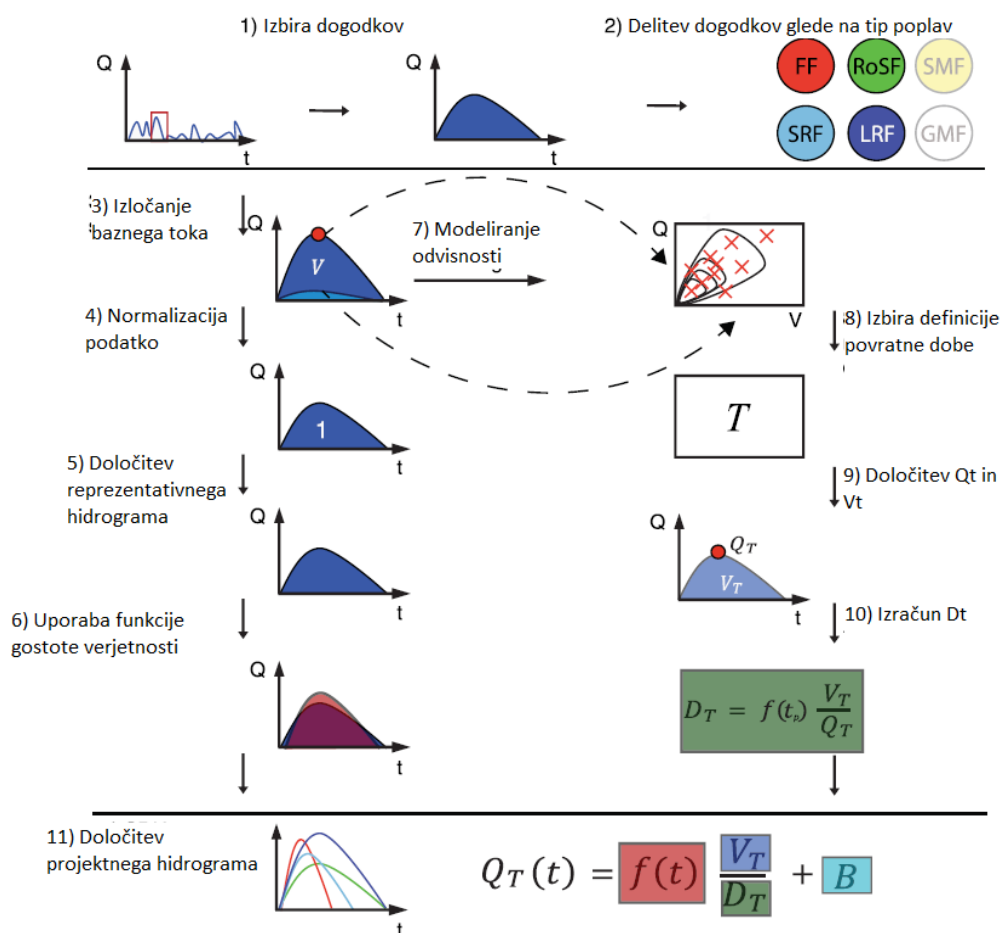
Slika 6 prikazuje primer rezultatov verjetnostnih analiz za postajo Litija na reki Savi z upoštevanjem največjih letnih konic pretokov (AM) za obdobje 1895–2018. Izračuni so narejeni z uporabo porazdelitvene funkcije GEV in parametri ocenjeni z metodo momentov L. Prikazane so tako ocenjene vrednosti pretokov (oranžna črta) kot intervali zaupanja (črtkani sivi črti). Rezultati so povzeti po Piry (2020). Slika 7 prikazuje projektne hidrograme, dobljene po metodi TFH (na podlagi izračunanega 100-letnega projektnega pretoka) skupaj z upoštevanjem intervalov zaupanja. Kot izhodišče (tipični hidrogram) je bil uporabljen merjeni visokovodni val iz leta 2010, ki je prikazan z modro barvo. Siv hidrogram označuje projektni hidrogram s 100-letno povratno dobo, v oranžnih odtenkih sta prikazana

še hidrograma z upoštevanjem mej zaupanja. Gre torej za relativno preprosto metodo, ki upošteva rezultate verjetnostnih analiz, kjer lahko upoštevamo tudi določeno negotovost (npr. zaradi kratkih nizov merjenih podatkov), in lastnosti porečja, ki se odražajo v obliki izbranega tipičnega hidrograma (npr. hudourniška območja imajo krajši čas naraščanja hidrograma). Treba je poudariti, da bi kot izhodišče (tipični hidrogram) seveda lahko uporabili tudi kakšen drug visokovodni val. Z uporabo večjega števila tipičnih hidrogramov bi lahko pridobili nabor več projektnih hidrogramov, ki bi jih nato lahko uporabili kot vhodni podatek v hidravličnih analizah (ali za kakšen drug namen), kar pomeni, da bi tako upoštevali določeno negotovost v hidroloških izhodiščih.

2.2 Kompleksnejša metoda

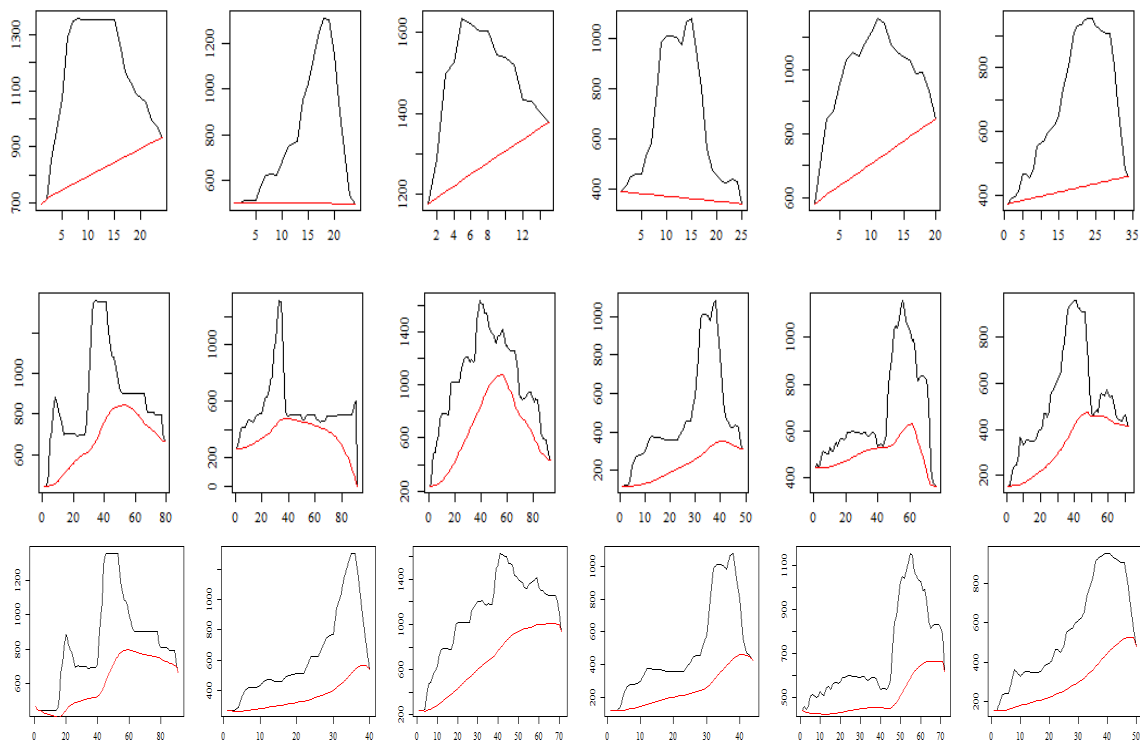
V literaturi je na voljo veliko število različnih metod, ki omogočajo določitev projektnih hidrogramov z uporabo bolj ali manj kompleksnih postopkov (npr. Ayalew et al. (2022); Brunner et al. (2017); Gądek et al. (2022); Grimaldi et al. (2012); Grimaldi in Petroselli (2015); Mediero et al. (2010); Petroselli in Grimaldi (2018)). Metodologija, ki so jo predlagali Brunner et al. (2017) je ena izmed teh, kjer so uporabljeni nekateri malce bolj kompleksni koraki, kot rezultat dobimo projektne hidrograme, kjer v postopku določitve le-teh upoštevamo tako podatke o konicah pretokov kot podatke o volumnih visokovodnih valov. Slika 8 predstavlja glavne korake metodologije, ki jih lahko opišemo z naslednjimi točkami:

- Izbira vzorca pretokov za analize (npr. metoda največjih letnih visokovodnih konic (AM));
- Možnost delitve dogodkov glede na tip poplav (npr. hudourniške poplave, poplave zaradi taljenja snega), če imamo na voljo dovolj podatkov za analize. V nasprotnem primeru se lahko vsi dogodki obravnavajo v sklopu ene analize;
- Izločanje baznega odtoka glede na izbrano metodo (npr. metoda na podlagi določanja t.i. prevojnih točk);
- Normalizacija podatkov kot predstavljeno v Brunner et al. (2016) in Brunner et al. (2017);
- Izbira ustreznih reprezentativnih hidrogramov (npr. krajši, daljši dogodki, več različnih kombinacij), podobno kot pri metodi TFH;
- Uporaba funkcije gostote verjetnosti za opis oblike hidrograma enote (npr. gama porazdelitev);
- Modeliranje odvisnosti med konicami pretokov in volumni visokovodnih valov (npr. uporaba bivariatnih analiz pretokov in volumnov z uporabo funkcij kopula) (glej npr. Šraj et al. (2015, 2013));
- Izbira definicije povratne dobe (npr. AND ali OR ali običajne univariatne povratne dobe) (Šraj et al., 2013);
- Izračun projektnega hidrograma za različne vrednosti povratnih dob z upoštevanjem negotovosti oziroma naravne variabilnosti.



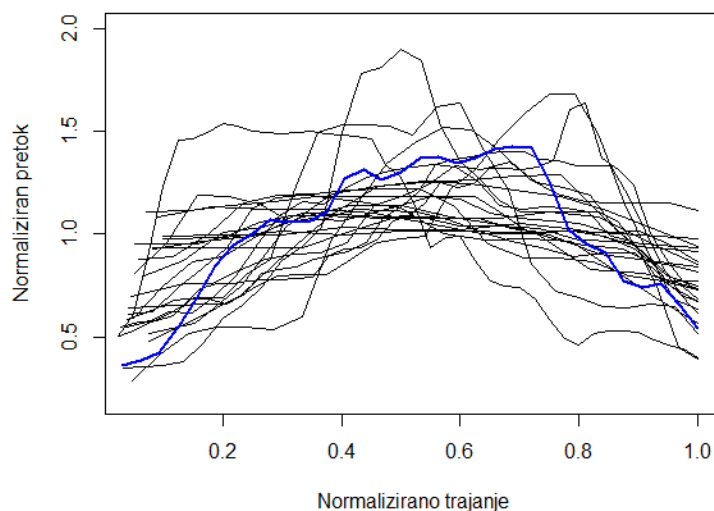
Slika 8: Kompleksnejša metodologija določanja projektnih pretokov, ki so jo predlagali Brunner et al. (2017).

Za izločanje baznega odtoka se lahko uporabijo različne metode, ki temeljijo na določanju t.i. prevojnih točk (WMO, 2008) ali različni avtomatizirani postopki oz. filtri (npr. Eckhardt, 2005; Nathan and McMahon, 1990). Nekatere izmed teh metod uporabljajo tudi parametre, ki jih je pred uporabo metode smiselno ustrezno oceniti. Primeri uporabe različnih metod in vpliv parametrov na rezultate so za visokovodne valove v Sloveniji predstavljeni v Horvat (2014). Pri metodi, ki sta jo predlagala npr. Nathan and McMahon (1990), se pogosto uporablja vrednost parametra 0,925, pri metodi, ki jo je predlagal Eckhardt (2005), je vrednost konstante $k = 0,99$ in vrednost $BFI = 0,8$. Slika 9 prikazuje primer uporabe treh metod izločanja baznega odtoka na podatkih z vodomerne postaje Dravograd na reki Dravi, in sicer a) metoda določanja prevojnih točk, b) metoda, ki sta jo predlagala Nathan and McMahon (1990) in c) metoda, ki jo je predlagal Eckhardt (2005). Opazimo lahko, da je tretja metoda (Eckhardt, 2005) v tem izbranem primeru relativno neustrezna, saj so rezultat metode hidrogrami, ki imajo izrazito dolgo trajanje, kar je sicer posledica obratovanja gorvodnih HE. Posledično predlagamo, da se pred nadaljnjo uporabo testira več različnih metod izločanja baznega odtoka, kot so predlagali tudi Lacko et al. (2022). Do podobnih ugotovitev je prišla tudi Horvat (2014).



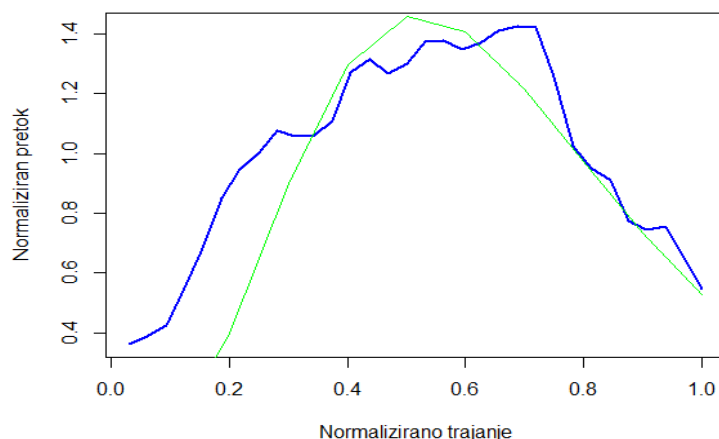
Slika 9: Primer izločanja baznega odtoka za vodomerno postajo Dravograd na reki Dravi. Prikazani so največji letni hidrogrami za obdobje 1996–2001. Prva vrsta hidrogramov prikazuje rezultate po metodi a) (WMO, 2008), druga vrsta po metodi b) Nathan and McMahon (1990) in tretja vrsta po metodi c) (Eckhardt, 2005). X os prikazuje trajanje hidrograma v urah od začetne do končne točke (površinski odtok enak baznemu), glede na izbrano metodo izločanja baznega odtoka. Rdeča črta označuje ocenjeni bazni odtok in črna so merjeni urni podatki o pretokih.

Naslednji korak analize je normalizacija podatkov o hidrogrameh, kot je to opisano v Brunner et al. (2017) in grafično prikazano na sliki 10 za primer hidrogramov z vodomerne postaje Dravograd na reki Dravi.



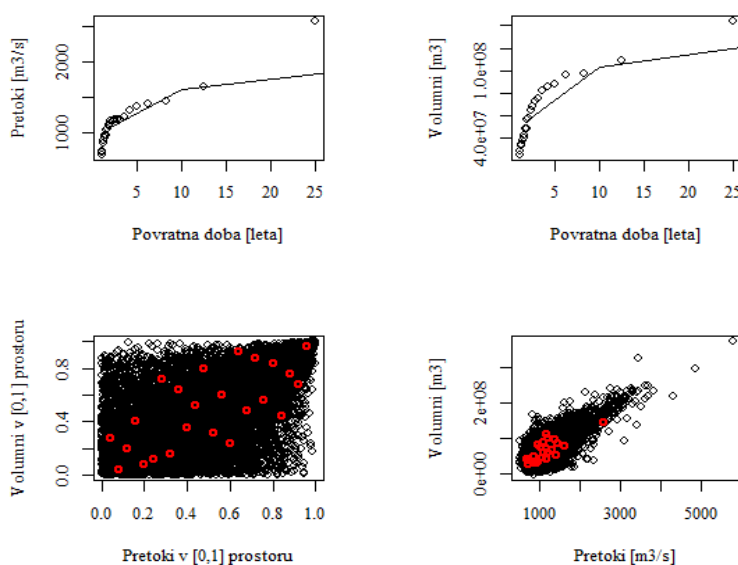
Slika 10: Primer normalizacije podatkov o visokovodnih hidrogrameh glede na podatek o trajanju visokovodnega vala in razmerju med prostornino in trajanjem visokovodnega vala. Prikazani so visokovodni valovi z vodomerne postaje Dravograd na reki Dravi.

Sledi korak izbire tipičnega hidrograma ter opis le-tega z uporabo funkcije gostote verjetnosti (npr. gama porazdelitev). Postopek podrobneje opisujejo Brunner et al. (2017) in je grafično kot primer prikazan na sliki 11.



Slika 11: Primer izbranega normaliziranega tipičnega hidrograma (modra črta) in poenostavljen opis oblike z uporabo gama porazdelitve (zelena črta).

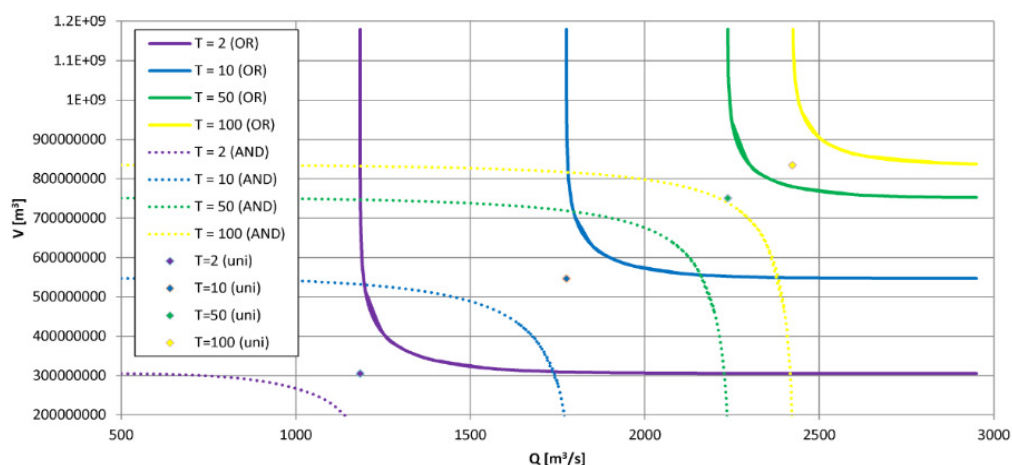
Sledi modeliranje odvisnosti med pretoki in volumni visokovodnih valov, kjer se lahko uporabijo funkcije kopula, ki so bile pri nas že uporabljene in so se izkazale kot ustrezne (npr. Šraj et al. (2013) in Šraj et al. (2015)). Postopek izvedbe takšnih analiz je podrobneje opisan v obstoječi literaturi (npr. Šraj et al. (2013) in Šraj et al. (2015)). Pred uporabo oziroma izbiro določene robne porazdelitve ali funkcije kopula je potrebno ustreznost izbire potrditi z uporabo statističnih testov in grafičnim prikazom rezultatov (npr. Šraj et al. (2013) in Šraj et al. (2015)).



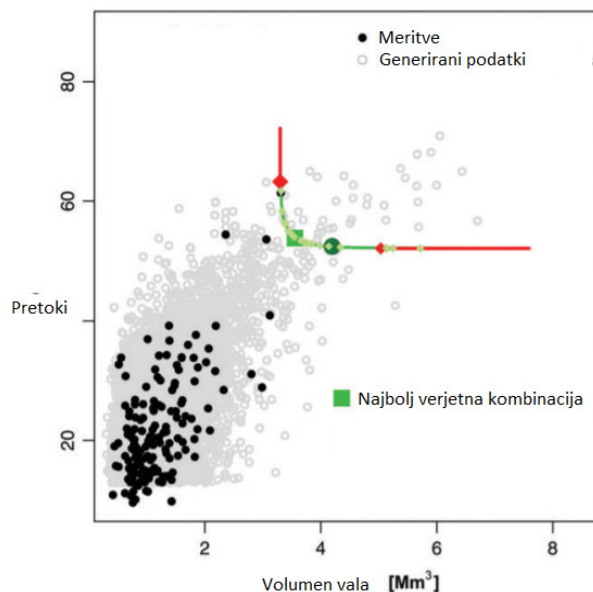
Slika 12: Prikaz ujemanja med izbranimi robnimi porazdelitvenima funkcijama GEV (zgoraj) in izbrano funkcijo kopula Joe (spodaj), kjer je prikazanih 10.000 generiranih parov podatkov na podlagi

ocenjenega parametra Joe kopule. Črne točke prikazujejo simulirane vrednosti in rdeče izmerjene podatke.

Za določitev projektnega hidrograma po kompleksnejši metodi, ki so jo predlagali Brunner et al. (2017), je zahtevana tudi izbira definicije povratne dobe. Pri multivariatnih analizah (hkratnih analizah dveh ali več spremenljivk) je namreč definicija povratne dobe drugačna kot v primeru klasičnih univariatnih analiz (ena spremenljivka, npr. verjetnostne analize visokovodnih konic). Najpogostejši definiciji povratne dobe sta OR in AND (slika 13). Ena izmed glavnih razlik v primerjavi z univariatnimi povratnimi dobami je ta, da imajo lahko v primeru multivariatnih povratnih dob različne kombinacije vrednosti pretokov in volumnov enako vrednost povratne dobe (krivulje na sliki 13). Posledično se je potrebno odločiti, katero kombinacijo pretoka in volumna (točko na krivulji) izbrati za uporabo pri nadaljnjih analizah oziroma za določitev projektnih hidrogramov. Slika 14 prikazuje možne izbire kombinacij oz. točk, kjer je najbolj smiselna izbira točka, ki označuje najbolj verjetno kombinacijo pretoka in volumna vala (Brunner et al., 2016). Primer povratne dobe OR tako označuje primer, ko se zgodi vsaj eden od obravnavanih dogodkov (ali konica pretoka ali volumen vala), primer povratne dobe AND pa označuje primer, ko se zgodita oba obravnavana dogodka (tako konica pretoka kot volumen vala) (Šraj et al., 2013). Očitno je torej, da je definicija povratne dobe OR z vidika načrtovanja obravnavana kot tista, kjer je varnost večja. Izbrana je bila tudi v študiji, ki so jo naredili Brunner et al. (2017). Za določitev projektnega hidrograma je potrebno definirati še trajanje hidrograma, ki so ga Brunner et al. (2017) definirali glede na razmerje volumna vala, konice pretoka in časa nastopa konice pretoka glede na izbrano gama porazdelitev za opis oblike hidrograma.

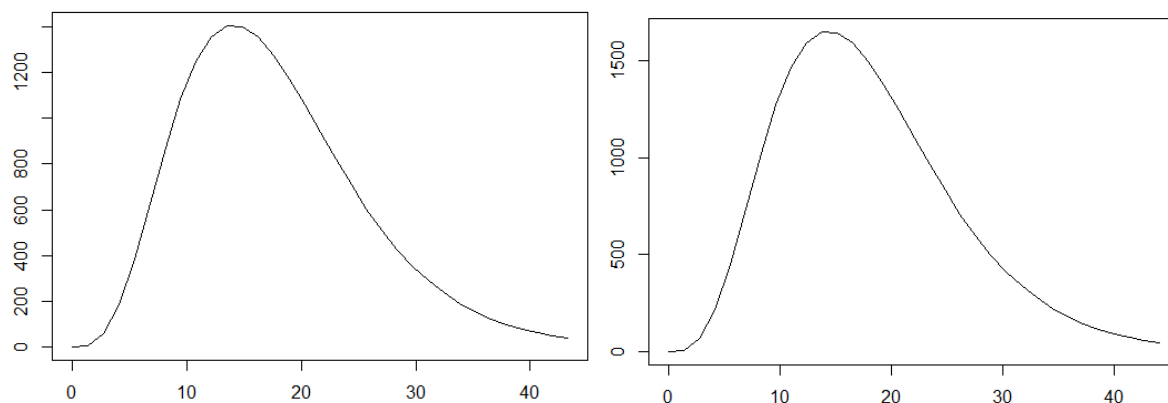


Slika 13: Primerjava med povratnimi dobami (OR in AND), ki nastopajo v multivariatnih analizah, in »klasičnimi« povratnimi dobami, s katerimi se srečamo pri univariatnih analizah (npr. verjetnostne analize pretokov). Slika je povzeta po Šraj et al. (2013).



Slika 14: Prikaz najprimernejše izbire kombinacije pretoka in volumna vala v primeru multivariatnih povratnih dob. Slika je povzeta po Brunner et al. (2016).

Na podlagi predhodno opisanih korakov lahko nato določimo projektne hidrograme. Slika 15 prikazuje primer takšnih hidrogramov z 10-letno povratno dobo glede na definiciji povratnih dob AND in OR. Očitno je, da je opisana metodologija, ki so jo predlagali Brunner et al. (2017) precej bolj kompleksna v primerjavi s TFH metodo, ki je posledično seveda precej pogostejše uporabljena v inženirski praksi.



Slika 15: Primer projektних hidrogramov z 10-letno povratno dobo glede na definicijo povratne dobe AND (leva slika) ter glede na definicijo povratne dobe OR (desna slika). X os prikazuje trajanje pretoka v urah, y-os pa vrednosti pretokov v m^3/s (opomba: skali ordinate nista enaki). Prikazani so rezultati analiz za vodomerno postajo Dravograd na reki Dravi.

3 Izračun projektnih hidrogramov na podlagi podatkov o projektnih padavinah oziroma brez uporabe podatkov o pretokih

Če z merjenimi podatki o pretokih ne razpolagamo oz. jih je premalo za izvedbo verjetnostnih analiz ali uporabo kompleksnejše metode, ki so jo predlagali Brunner et al. (2017), za določanje projektnih pretokov oz. hidrogramov predlagamo v nadaljevanju opisano metodologijo. V tem primeru gre največkrat za tako imenovana nemerjena porečja, kjer ni na voljo dovolj podatkov o pretokih oz. podatkov o pretokih sploh ni na razpolago. Obsežen pregled možnih pristopov pri takšnih analizah podajajo Hrachowitz et al. (2013) in Blöschl et al. (2013). Podobno kot pri metodah določanja projektnih hidrogramov na podlagi merjenih podatkov o pretokih, je tudi to poglavje razdeljeno v dve podpoglavji, kjer prvo (3.1) obravnava enostavnejšo metodo, drugo (3.2) pa kompleksnejšo metodo.

3.1 Manj kompleksne metode

3.1.1 Regionalne empirične krivulje

V primeru, ko zadostuje samo podatek o projektnem pretoku in podatek o projektnem hidrogramu ni potreben, je eden od možnih pristopov uporaba regionalnih empiričnih krivulj. Se pa moramo zavedati, da je to zelo približna (groba) ocena pretoka in zato predlagamo, da se, če je le možno, izdelata hidrološki model porečja in uporabi projektne padavine (poglavje 3.1.2). V primeru uporabe regionalnih empiričnih krivulj za približno oceno projektnega pretoka oz. boljše razpona možnih vrednosti projektnega pretoka predlagamo uporabo že izpeljanih regionalnih empiričnih krivulj (predvsem za območja v razponu velikosti, kot so bila upoštevana pri izpeljavi enačb; manj primerna je ekstrapolacija za zelo majhna porečja, ki v izpeljavo enačb niso bila vključena), ki jih je določil Piry (2020) za 9 območij v Sloveniji:

- 1000 – Pomurje;
- 2000 – Podravje;
- 3000 – Sava in pritoki Bohinjke in Dolinke;
- 4000 – Sava brez rek Ljubljana, Savinja, Krka;
- 5000 – Ljubljana;
- 6000 – Savinja;
- 7000 – Krka;
- 8000 – Soča, Vipava;
- 9000 – Povodje Jadranskega morja.

Slika 16 prikazuje primer izpeljanih empiričnih krivulj za porečje reke Ljubljanice. Z uporabo teh enačb lahko na podlagi podatka o prispevni površini porečja ocenimo projektne pretoke s 100-letno povratno dobo (Q_{100}) in upoštevanjem negotovosti. Seveda pa se moramo nujno zavedati enostavnosti takega empiričnega pristopa in posledično tudi negotovosti rezultatov. Ostale vrednosti povratnih dob lahko določimo s pomočjo razmerij s Q_{100} glede na rezultate verjetnostnih analiz s sosednjih, hidrološko podobnih porečij z razpoložljivimi merjenimi podatki o pretokih. Primer za določitev projektne pretoka z 10-letno povratno dobo:

$$Q_{10,izb} = Q_{10,mer} \cdot \frac{Q_{100,izb}}{Q_{100,mer}}, \quad (2)$$

kjer je $Q_{10,izb}$ vrednost pretoka z 10-letno povratno dobo v primeru izbranega porečja, $Q_{10,mer}$ vrednost pretoka z 10-letno povratno dobo v primeru sosednjega in hidrološko podobnega porečja, kjer so na voljo merjeni podatki o pretokih (rezultat verjetnostnih analiz), $Q_{100,izb}$ je vrednost pretoka s 100-letno povratno dobo v primeru izbranega porečja (vrednost določena glede na regionalizirane empirične krivulje) ter $Q_{100,mer}$ vrednost pretoka s 100-letno povratno dobo v primeru sosednjega merjenega porečja (rezultat verjetnostnih analiz). Izpeljane enačbe za $Q_{10,izb}$ so prikazane v preglednici 4.

Kot primer podajamo izračun za vodotok Draščica, in sicer za prispevno območje do naravnega rezervata Ribniki, ki se nahaja v Krajinskem parku Ljubljansko barje. Prispevna površina (A) je bila glede na lidarske podatke ocenjena na približno 12.5 km². Z uporabo regionalnih empiričnih enačb za porečje reke Ljubljanice (Piry, 2020) lahko ocenimo vrednosti projektnih pretokov, ki so podane v preglednici 5. Tako ocenjena vrednost Q_{100} v tem primeru znaša 29 m³/s oz. 12–64 m³/s ob upoštevanju obeh ovojníc. Dodatno smo rezultate primerjali še s Kresnikovo enačbo, ki se pogosto uporablja v slovenski projektantski praksi:

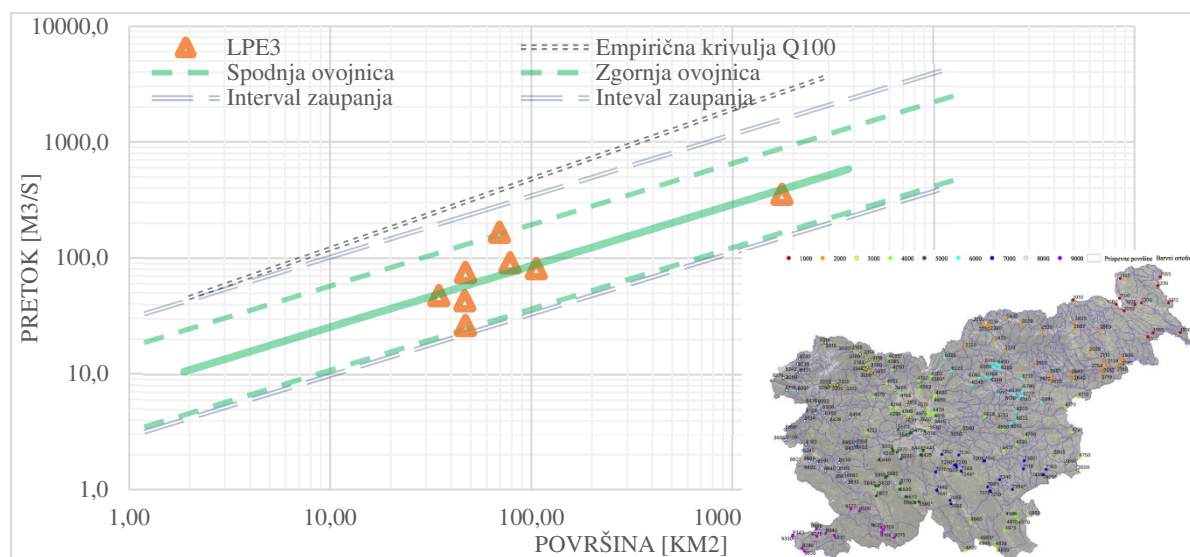
$$Q = \alpha \cdot A \cdot \frac{32}{0,5 + \sqrt{A}}, \quad (3)$$

kjer je α koeficient, ki zajema vse faktorje, ki vplivajo na odtočnost [0,6–6] (vrednosti faktorja so vezane predvsem na topografske značilnosti prispevnega območja), A pa površina porečja v km². Če privzamemo vrednost parametra $\alpha = 0,6$, lahko Q_{100} ocenimo kot 60 m³/s. Izračun smo naredili tudi z uporabo t.i. VGI enačbe:

$$Q = q \cdot A^\alpha, \quad (4)$$

kjer parameter q podaja vrednost specifičnega pretoka s 100-letno povratno dobo in za območje osrednje Slovenije znaša med 7 in 10 (privzeta vrednost 8). Parameter α v tem primeru zajema vpliv naklona porečja (med 0,5 in 0,75; privzeta vrednost 0,6). Ocena v tem primeru znaša 36 m³/s. Vidimo lahko, da so tako ocenjeni projektni pretoki z uporabo regionalnih empiričnih enačb z upoštevanjem negotovosti v razponu vrednosti, ki jih lahko dobimo tudi z uporabo nekaterih drugih empiričnih enačb, ki se pri nas pogosto uporabljajo.

Kot primer posebej izdelanih lokalnih regionalnih empiričnih krivulj lahko omenimo tudi enačbe, ki so bile izpeljane posebej za območje srednje Save (UL FGG, 2022). V tem primeru so bile na podlagi projektnih pretokov iz 21 vodozbirnih območij, ki so bila določena s strani naročnika (HSE Invest d.o.o.), izpeljane empirične enačbe za oceno 10, 20, 50, 100, 500 in 1000-letne povratne dobe (UL FGG, 2022). Gre za primer lokalnih enačb, ki so bile pripravljene posebej za obravnavano območje (t.j. pritoki reke Save na območju Državnega prostorskega načrta za HE Renke, HE Trbovlje in HE Suhadol). Takšne enačbe se lahko na podlagi ustrezne metodologije pripravijo tudi za druga območja v Sloveniji.



Slika 16: Prikaz regionalnih verjetnostnih empiričnih krivulj za pretok s 100-letno povratno dobo za porečje reke Ljubljanice (glede na ARSO postaje z oznako 5000). Povzeto po Piry (2020).

Preglednica 4: Izpeljane empirične enačbe za oceno 100-letnih projektnih pretokov za posamezna porečja. A je prispevna površina območja v km² ter Q pretok s 100-letno povratno dobo v m³/s. Povzeto po Piry (2020).

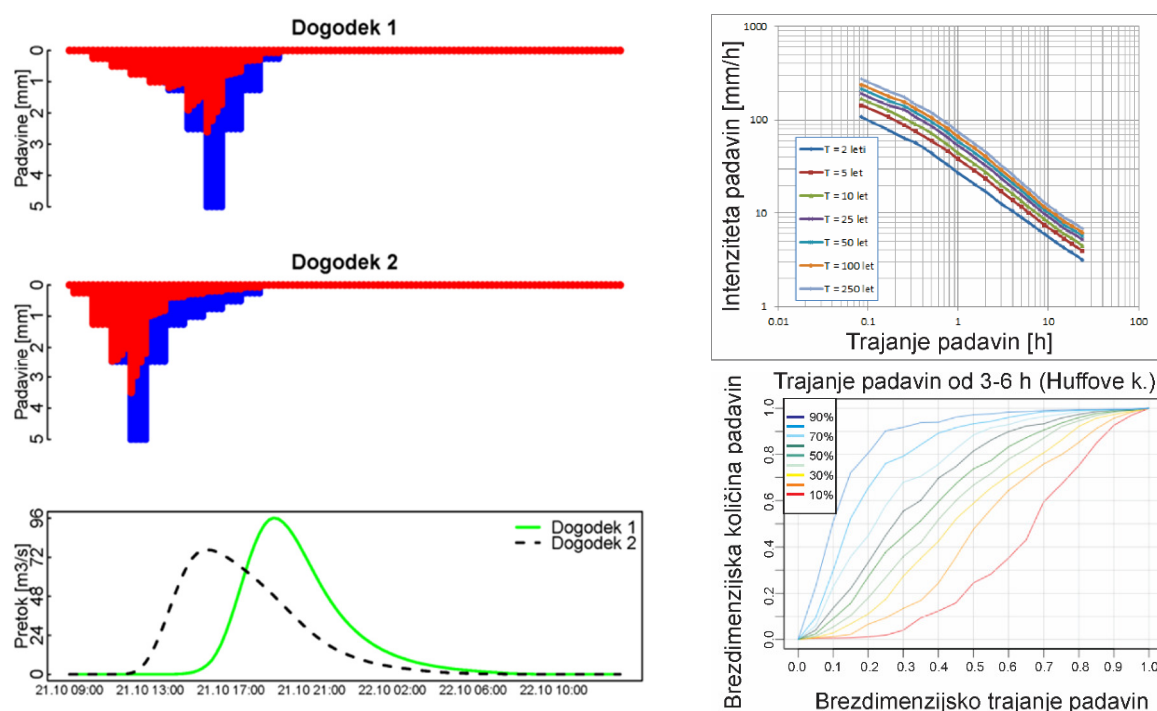
Porečje	Vrsta krivulje	Izraz za preračun [m ³ /s]	Porečje	Vrsta krivulje	Izraz za preračun [m ³ /s]
1000 – Pomurje	Interval zaupanja	$Q = 16 \cdot A^{0,6805}$	2000 – Podravje	Interval zaupanja	$Q = 7,2 \cdot A^{0,7246}$
	Zgornja ovojnica	$Q = 4,9 \cdot A^{0,6805}$		Zgornja ovojnica	$Q = 4,9 \cdot A^{0,7246}$
	Glavna krivulja	$Q = 2,47 \cdot A^{0,6805}$		Glavna krivulja	$Q = 2,44 \cdot A^{0,7246}$
	Spodnja ovojnica	$Q = 0,95 \cdot A^{0,6805}$		Spodnja ovojnica	$Q = 1,1 \cdot A^{0,7246}$
	Interval zaupanja	$Q = 0,82 \cdot A^{0,6805}$		Interval zaupanja	$Q = 0,95 \cdot A^{0,7246}$
3000 – Sava in pritoki Bohinjke in Dolinke	Interval zaupanja	$Q = 17 \cdot A^{0,7835}$	4000 – Sava brez rek, Ljubljana, Savinja, Krka	Interval zaupanja	$Q = 17 \cdot A^{0,7707}$
	Zgornja ovojnica	$Q = 7,2 \cdot A^{0,7835}$		Zgornja ovojnica	$Q = 9,1 \cdot A^{0,7707}$
	Glavna krivulja	$Q = 4,01 \cdot A^{0,7835}$		Glavna krivulja	$Q = 3,64 \cdot A^{0,7707}$
	Spodnja ovojnica	$Q = 0,51 \cdot A^{0,7835}$		Spodnja ovojnica	$Q = 1,45 \cdot A^{0,7707}$
	Interval zaupanja	$Q = 0,42 \cdot A^{0,7835}$		Interval zaupanja	$Q = 1,3 \cdot A^{0,7707}$
5000 – Ljubljana	Interval zaupanja	$Q = 30 \cdot A^{0,5276}$	6000 – Savinja	Interval zaupanja	$Q = 16 \cdot A^{0,8363}$
	Zgornja ovojnica	$Q = 17 \cdot A^{0,5276}$		Zgornja ovojnica	$Q = 6,0 \cdot A^{0,8363}$
	Glavna krivulja	$Q = 7,52 \cdot A^{0,5276}$		Glavna krivulja	$Q = 3,29 \cdot A^{0,8363}$
	Spodnja ovojnica	$Q = 3,2 \cdot A^{0,5276}$		Spodnja ovojnica	$Q = 1,4 \cdot A^{0,8363}$
	Interval zaupanja	$Q = 2,9 \cdot A^{0,5276}$		Interval zaupanja	$Q = 1,18 \cdot A^{0,8363}$
7000 – Krka	Interval zaupanja	$Q = 5,8 \cdot A^{0,7045}$	8000 – Soča, Vipava	Interval zaupanja	$Q = 24 \cdot A^{0,7148}$
	Zgornja ovojnica	$Q = 4,0 \cdot A^{0,7045}$		Zgornja ovojnica	$Q = 17,7 \cdot A^{0,7148}$
	Glavna krivulja	$Q = 1,57 \cdot A^{0,7045}$		Glavna krivulja	$Q = 7,46 \cdot A^{0,7148}$
	Spodnja ovojnica	$Q = 0,36 \cdot A^{0,7045}$		Spodnja ovojnica	$Q = 2,0 \cdot A^{0,7148}$
	Interval zaupanja	$Q = 0,31 \cdot A^{0,7045}$		Interval zaupanja	$Q = 1,70 \cdot A^{0,7148}$
9000 – Povodje Jadranskega morja	Interval zaupanja	$Q = 3,2 \cdot A^{0,9719}$			
	Zgornja ovojnica	$Q = 2,0 \cdot A^{0,9719}$			
	Glavna krivulja	$Q = 1,12 \cdot A^{0,9719}$			
	Spodnja ovojnica	$Q = 0,55 \cdot A^{0,9719}$			
	Interval zaupanja	$Q = 0,50 \cdot A^{0,9719}$			

Preglednica 5: Primer ocene projektnih pretokov s povratno dobo 100 let (Q100) in mejnih vrednosti po enačbah, ki jih je predlagal Piry (2020). Ocene so narejene za vodotok Draščica pred vtokom v naravni rezervat Ribniki.

Območje	Draščica
Prispevna površina [km ²]	12,5
Ocena projektnega pretoka Q100 [m ³ /s]	29
Ocena za spodnjo ovojnico Q100 [m ³ /s]	12
Ocena za zgornjo ovojnico Q100 [m ³ /s]	64
Ocena za spodnji interval zaupanja Q100 [m ³ /s]	11
Ocena za zgornji interval zaupanja	113

3.1.2 Hidrološki modeli z upoštevanjem projektnih padavin

Uporabi hidroloških modelov vsekakor dajemo prednost pred uporabo empiričnih pristopov. Poleg tega s hidrološkimi modeli poleg podatka o konici pretoka dobimo celotni projektni hidrogram. Za uporabo predlagamo določanje projektnih pretokov s pomočjo hidrološkega modela (HEC-HMS ali podobnega modela, ki omogoča izračun odtoka za posamezne padavinske dogodke) z upoštevanjem projektnih padavin oziroma projektnega padavinskega dogodka. Pri tej metodi sledimo predpostavki, da projektne padavine z izbrano povratno dobo povzročijo projektni pretok z enako povratno dobo, kar seveda ni nujno res in tega se moramo pri nadaljnjih uporabah rezultatov tovrstnih analiz zavedati. Pri tej metodi se pojavljata še dve glavni odprti vprašanji, ki ju je potrebno ustrezno nasloviti, in sicer projektni padavinski dogodek in ocena parametrov hidrološkega modela. Pri določitvi projektnih padavin je poleg količine in trajanja padavin na dani lokaciji pomembna tudi njihova časovna razporeditev znotraj dogodka, saj lahko bistveno vpliva na rezultate. Slika 17 prikazuje pomembnost upoštevanja dejanske razporeditve padavin znotraj padavinskega dogodka na simulirane pretoke.



Slika 17: Prikaz vpliva razporeditve padavin znotraj padavinskega dogodka na vrednosti pretokov (levo) (povzeto po Dolšak et al. (2015)). Prikaz krivulj ITP in Huffovih krivulj za meteorološko postajo Ljubljano-Bežigrad (desno) (povzeto po Bezak et al. (2017))

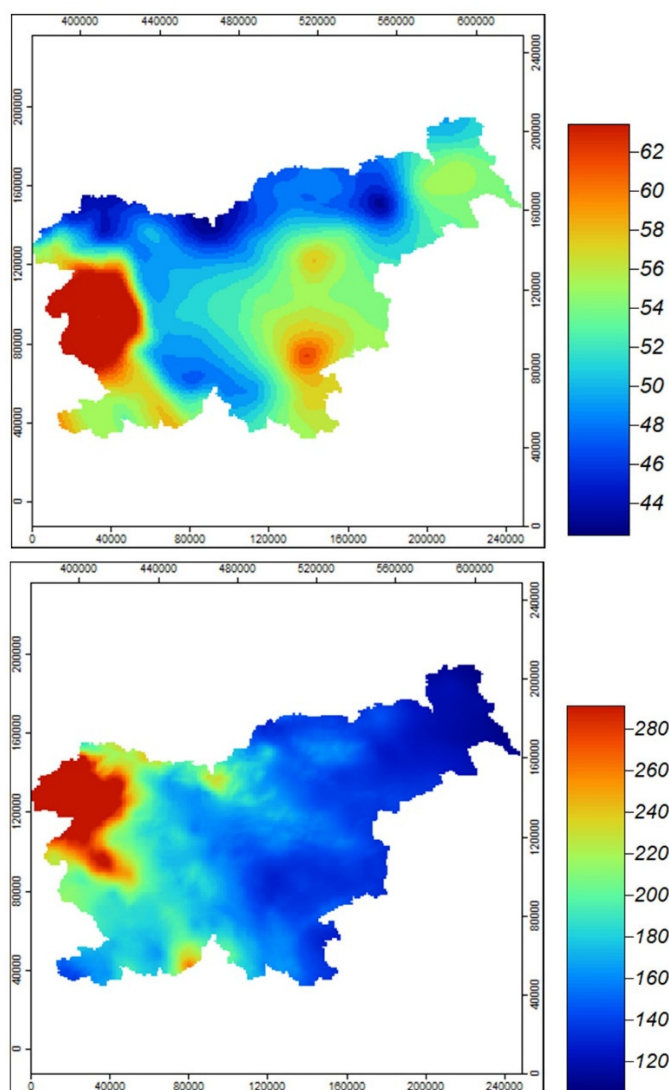
Za določitev količine projektnih padavin lahko uporabimo krivulje intenziteta-trajanje-povratna doba (ITP), za določitev časovne porazdelitve padavin znotraj dogodka pa so za Slovenijo na voljo Huffove krivulje (Dolšak et al., 2016, 2015). Obe vrsti podatkov sta podrobneje predstavljeni v naslednjih

podpoglavjih. Pri izbiri trajanja projektnega padavinskega dogodka pa se priporoča, da je njegovo trajanje približno enako času koncentracije obravnavanega porečja (npr. Bezak et al., 2017; Dirnbek and Šraj, 2010; Dolšak et al., 2015). V primeru, da obravnavamo več hidroloških prereзов na porečju, je smiselno upoštevanje različnih trajanj padavinskega dogodka, a ne bistveno daljših od časa koncentracije celotnega porečja.

Negotovost se v izračunih lahko upošteva z uporabo različnih projektnih padavinskih dogodkov (npr. uporaba 10-, 50- in 90-percentilnih Huffovih krivulj). Različni scenariji nakazujejo tudi različno predhodno vlažnost v primeru posameznih projektnih padavinskih dogodkov.

3.1.2.1 Karte ekstremnih padavin za različne vrednosti povratnih dob (ARSO)

Agencija RS za okolje je pripravila karte ekstremnih padavin v ločljivosti 1 x 1 km, in sicer za različne vrednosti povratnih dob (2, 5, 10, 25, 100 in 250 let) in različna trajanja padavin (22 intervalov od 5 minut do 120 ur). Primer podatkov je prikazan na sliki 18. Točkovni podatki so na voljo na spletni strani: <https://www.crossrisk.eu/en/climate>. Gre za podatke, ki so interpolirani glede na točkovne podatke o ITP krivuljah s posameznih padavinskih postaj. Smiselno bi bilo, da ARSO te podatke uradno objavi na svoji spletni strani kot uradni podatkovni vir in doda še 500-letno povratno dobo, ki jo v praksi potrebujemo pri izdelavi hidrološko-hidravličnih študij.



Slika 18: Primer kart količine ekstremnih padavin (v mm) z resolucijo 1 x 1 km (ARSO) za povratno dobo 100 let s trajanjem padavin 30 min (zgoraj) in 1440 min (1 dan; spodaj).

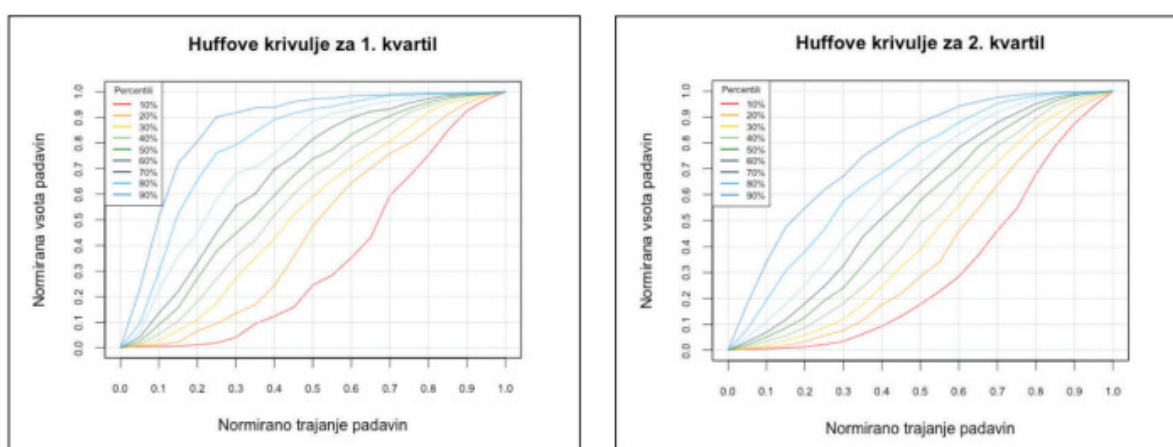
3.1.2.2 Karte Huffovih krivulj, ki opisujejo porazdelitev padavin znotraj padavinskega dogodka

Za ugotavljanje časovne porazdelitve padavin znotraj padavinskega dogodka je Huff (1967) predstavil družino normiranih brezdimenzijskih krivulj, ki jih imenujemo Huffove krivulje. To so vsotne brezdimenzijske krivulje, ki nam za dano lokacijo podajo informacije o časovni razporeditvi padavin znotraj padavinskega dogodka (slika 19) in s katerimi lahko med drugim izdelamo tudi sintetične normirane histograme padavin. Huffove krivulje so se v svetu le redko izdelovale, saj je za njihovo izdelavo treba analizirati velike količine padavinskih podatkov in spisati algoritem oziroma računalniški program, ki tako analizo opravi. Tudi v Sloveniji do pred nekaj leti takih krivulj nismo imeli izdelanih. Dolšak (2015) je pripravil Huffove krivulje za 30 padavinskih postaj na območju Slovenije, za katere

so bili na voljo dovolj dolgi zvezni nizi 5-minutnih meritev padavin (slika 20). Huffove krivulje za posamezno padavinsko postajo so na voljo za različna trajanja padavin:

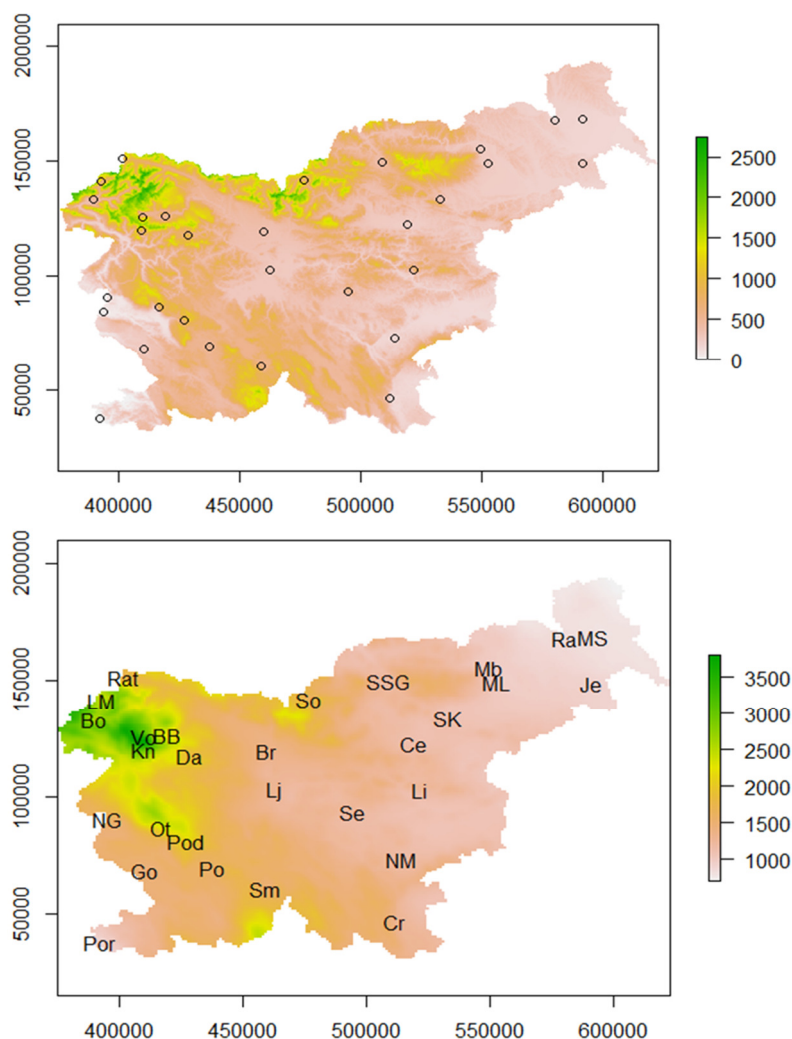
- trajanje, krajše od 6 ur;
- trajanje med 6 in 12 ur;
- trajanje med 12 in 24 ur;
- trajanje, daljše od 24 ur.

Huffove krivulje so podane kot normalizirane vrednosti padavin v odvisnosti od normaliziranega trajanja (slika 21).



Slika 19: Primer Huffovih krivulja za postajo Ljubljana Bežigrad in sicer za dve različni trajanji (manj kot 6 ur (levo) ter med 6 in 12 ur (desno). Povzeto po Dolšak et al. (2015).

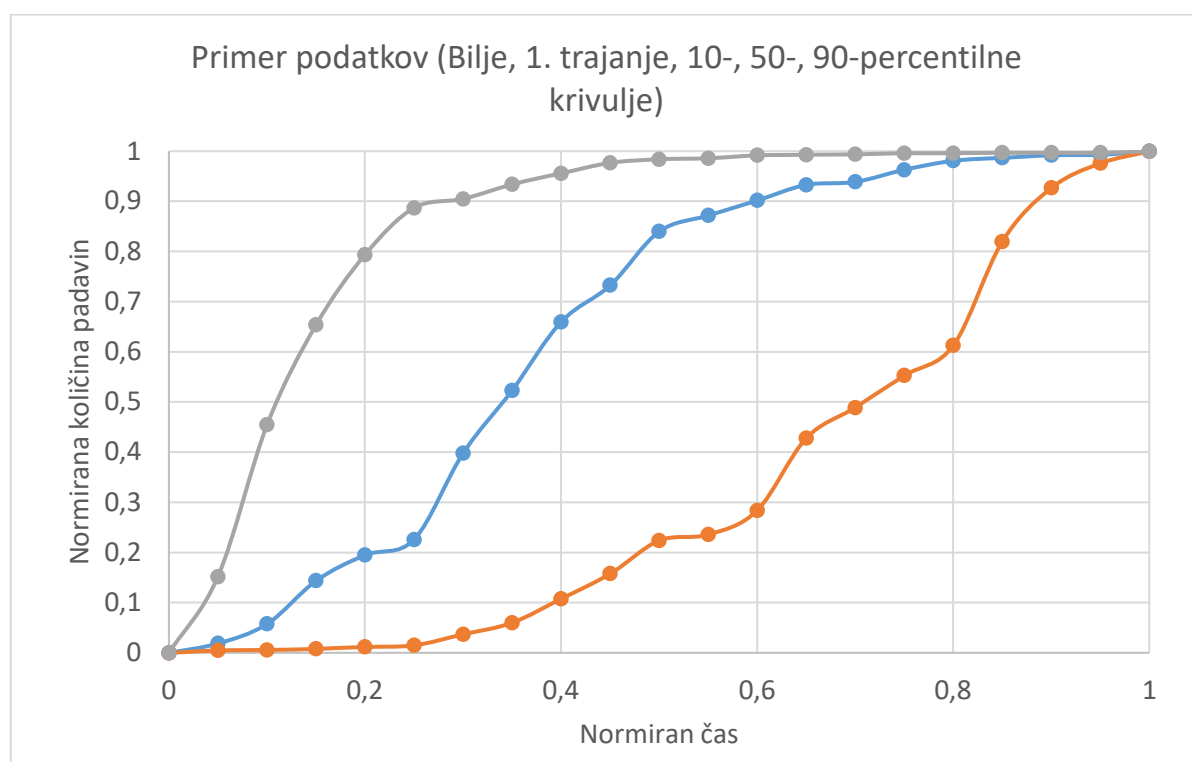
Na podlagi točkovnih podatkov tako izdelanih Huffovih krivulj za 30 padavinskih postaj (slika 20) smo pripravili tudi interpolirane karte z resolucijo 1 x 1 km, ki omogočajo določitev prostorskih značilnosti Huffovih krivulj.



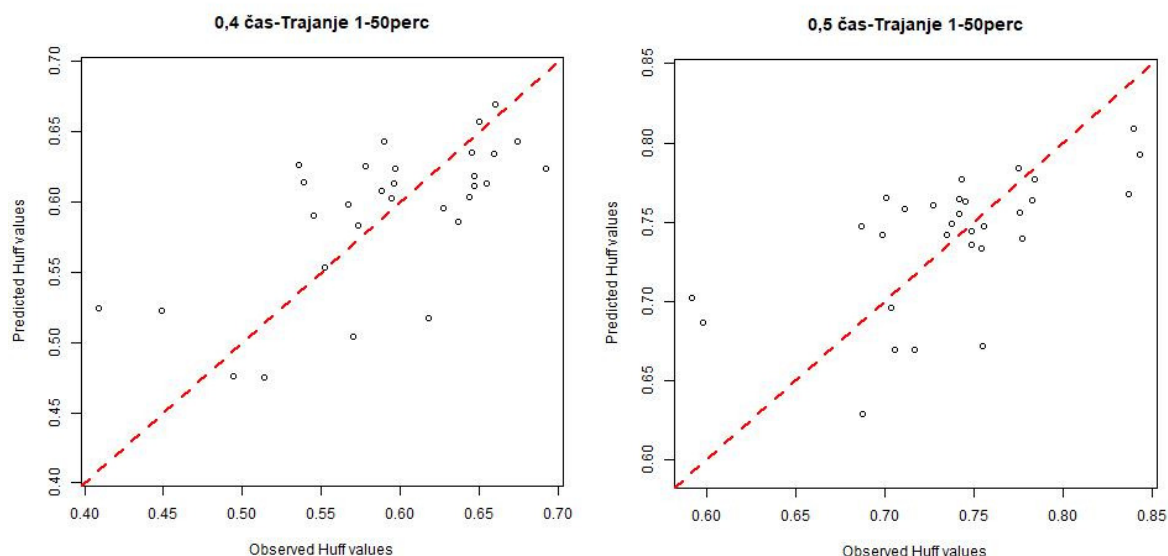
Slika 20: Prikaz lokacij 30 postaj, ki so služile za izhodišče priprave prostorskih kart Huffovih krivulj. Na zgornji sliki je podlaga digitalni model višin, na spodnji sliki pa letna količina padavin v mm za obdobje 1961–2015.

Za vsako izmed trajanj smo pripravili interpolirane karte za 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 in 90-percentilne vrednosti. Za nadaljnjo uporabo je zanimiva predvsem 50-percentilna krivulja, ki predstavlja mediano, torej na neki način najverjetnejšo porazdelitev padavin na določeni postaji, ter 10- in 90-percentilni krivulji, ki predstavljata intervala zaupanja in določata dva relativno ekstremna primera porazdelitve padavin (slika 21). V primeru 90-percentilne krivulje pade večina padavin v prvem delu padavinskega dogodka, v primeru 10-percentilne krivulje pa v zadnjem delu padavinskega dogodka. Zadnji primer je bolj neugoden z vidika poplavne varnosti, saj je predhodna količina padavin pred konico večja kot v primeru 90-percentilne krivulje. Pri normaliziranem trajanju 0 je tudi količina padavin enaka 0, pri trajanju padavin 100 % pa je normalizirana količina padavin enaka 1.

Za interpolacijo smo testirali različne metode, in sicer metodo najbližjega sosedu (angl. *nearest neighbour*, NN), metodo obratne utežne razdalje (angl. *inverse distance weighted*, IDW), navadni kriging (angl. *ordinary kriging*, OK) in kriging z zunanjim vplivom (angl. *external drift kriging*, EDK), kjer smo kot odvisni spremenljivki testirali tako nadmorsko višino postaje kot letno količino padavin. Najustreznejša metoda interpolacije je bila določena z upoštevanjem metode navzkrižne validacije »izpusti enega« (angl. *leave-one-out cross-validation*, LOCV), kjer se je interpolacija izvedla 30-krat, in sicer vsakič brez upoštevanja podatkov ene postaje. Primerjava je bila nato izvedena glede na rezultate interpolacije za dotično postajo. Ugotovili smo, da je metoda EDK z upoštevanjem letne količine padavin kot odvisne spremenljivke dala najboljše rezultate. Rezultati LOCV so prikazani na sliki 22.

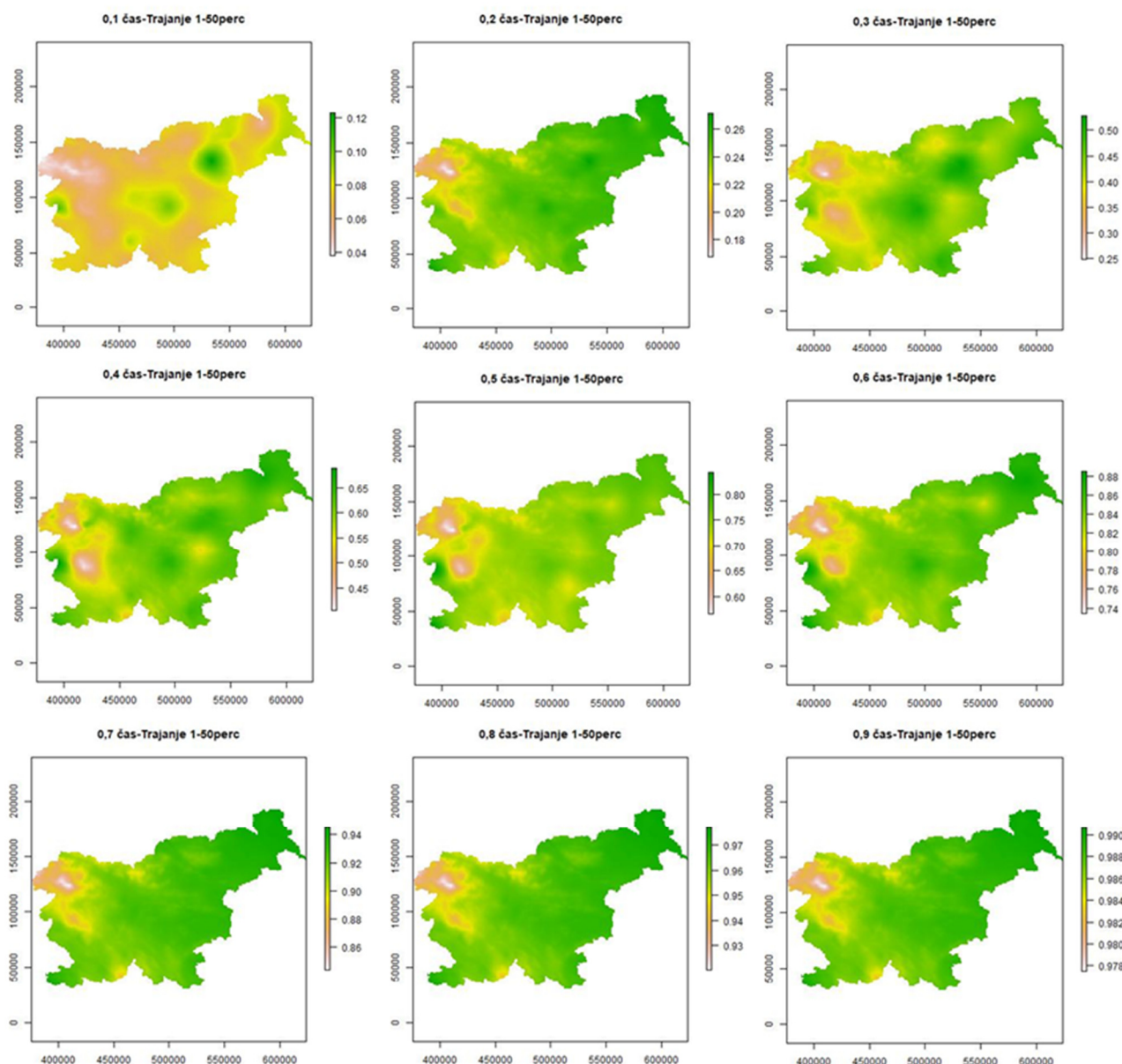


Slika 21: Primer Huffovih krivulj za postajo Bilje za trajanje padavin v 1. razredu. Prikazane so 10- (oranžna), 50- (modra) in 90-percentilne krivulje (siva).

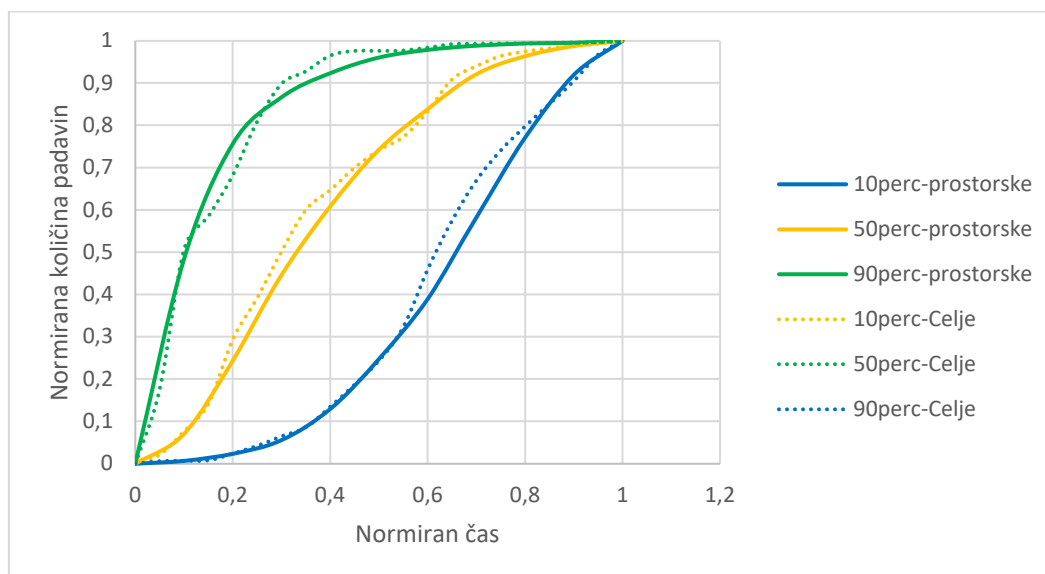


Slika 22: Primer rezultatov prostorske interpolacije z uporabo EDK metode glede na upoštevanje LOCV. X-os prikazuje točkovne dejanske vrednosti Huffovih krivulj, Y-os pa ocenjene glede na rezultat interpolacije.

Slika 23 prikazuje primer interpoliranih vrednosti za trajanje padavin, krajših od 6 ur ter za 50-percentilno krivuljo. Podobne karte so bile pripravljene tudi za druge omenjene kombinacije, torej za 4 različna trajanja padavin, ki so bila omenjena zgoraj, in za 10-, 50- in 90-percentilne krivulje (Priloga 1: Interpolirane karte Huffovih krivulj). Interpolirane karte omogočajo določitev prostorskih vrednosti Huffovih krivulj za izbrano porečje. Na podlagi tako pripravljenih kart se za določeno porečje izvednoti povprečne vrednosti za 10-, 20-, 30-, ..., 90-percentilne vrednosti krivulje, ki predstavljajo alternativo točkovnim vrednostim Huffovih krivulj. Ta podatek se lahko nato združi s podatkom o ekstremnih padavinah za določitev projektnega padavinskega dogodka. Primerjava s točkovnimi vrednostmi za primer porečja Savinje je pokazala, da so prostorsko interpolirane krivulje relativno podobne točkovnim (slika 24). Pri tem območju gre sicer za del Slovenije, kjer je relativno majhno število točkovnih podatkov o Huffovih krivuljah (slika 24).



Slika 23: Primer interpoliranih vrednosti Huffovih za primer 50-percentilne krivulje in trajanje padavin, krajše od 6 ur. Vsaka izmed kart predstavlja stanje ob določenem normaliziranem času (med 0,1 in 0,9, s korakom 0,1 normaliziranega časa). V času 0 je količina padavin enaka 0, v času 1 pa skupni količini padavin za izbran dogodek (količina, ki je določena glede na povratno dobo padavin in trajanje padavinskega dogodka). Vrednosti na kartah (legenda) prikazujejo normalizirane vrednosti padavin za določen normaliziran časovni korak.



Slika 24: Primerjava prostorsko povprečenih Huffovih krivulj (porečje Savinje) in točkovnih Huffovih krivulj za padavinsko postajo Celje (trajanje padavin, krajše od 6 ur). Upoštevano je porečje Savinje do vodomerne postaje Celje.

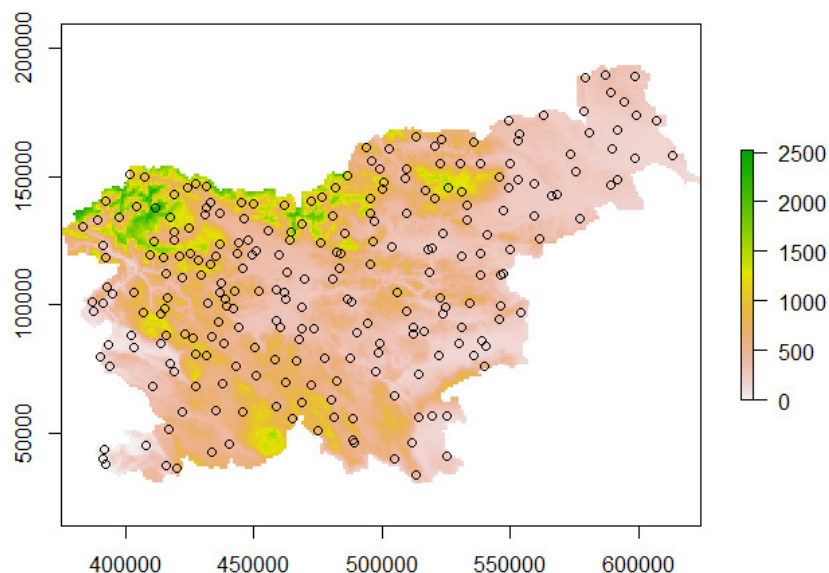
3.1.2.3 Sočasnost nastopa padavinskih dogodkov v Sloveniji

Dodatno smo preverili tudi, kakšen je prostorski obseg padavin, ki se večinoma pojavljajo v Sloveniji. Ta podatek je z vidika določitve projektnega padavinskega dogodka zelo pomemben, saj nam podaja informacijo o tem, ali je pri definiciji prostorske razporejenosti padavin smiselno upoštevati določeno zmanjšanje padavin za večja porečja (npr. uporaba t.i. *areal reduction curves* oziroma *factors*). Za namen analize padavinskih dogodkov smo uporabili metodo sočasnosti nastopa padavin, ki so jo predlagali Berghuijs et al. (2019) (enačba 5) in so jo uporabili tudi Bezak et al. (2021a) pri analizi sočasnosti nastopa erozivnih padavinskih dogodkov.

$$f(l) = \frac{1}{n(L)} \sum_{i=1}^{n(L)} f_i \quad (5)$$

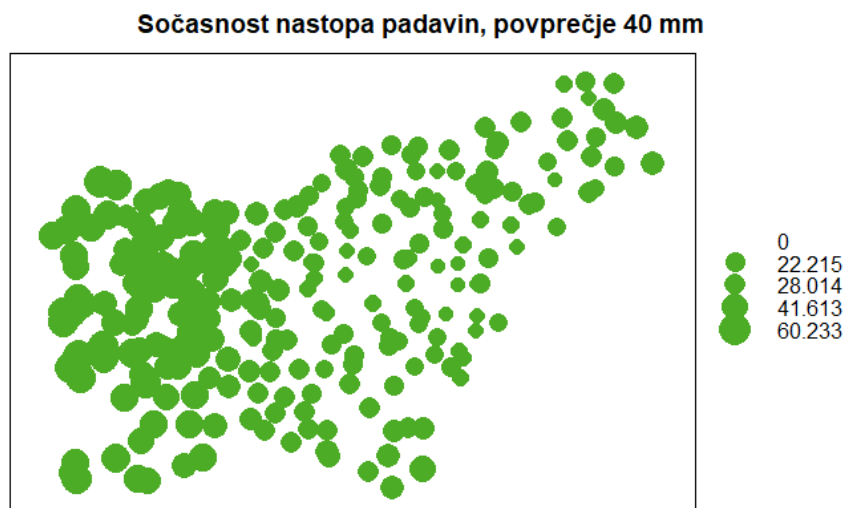
V enačbi 5 predstavlja n število postaj znotraj razdalje L (km) od posamezne postaje, f_i pa določa, ali je količina padavin na i -ti postaji presegla preiskovano količino padavin (vrednost 1) ali ne (vrednost 0) v izbranem časovnem oknu (± 1 dan). Obseg prostorske sočasnosti je definiran kot največji radij l v okolici posamezne postaje, za katerega velja da je $f(l)$ večji ali enak 0,5 (Berghuijs et al., 2019). Končni radij za posamezno postajo je nato izračunan kot povprečna vrednost za vse dogodke nad izbrano mejno vrednostjo (Berghuijs et al., 2019). Za oceno prostorske sočasnosti smo uporabili dnevne podatke o padavinah za obdobje 2000–2019 za postaje, za katere so bili na voljo vsaj 5-letni nizi podatkov (skupaj

246 postaj) (slika 25). Najprej smo izračunali točkovne vrednosti za posamezno postajo (na podlagi enačbe 5 z upoštevanjem zgoraj omenjenega postopka, kar pomeni, da smo za eno postajo dobili oceno sočasnosti nastopa padavin v km) in nato pripravili interpolirane karte na podlagi točkovnih vrednosti.

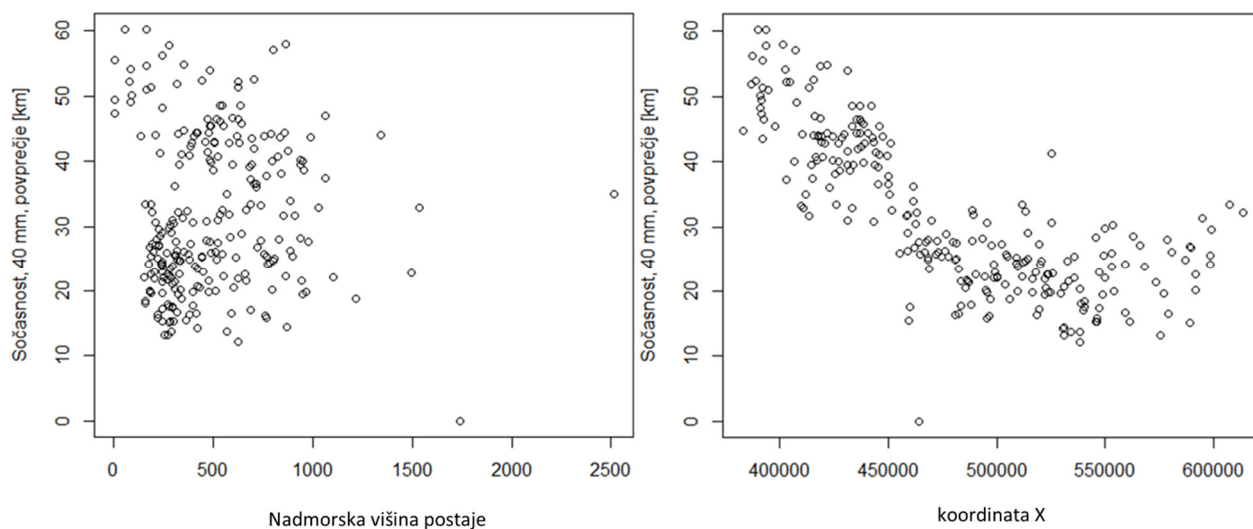


Slika 25: Izbrane padavinske postaje, kjer je na voljo vsaj 5 let dnevnih podatkov o padavinah v obdobju 2000-2019.

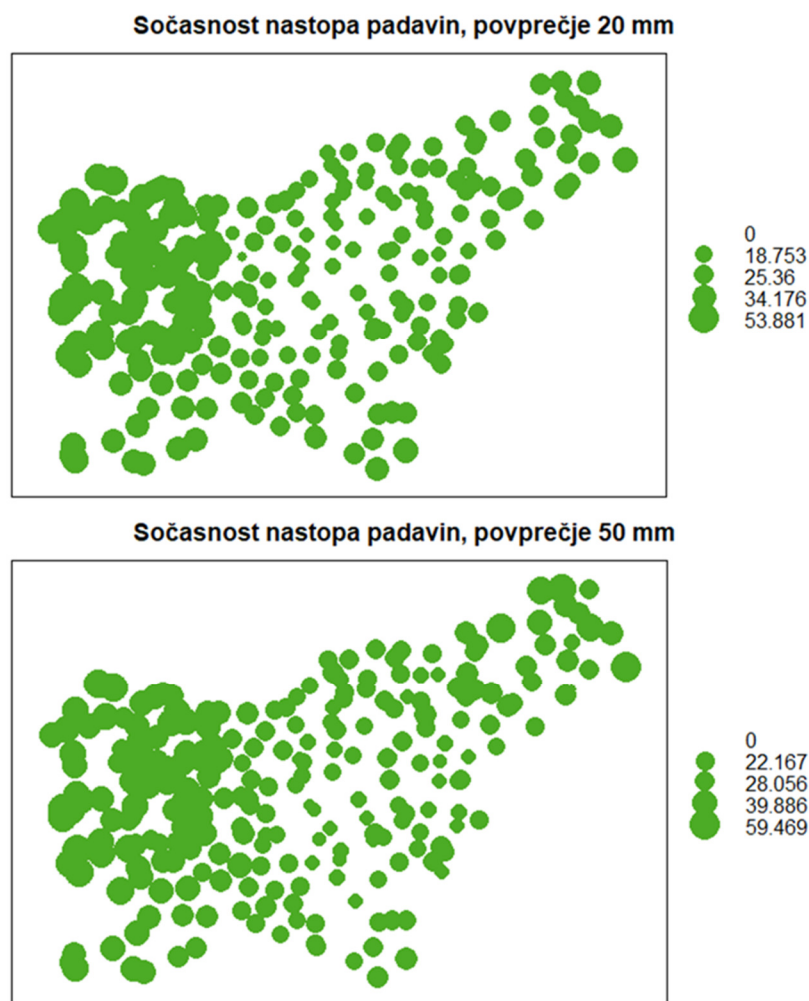
Kot primer podajamo rezultate analize sočasnosti pojava padavin z upoštevanjem padavinskih dni z več kot 40 mm padavin (slika 26). Vidimo lahko, da izračunane vrednosti kažejo na odvisnost od nadmorske višine postaje (manjše vrednosti so značilnejše za postaje na nižjih nadmorskih višinah) ter X koordinato postaje (večje vrednosti sočasnosti so značilnejše za zahodni del države) (slika 27). Izračune pa smo izvedli tudi z drugimi mejnimi vrednostmi padavin (npr. 10, 20, 30, 50, 60, 70 mm). Ugotovili smo, da se povprečna sočasnost nekoliko povečuje z višanjem količine padavin (slika 28). Za prostorsko interpolacijo se je kot ustrezna izkazala metoda navadnega kriginga (angl. *ordinary kriging*, OK) (slika 29).



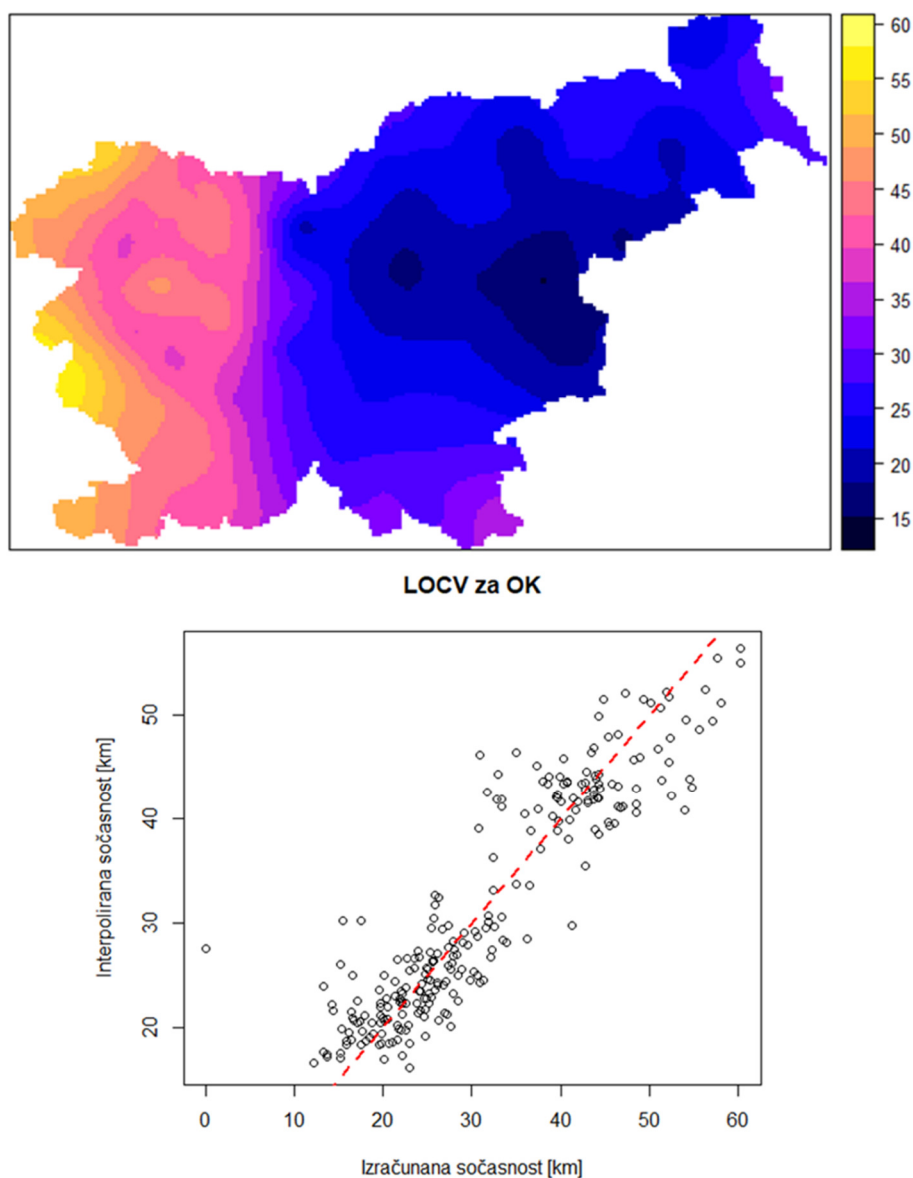
Slika 26: Sočasnost nastopa padavinskih dni z več kot 40 mm padavin. Podane vrednosti so v km in prikazana je povprečna vrednost prostorske sočasnosti nastopa za vse dni z več kot 40 mm padavin.



Slika 27: Odvisnost povprečne sočasnosti nastopa padavinskih dni z vsaj 40 mm padavin od nadmorske višine postaje (levo) in X koordinate postaje (desno).



Slika 28: Sočasnost nastopa padavinskih dni z več kot 20 mm (zgoraj) in 50 mm (spodaj) padavin. Podane vrednosti so v km in prikazana je povprečna vrednost prostorske sočasnosti nastopa glede na izbrano dnevno mejo (ali vsaj 20 ali vsaj 50 mm).

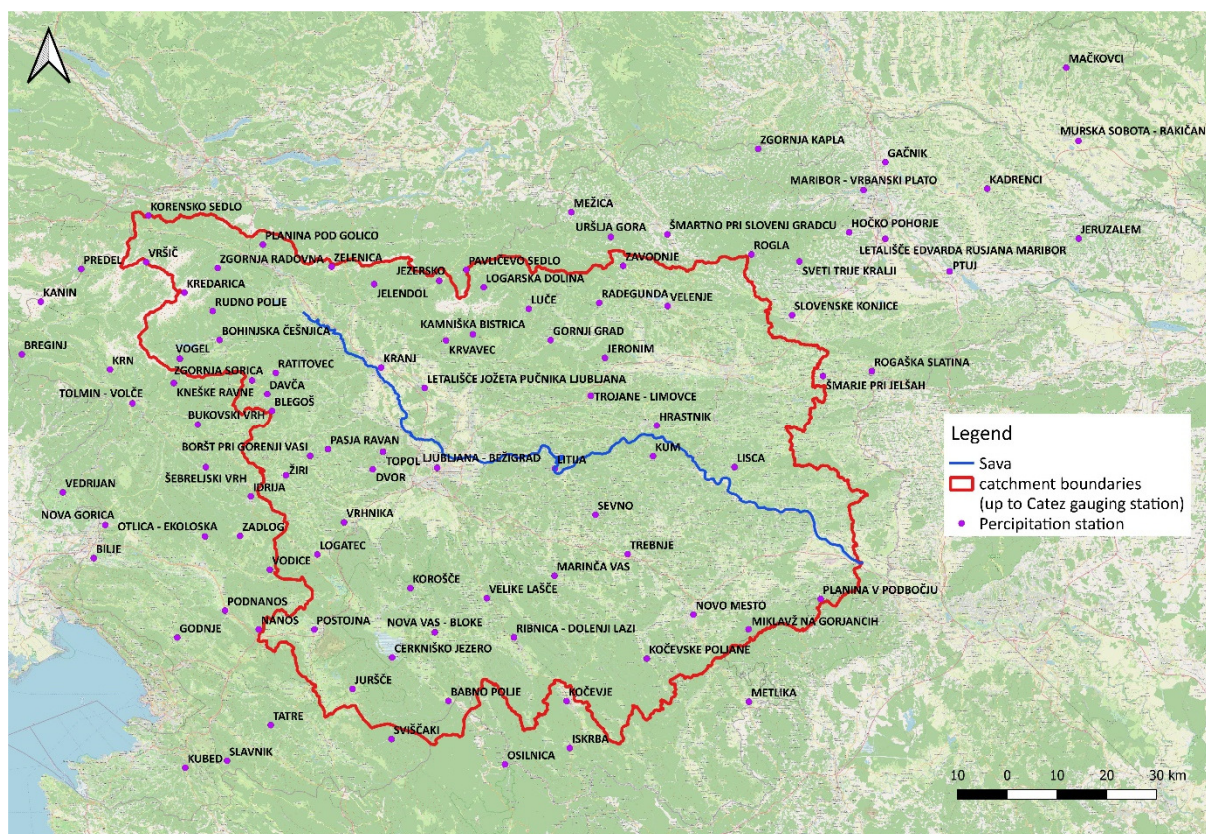


Slika 29: Interpolirana karta sočasnosti nastopa za primer dnevne količine padavin vsaj 40 mm (povprečna sočasnost) v km (zgoraj). Spodaj so rezultati LOCV za ta primer, uporabljena je bila OK metoda.

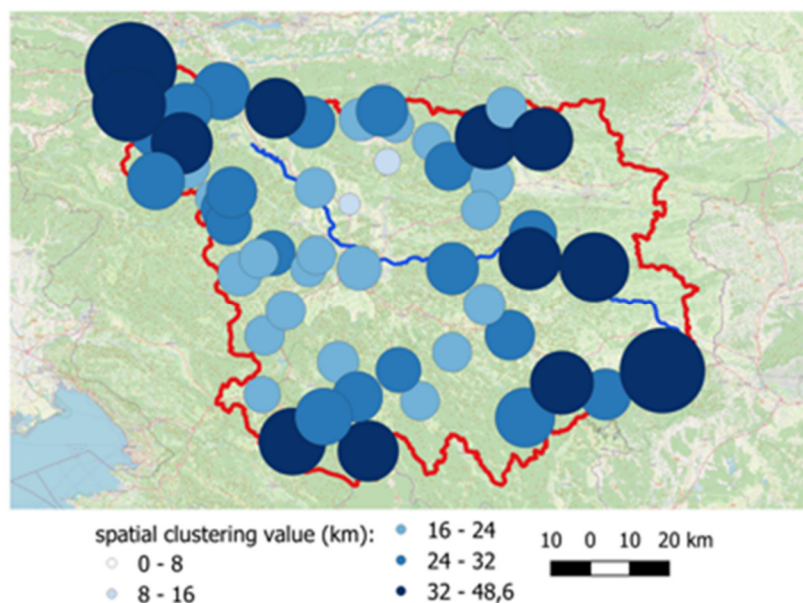
Predstavljeni rezultati kažejo, da je prostorska sočasnost nastopa padavin v Sloveniji skoraj za vse izdelane primere (razpon padavin med 10 in 70 mm) večja od 20 km, kar pomeni, da za porečja, manjša od 1.200 km² (površina kroga z radijem 20 km je cca. 1.250 km²), ni smiselno upoštevati prostorskega zmanjšanja ekstremnih padavin in lahko projektni padavinski dogodek upoštevamo kot prostorsko homogen. Za območja v zahodnem delu države pa je prostorska sočasnost nastopa padavin še večja. Če upoštevamo vrednost 40 km, lahko ugotovimo, da so padavine prostorsko homogene (v povprečju) za površine do cca. 5.000 km². Posledično lahko pri večini porečij v Sloveniji, z izjemo morda večjega dela porečja Save ali morda Krke, upoštevamo prostorsko homogene ekstremne padavine, ki jih uporabimo

za določitev projektnega padavinskega dogodka. Tako redukcija z uporabo krivulj prostorskega zmanjševanja padavin (angl. *areal reduction curves*) za porečja, manjša od 1.200 km², ni potrebna.

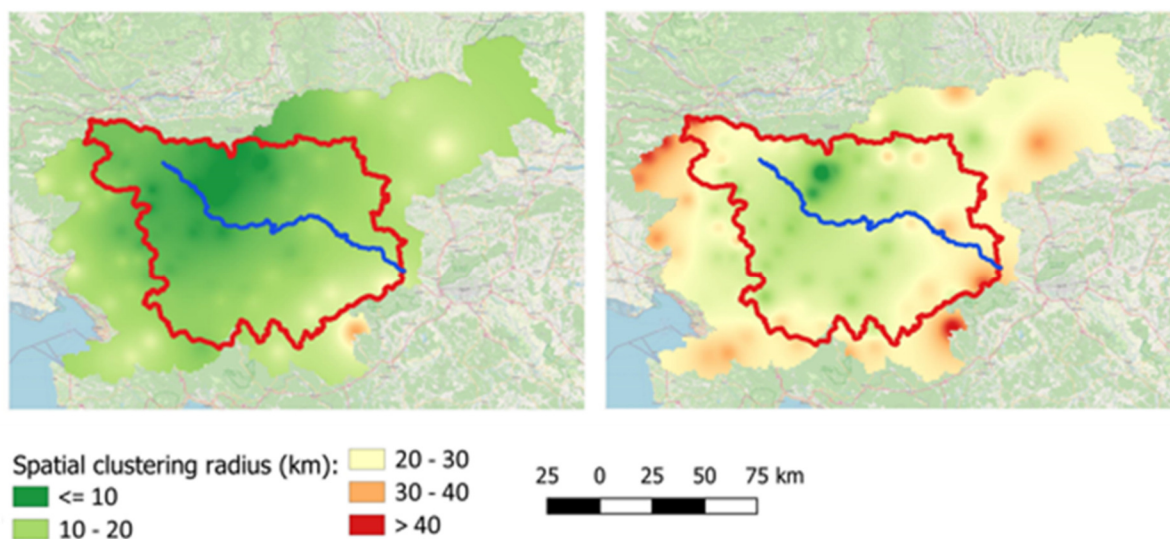
Rezultate na podlagi dnevnih podatkov o padavinah smo preverili tudi z upoštevanjem urnih podatkov. V tem primeru smo za izračun uporabili urne podatke o padavinah z 92 postaj na območju Slovenije (slika 30). Uporabljeni so bili podatki od leta 2016 do leta 2020 (Serwinska, 2022). Delež manjkajočih podatkov za te postaje je bil relativno majhen. Ker gre za urne podatke, so bile uporabljene mejne vrednosti padavin seveda drugačne kot v primeru dnevnih analiz. Na podlagi preliminarnih analiz se je kot najbolj primerna mejna urna vrednost padavin izkazala 12 mm, dodatno pa so bili preverjeni tudi rezultati z uporabo urnih vrednosti padavin 6 mm in 18 mm (Serwinska, 2022). Postopek izvedbe analize je bil enak kot v primeru dnevnih vrednosti. Rezultati izvedenih analiz so prikazani na sliki 31 in sliki 32.



Slika 30: Prikaz postaj z razpoložljivimi urnimi podatki o padavinah v obdobju 2016–2020, uporabljenih za analizo prostorske sočasnosti nastopa padavin. Povzeto po Serwinska (2022).



Slika 31: Analize sočasnosti nastopa padavin z uporabo mejne urne vrednosti padavin 12 mm za postaje na porečju reke Save. Povzeto po Serwinska (2022).



Slika 32: Prikaz rezultatov analiz sočasnosti nastopa padavin z urnimi vrednostmi > 6 mm (levo) in > 12 mm (desno). Povzeto po Serwinska (2022).

Tudi v tem primeru lahko naredimo podobne zaključke kot v primeru upoštevanja dnevnih vrednosti. V primeru uporabe mejne urne vrednosti 12 mm je prostorski razpon takšnih dogodkov v večini primerov večji od 20 km, v nekaterih delih države sicer nekoliko manjši, kar je predvsem rezultat manjše gostote postaj na km² (v primeru dnevnih podatkov je bilo uporabljenih skoraj trikrat več padavinskih postaj). V primeru analiz z urno vrednostjo padavin 18 mm je bilo število »dogodkov« premajhno za dovolj zanesljive analize. V primeru meje 6 mm pa je število dogodkov precej večje, kar ob manjši gostoti

postaj (v primerjavi z dnevnimi vrednostmi) izkaže nekoliko nižje vrednosti sočasnosti nastopa takšnih padavinskih dogodkov. Glede na predstavljene rezultate lahko sklepamo, da so rezultati, pridobljeni na podlagi dnevnih podatkov, predvsem zaradi večjega števila uporabljenih padavinskih postaj in posledično manjših razdalj med postajami, bolj zanesljivi. Rezultati z uporabo urnih vrednosti pa v večji meri potrjujejo zaključek, da v Sloveniji sočasnost nastopa padavin večinoma presega 20 km, kar pomeni, da lahko za porečja, manjša od 1.200 km², pri določanju projektnih pretokov upoštevamo prostorsko homogene padavine. Odprto ostaja vprašanje, kako bodo podnebne spremembe vplivale na sočasnost padavinskih dogodkov v prihodnjih letih.

3.1.2.4 Parametri hidrološkega modela in izpeljava nove enačbe za izračun časa zakasnitve za porečja v Sloveniji

V primeru uporabe hidrološkega modela za določanje projektnih pretokov na rezultate poleg projektnega padavinskega dogodka vplivajo tudi izbrani parametri hidrološkega modela. Če imamo na voljo vsaj nekaj merjenih podatkov o padavinah in pretokih, je nujno umerjanje ter preverjanje hidrološkega modela (npr. Sezen et al., 2019). Če merjeni podatki niso na voljo, pa Blöschl et al. (2013) omenjajo naslednje metode določanja parametrov modela:

- A-priori določitev parametrov modela glede na lastnosti porečja. V primeru hidrološkega modela HEC-HMS določitev časa zakasnitve oziroma časa koncentracije ter oceno parametra Curve Number (CN) z uporabo empiričnih enačb (npr. Bezak et al., 2017; Dirnbek and Šraj, 2010).
- Prenos parametrov modela s hidrološko zelo podobnih sosednjih porečij ali transformacija merjenih podatkov o pretokih s sosednjih porečij (npr. primer analize vpliva podnebnih sprememb na vlažnostne razmere na zaledju Koroške Bele; (Bezak et al., 2021b)).
- Ocena parametrov modela z upoštevanjem principov hidrološke regionalizacije (npr. hidrološki model umerimo za večje število sosednjih hidrološko podobnih porečij ter nato parametre modela obravnavanega porečja ocenimo glede na ta nabor umerjenih parametrov z upoštevanjem lastnosti teh porečij, kot sta npr. naklon in raba tal). Analize na večjem številu porečij v Sloveniji je izvedel Alexopoulos (2021).
- Ocena parametrov glede na dinamične *proxy* podatke (npr. uporaba podatkov o vlažnosti tal iz reanalize podatkov ali na podlagi satelitskih posnetkov).

V primeru hidrološkega modela HEC-HMS, ki se v slovenski vodarski praksi pogosto uporablja za določitev projektnih hidrogramov, nastopata dve vrsti parametrov, in sicer:

- Parametri, ki so vezani na metode za določanje stopnje padavinskih izgub (tj. del padavin, ki ne prispeva k površinskemu odtoku);

- Parametri, ki so vezani na metode za transformacijo učinkovitih padavin (po upoštevanju padavinskih izgub) v hidrogram površinskega odtoka oz. parametri sintetičnega hidrograma enote.

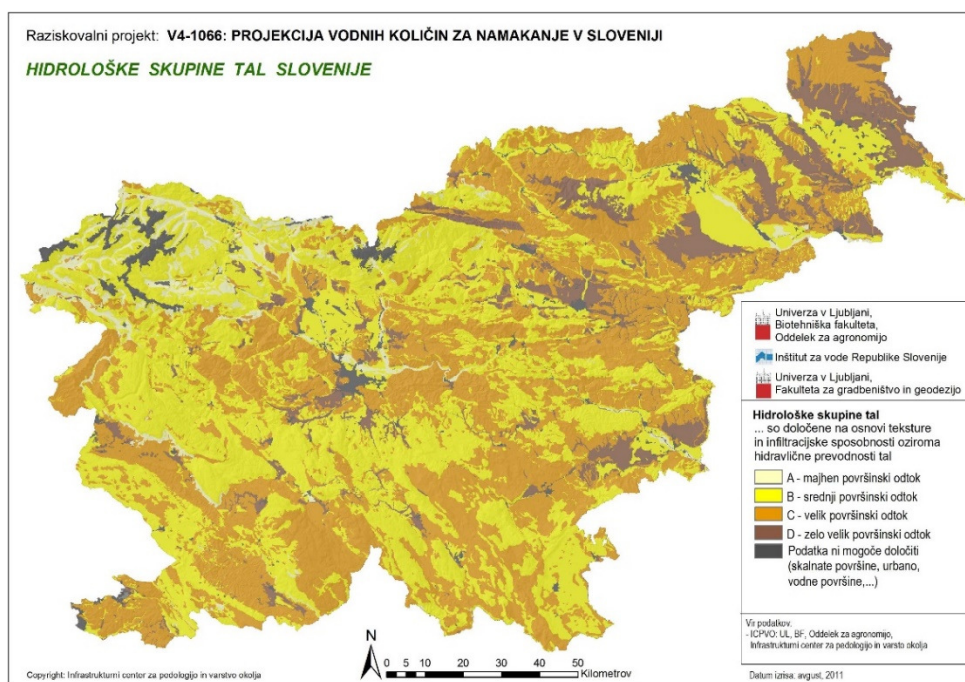
Za ustrezno izbiro metode padavinskih izgub so pretekle študije pokazale, da lahko nekoliko preprostejše metode, kot sta Soil Conservation Service (SCS) metoda ter metoda začetnih in enakomernih izgub, dajo primerljive ali v nekaterih primerih celo boljše rezultate kot nekoliko bolj kompleksne metode infiltracije, kot so npr. metoda Greena in Ampt, Hortonova infiltracijska metoda in metoda Smith Parlange (Bezák et al., 2022; Dirnbek and Šraj, 2010; Šraj et al., 2010). Posledično za praktično uporabo predlagamo SCS metodo padavinskih izgub, kjer se parameter Curve Number (CN) določi glede na podatek o rabi tal, hidrološki skupini tal (A, B, C, D) ter hidroloških pogojih (slika 33 in preglednica 6). Hidrološka skupina tal (preglednica 7) se določi glede na odtočni potencial tal, ki je odvisen od teksture in infiltracijske sposobnosti tal.

Preglednica 6: Primer odvisnosti parametra CN od določene vrste rabe tal, hidrološke skupine tal in hidroloških pogojev. Povzeto po Brilly in Šraj (2019).

Raba tal	Hidrol. pogoji	Vrednosti CN glede na odtočni potencial			
		A	B	C	D
<i>Ledina, neobdelan svet</i>					
gola zemljina	-	77	86	91	94
delno poraščena zemljina (ostanki posevkov)	slabi	76	85	90	93
	dobri	74	83	88	90
<i>Poljščine v vrsti</i>			.		
v ravni vrsti	slabi	72	81	88	91
	dobri	67	78	85	89
v ravni vrsti, delna poraščenost	slabi	71	80	87	90
	dobri	64	75	82	85
po plastnicah	slabi	70	79	84	88
	dobri	65	75	82	86
po plastnicah, delna poraščenost	slabi	69	78	83	87
	dobri	64	74	81	85
po plastnicah in na terasah	slabi	66	74	80	82
	dobri	62	71	78	81
po plastnicah in na terasah, delna poraščenost	slabi	65	73	79	81
	dobri	61	70	77	80

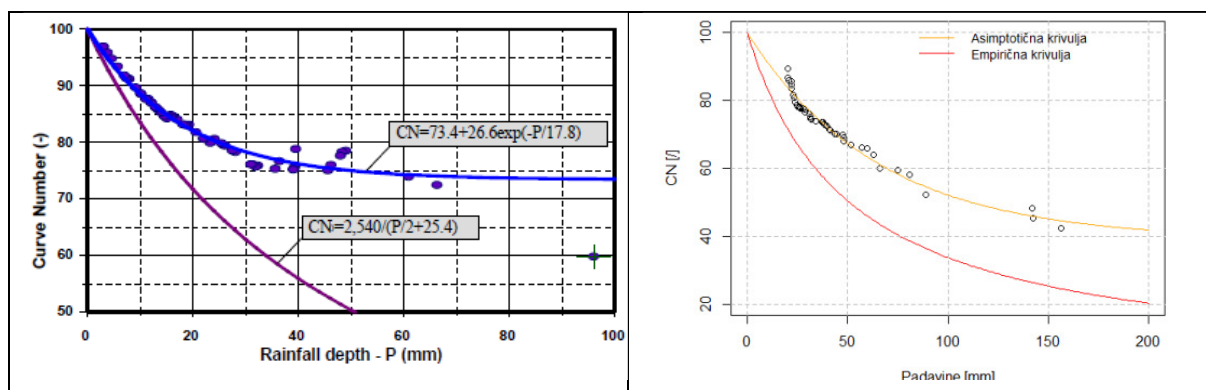
Preglednica 7: SCS klasifikacija zemljin in infiltracijske izgube v odvisnosti od vrste zemljine (Brilly and Šraj, 2019).

Skupina zemljine	Opis	Stopnja izgub [mm/h]
A	Nizek odtočni potencial. Zemljina ima tudi, če je nasičena, visoko stopnjo infiltracije. Globoke, dobro drenirane zemljine z zmerno teksturo (pesek, globoka rečna naplavina)	7,5–11,5
B	Povprečni do nizek odtočni potencial. Zemljina ima, če je nasičena, povprečno stopnjo infiltracije vode. Pltve rečne naplavine, peščena ilovica z zmerno prepustnostjo.	3,85–7,5
C	Visok do zmeren odtočni potencial. Zemljina ima, če je nasičena, nizko stopnjo infiltracije vode. Glinena ilovica, plitva peščena ilovica, zemljine z nizko vsebnostjo organskih snovi in zemljine z običajno visoko vsebnostjo gline.	1,3–3,85
D	Visok odtočni potencial. Zemljina ima, če je nasičena, zelo nizko stopnjo infiltracije vode. Zemljine z visoko gladino talne vode, z glinastim slojem ali neprepustnim slojem na površini ali tik pod površino, zaslanjena zemljišča ipd. Zemljine imajo zelo nizko stopnjo prepustnosti.	0–1,3



Slika 33: Karta hidroloških skupin tal, ki je bila pripravljena v okviru raziskovalnega projekta V4-1066 (UL BF, 2011)

Pretekle študije (npr. Banasik and Woodward, 2010; Heco, 2015) so obravnavale odvisnost parametra CN od količine padavine in letnega časa padavinskega dogodka. Ugotovljeno je bilo, da se parameter CN spreminja v odvisnosti od količine padavin (slika 34). Podobno spreminjanje je bilo zaznано tudi za manjše hudourniško območje v Sloveniji (Heco, 2015), vendar pa so povezave med spremenljivkama v obliki eksponentnih funkcij odvisne od lastnosti posameznega porečja in jih je težko generalizirati za različna porečja. Kljub temu je bilo ugotovljeno, da so dejanske vrednosti parametra CN za padavinske dogodke z več kot 20 mm zelo podobne tem, ki jih lahko določimo glede na podatek o rabi tal in pedološki sestavi. To pomeni, da se v primeru ekstremnih dogodkov (projektne padavine z več kot 2-letno povratno dobo) parameter CN lahko določi glede na podatke o lastnostih porečja, če merjeni podatki o pretokih niso na razpolago. Če so merjeni podatki o pretokih razpoložljivi, je hidrološki model HEC-HMS in parameter CN (tudi druge parametre) smiselno umeriti z upoštevanjem primernih preteklih ekstremnih dogodkov.

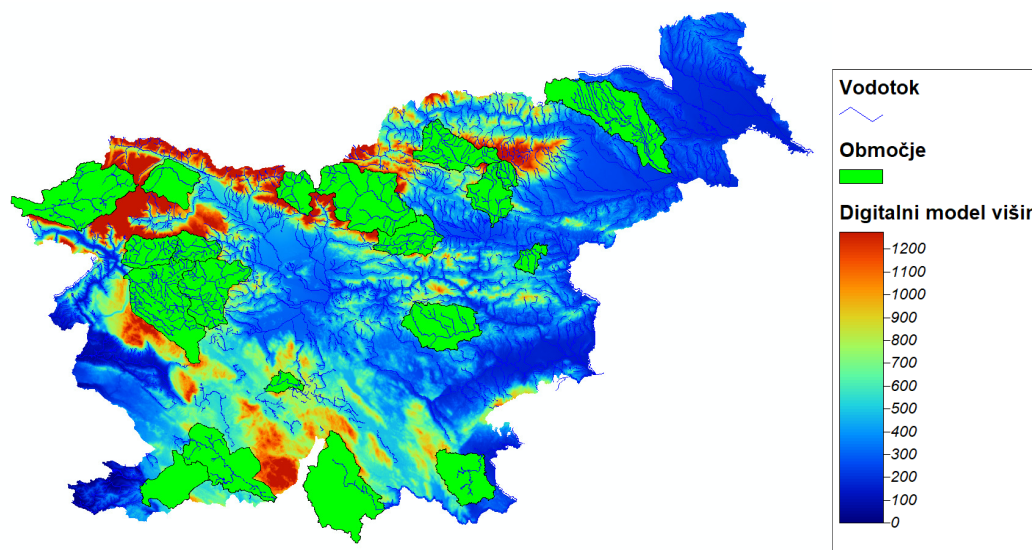


Slika 34: Spreminjanje parametra CN od količine padavin za primer porečja na Poljskem z večinoma kmetijsko rabo (modra krivulja na levi sliki) in za primer porečja Mačkovega grabna (oranžna krivulja na desni sliki). Leva slika je povzeta po Banasik and Woodward (2010), desna pa po Heco (2015)

Drugi sklop parametrov je povezan s transformacijo efektivnih padavin v površinski odtok oz. s sintetičnim hidrogramom enote. Sintetične hidrograme enote oblikujemo na podlagi lastnosti porečij in različnih teoretičnih in empiričnih izhodišč (Brilly and Šraj, 2019). Najpogostejše uporabljene metode določanja sintetičnega hidrograma enote so metode Snyder, SCS in Clark, pri katerih je potrebno določiti enega ali dva parametra, od katerih je prvi vedno čas zakasnitve (T_p) ali čas koncentracije porečja (T_c). Večina empiričnih enačb za izračun časa zakasnitve ali časa koncentracije, ki so na voljo v literaturi, je bilo razvitih za porečja na območju ZDA. Ker pa je čas zakasnitve porečja v največji meri odvisen od lastnosti porečja, smo v sklopu projekta izpeljali nove enačbe (6-8), ki se jih lahko uporabi za izračun časa zakasnitve za slovenska porečja (Mavri, 2022).

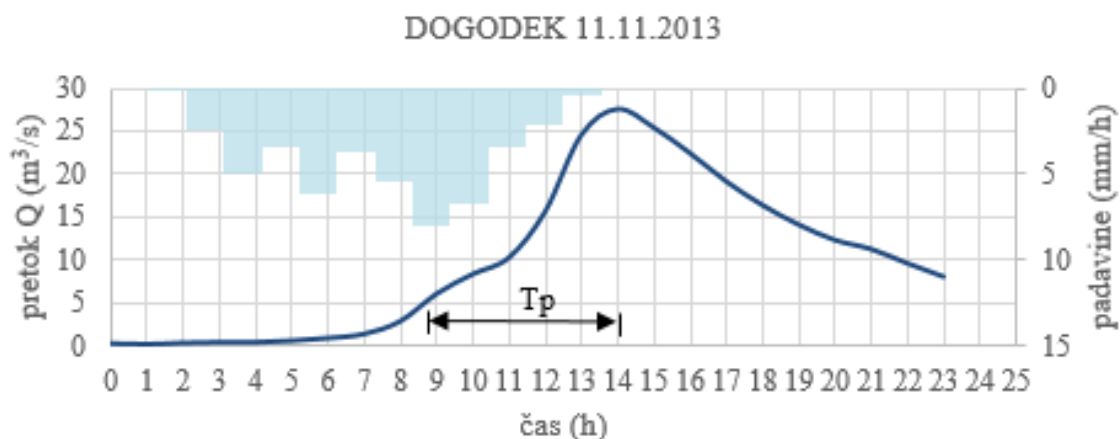
Pri vnosu parametra T_p v model HEC-HMS se izbere Synderjevo metodo transformacije efektivnih padavin v odtok (angl. *Transform metod*). Za namen izpeljave enačbe smo zbrali 20 vodomernih postaj na območju Slovenije (slika 35), ki jih je obravnaval tudi Alexopoulos (2021):

- porečje Mislinje do postaje Otiški vrh (površina območja 231 km², povprečna nadmorska višina 950 m.n.m.v.);
- porečje Dravinje do postaje Zreče (površina območja 41 km², povprečna nadmorska višina 973 m.n.m.v.);
- porečje Radovne do postaje Podhom (površina območja 167 km², povprečna nadmorska višina 1556 m.n.m.v.);
- porečje Kokre do postaje Kokra (površina območja 112 km², povprečna nadmorska višina 1561 m.n.m.v.);
- porečje Poljanske Sore do postaje Zminec (površina območja 306 km², povprečna nadmorska višina 946 m.n.m.v.);
- porečje Selške Sore do postaje Železniki (površina območja 104 km², povprečna nadmorska višina 1065 m.n.m.v.);
- porečje Mirne do postaje Jelovec (površina območja 270 km², povprečna nadmorska višina 530 m.n.m.v.);
- porečje Kolpe do postaje Petrina (površina območja 460 km², povprečna nadmorska višina 863 m.n.m.v.);
- porečje Lahinje do postaje Gradac (površina območja 221 km², povprečna nadmorska višina 594 m.n.m.v.);
- porečje Savinje do postaje Nazarje (površina območja 457 km², povprečna nadmorska višina 1344 m.n.m.v.);
- porečje Bolske do postaje Dolenja vas (površina območja 175 km², povprečna nadmorska višina 876 m.n.m.v.);
- porečje Voglajne do postaje Črnomlja (površina območja 54 km², povprečna nadmorska višina 470 m.n.m.v.);
- porečje Hudinje do postaje Škofja vas (površina območja 157 km², povprečna nadmorska višina 876 m.n.m.v.);
- porečje Idrijce do postaje Hotešk (površina območja 443 km², povprečna nadmorska višina 832 m.n.m.v.);
- porečje Reke do postaje Cerkevnikov mlin (površina območja 378 km², povprečna nadmorska višina 801 m.n.m.v.);
- porečje Rižane do postaje Kubed (površina območja 205 km², povprečna nadmorska višina 555 m.n.m.v.);
- porečje Pesnice do postaje Zamušani (površina območja 480 km², povprečna nadmorska višina 287 m.n.m.v.);
- porečje Cerkljanske do postaje Cerknica (površina območja 49 km², povprečna nadmorska višina 712 m.n.m.v.);
- porečje Soče do postaje Kobarid (površina območja 437 km², povprečna nadmorska višina 1209 m.n.m.v.);
- porečje Bače do postaje Bača pri Modreju (površina območja 143 km², povprečna nadmorska višina 819 m.n.m.v.).



Slika 35: Prostorski prikaz izbranih porečij na karti Slovenije. Porečja so prikazana kot poligoni, vodotoki pa kot modre linije. Povzeto po Mavri (2022).

Vidimo lahko, da gre za porečja v velikosti med 40 in 500 km², kar pomeni, da so izpeljane enačbe primerne za območja takšne velikosti. Za omenjene vodomerne postaje smo za obdobja, za katera so bili na voljo urni podatki o pretokih (različna obdobja za različne postaje), izbrali 5 največjih dogodkov glede na podatek o konici pretoka. Za vsakega izmed teh dogodkov smo glede na urne podatke o padavinah in pretokih določili čas zakasnitve T_p kot je to prikazano na sliki 36.



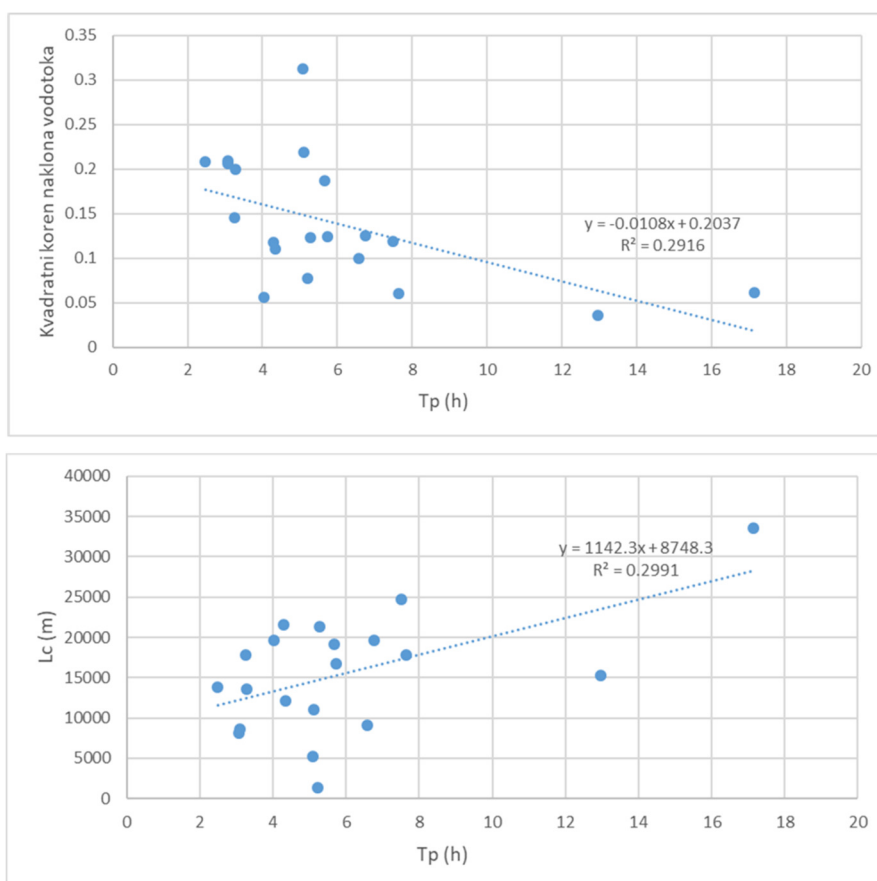
Slika 36: Primer izbranega dogodka za postajo Cerknica na Cerkniščici (povzeto po Mavri, 2022). Podatki so bili pridobljeni iz vodomerne postaje Cerknica I in padavinske postaje Iška vas.

Podatki o padavinah so bili pridobljeni z geografsko najbližjih padavinskih postaj glede na razpoložljivost merjenih podatkov (Mavri, 2022). Seznam uporabljenih padavinskih postaj je dostopen v Mavri (2022). Dodatno smo za vsako porečje izračunali tudi njihove lastnosti, kot so:

- Minimalna, maksimalna in povprečna nadmorska višina,

- Minimalni, maksimalni in povprečni naklon porečja,
- Povprečni odtočni potencial porečja,
- Sestavo rabe tal glede na karto CLC Corine,
- Povprečni CN parameter porečja,
- Dolžino in naklon (glede na podatke o nadmorski višini na začetku in koncu odseka) vodotoka glede na sloj Kategorizacija vodotokov (ARSO, 2022) in dolžino na vodotoku od točke, ki je najbližje težišču, do iztoka s porečja (dolžina L_c).

Za vsako porečje smo nato na podlagi petih izbranih (največjih) dogodkov v obdobju urnih meritev izračunali povprečne vrednosti časa zakasnitve (T_p). Nato smo analizirali odvisnosti (linearna korelacija) med tako dobljenimi časi zakasnitve (T_p) in posameznimi lastnostmi porečja (slika 37), rezultate teh analiz pa smo nato uporabili v postopku izpeljave enačb.



Slika 37: Primer odvisnosti lastnosti porečij in časa zakasnitve za 20 analiziranih porečij. Zgornji primer prikazuje odvisnost med korenom naklona vodotoka in povprečnih časom zakasnitve T_p , spodnji primer pa odvisnost med razdaljo L_c in časom T_p .

V postopku izpeljave enačbe smo kot vhodne spremenljivke uporabili naslednje značilnosti porečja: dolžina vodotoka, dolžina L_c , kvadratni koren padca vodotoka, kmetijske površine, urbane površine,

povprečni CN območja (Mavri, 2022). Postopek izpeljave enačbe je potekal v programskem jeziku R (R Core Team, 2018), za oceno koeficientov enačbe smo uporabili funkcijo *nls* (angl. *nonlinear least squares*). Testiranih je bilo več kot 70 različnih oblik enačb, kjer so nastopali 2–3 koeficienti. Na podlagi izračunanega Pearsonovega koeficienta korelacije (med T_p vrednostmi) in grafičnega prikaza so bile nato za nadaljnjo uporabo predlagane tri enačbe (Mavri, 2022), ki so dale najboljše rezultate.

Kot najustreznejša enačba (glede na Pearsonov koeficient korelacije in ujemanje med izračunanimi in dejanskimi časi T_p) se je izkazala naslednja oblika enačbe:

$$T_p = 0,11 \cdot \left(\frac{x_3 \cdot x_1}{x_2^{2,45}} \right)^{0,21}, \quad (6)$$

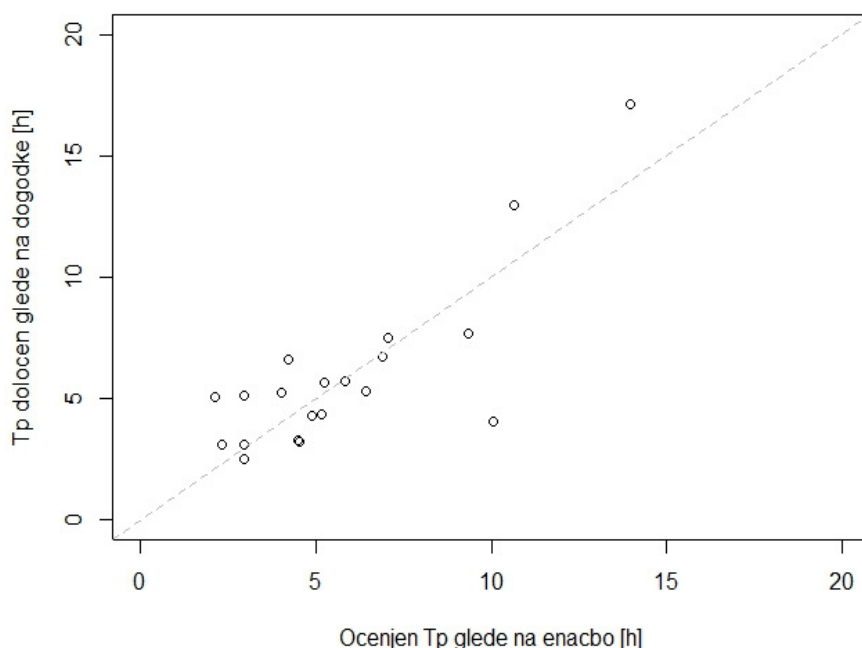
kjer je T_p čas zakasnitve [h], x_1 dolžina vodotoka od iztočnega profila do profila na vodotoku, ki je najbližji težišču vodotoka L_c [m]; x_2 kvadratni koren padca vodotoka $\sqrt{I}$ [m/m]; x_3 velikost kmetijskih površine [km²] (zajete so vse vrste kmetijskih rab).

Kot dve alternativni obliki enačbe, ki sta prav tako dali relativno ustrezno ujemanje s časi zakasnitve, določenimi glede na merjene podatke o padavinah in pretokih, pa smo določili naslednji dve enačbi:

$$T_p = 0,55 \cdot x_3 \cdot \frac{x_1^{-0,49}}{x_2} \quad (7)$$

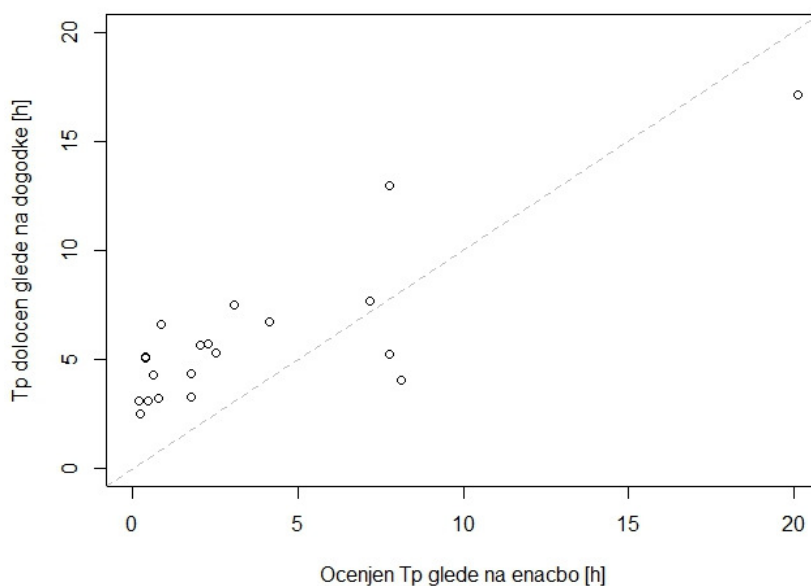
$$T_p = 0,19 \cdot \left(\frac{x_3 \cdot x_4}{x_2^{1,61}} \right)^{0,29} \quad (8)$$

Opis parametrov x_1 , x_2 in x_3 je enak kot pri enačbi 6, x_4 pa predstavlja parameter CN. Primerjava izračunanih časov zakasnitve z uporabo enačbe 6 in časov zakasnitve, določenih na podlagi merjenih podatkov o pretokih in padavinah, je prikazana na sliki 38.



Slika 38: Primer izračunov časa T_p po enačbi 6 za 20 obravnavanih porečij in primerjava s T_p , ki so bili določeni glede na merjene podatke o pretokih in padavinah (povprečje petih izbranih visokovodnih dogodkov). Vrednost Pearsonovega koeficienta korelacije znaša 0,811. Povzeto po Mavri (2022).

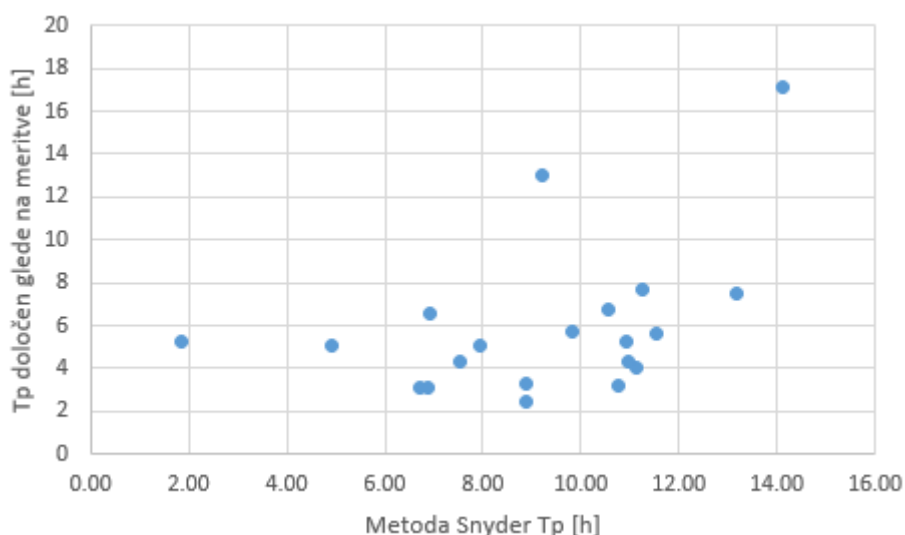
Podobna primerjava je bila narejena še za primer uporabe enačbe 7 (slika 39).



Slika 39: Primer izračunov časa T_p po enačbi 7 za 20 obravnavanih porečij in primerjava s T_p , ki so bili določeni glede na merjene podatke o pretokih in padavinah (povprečje petih izbranih visokovodnih dogodkov). Vrednost Pearsonovega koeficienta korelacije znaša 0,829. Povzeto po Mavri (2022).

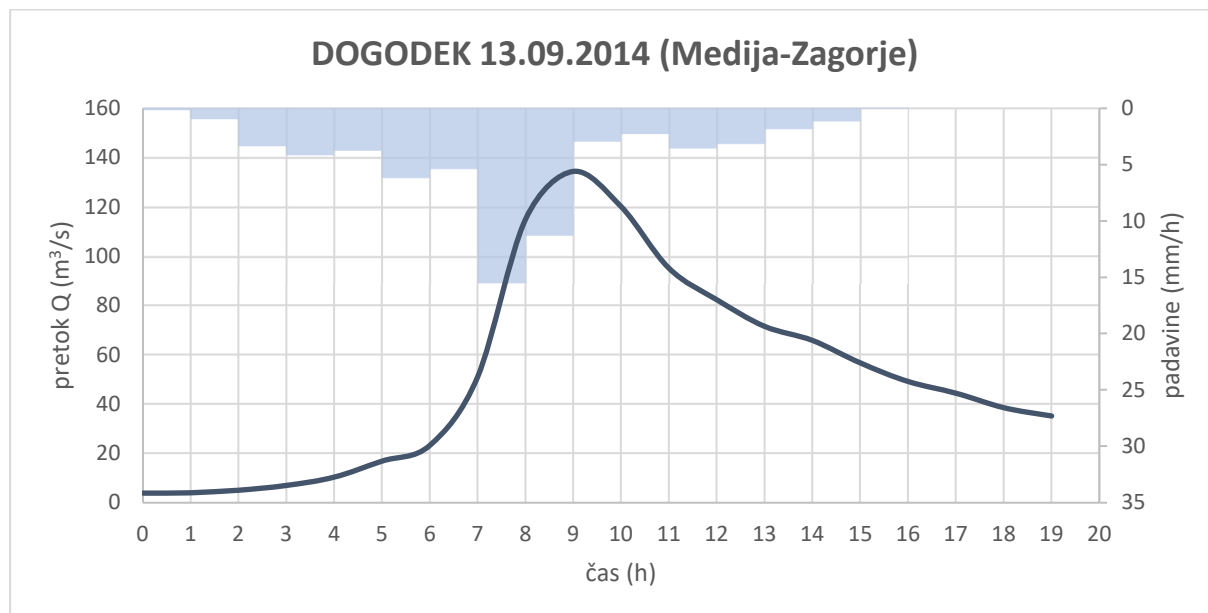
Dodatno so bili izračuni T_p narejeni tudi z uporabo enačb, ki so se do zdaj najpogosteje uporabljale v praksi (npr. splošna metoda Snyder, Tulsa District, Denver, Putmanova, SCS itd.) in so bile razvite na območju ZDA. V vseh primerih je bil Pearsonov koeficient korelacije med izračunanimi vrednostmi in

iz merjenih podatkov določenimi T_p nižji kot v primeru nove izpeljane enačbe 6 (izpeljana enačba: 0,81; Snyder: 0,42; Tulsa district: 0,60; Denver: 0,69; Riverside county: 0,06; Eaglesonova metoda: 0,67; Putmanova metoda: -0,11; Taylor-Swartzeva metoda: 0,76; SCS metoda: 0,46). Kot je razvidno iz rezultatov, je ujemanje z uporabo ostalih empiričnih enačb slabše kot npr. z novo izpeljano enačbo 6 ali 7 (slika 40).



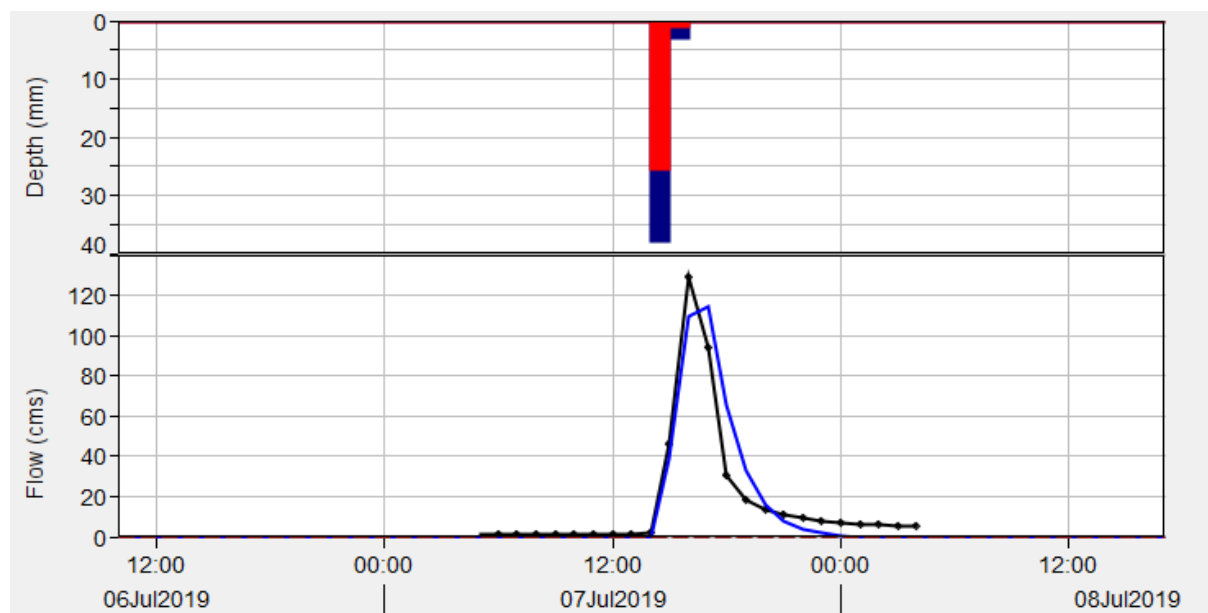
Slika 40: Primerjava T_p določenih na podlagi meritev in izračunanih glede na splošno enačbo Snyder.

Ustreznost izpeljanih enačb smo nato preverili na porečju Medije (vodomerna postaja Zagorje) z zaledno površino 97 km². Tudi za to območje smo na podlagi urnih podatkov o padavinah (postaja Hrastnik) in pretokih izbrali nekaj večjih dogodkov (slika 41), s pomočjo katerih smo preverili ustreznost predlaganih novih enačb. V tem primeru se je kot najustreznejša izkazala enačba 7, po kateri je ocenjen čas zakasnitve za to porečje znašal približno 1,8 h).

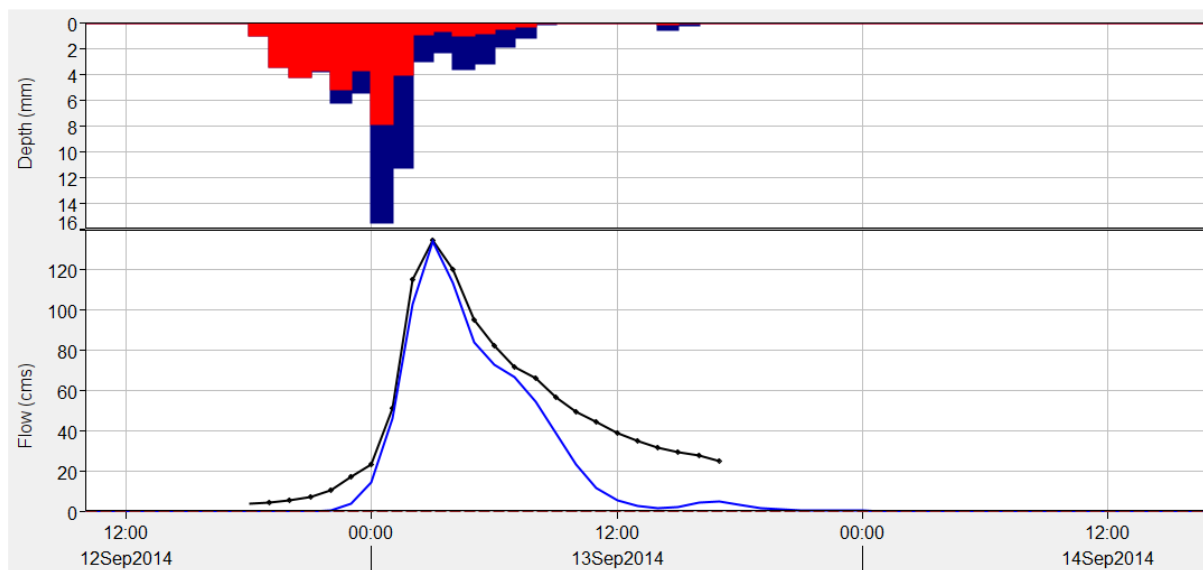


Slika 41: Primer enega izmed izbranih dogodkov padavine-odtok za porečje Medije (vodomerna postaja Zagorje), ki smo jih uporabili za validacijo ustreznosti izpeljanih enačb.

Glede na rabo tal in vrednost odtočnega potenciala smo ocenili tudi parameter CN (ocenjena vrednost 82), ki je bil uporabljen za izračun padavinskih izgub po metodi Soil Conservation Service (SCS) (glej Brilly in Šraj, 2018). Za vsakega izmed dogodkov smo z uporabo hidrološkega modela HEC-HMS preverili ustreznost izbranih enačb, ki omogočajo določitev časa zakasnitve.



Slika 42: Primer ujemanja simuliranih (modra črta) in merjenih pretokov (črna črta) za dogodek, ki se je zgodil na vodomerni postaji Zagorje (Medija) julija 2019. Modri stolpci so padle padavine, rdeči stolpci so padavinske izgube. Za oceno časa zakasnitve je bila uporabljena enačba 7.



Slika 43: Primer ujemanja simuliranih (modra črta) in merjenih pretokov (črna črta) za dogodek, ki se je zgodil na vodomerni postaji Zagorje (Medija) septembra 2014. Modri stolpci so padle padavine, rdeči stolpci so padavinske izgube. Za oceno časa zakasnitve je bila uporabljena enačba 7.

Primerjava merjenih in modeliranih pretokov se je pri večini izbranih dogodkov izkazala za relativno ustrezno (slika 42 in slika 43). Vidimo lahko, da v tem primeru uporaba nove izpeljane enačbe 7 da boljše rezultate modeliranja oz. ujemanje z merjenimi pretoki. Do podobnih ugotovitev je Mavri (2022) prišla tudi z upoštevanjem drugih obravnavanih dogodkov. Dodatne primerjave so prikazane tudi v Mavri et al. (2023). Izpeljane enačbe se lahko uporabijo za oceno časa zakasnitve v primeru nemerjenih porečij v Sloveniji. Vsekakor pa velja na tem mestu še enkrat poudariti, da je v primeru, če so na voljo vsaj občasne meritve pretokov, potrebno hidrološki model pred uporabo umeriti in validirati glede na merjene podatke o padavinah in pretokih. To pomeni, da je potrebno umeriti vse parametre (npr. parameter CN in čas zakasnitve T_p) (npr. Jurček, 2016; Mešl, 2018; Stanjko, 2015). Ustreznost novih enačb bo potrebno v prihodnosti preveriti še na drugih porečjih na območju Slovenije. Predvsem je smiselna kontrola za porečja manjša od 20-40 km², ki niso bila vključena v razvoj zgoraj opisanih enačb.

3.2 Kompleksnejša metoda

Če bodo podatki o projektnih hidrogramih uporabljeni za načrtovanje pomembnejših vodnogospodarskih oz. hidrotehničnih objektov (kot so npr. hidroelektrarne, vodni zadrževalniki) oz. za načrtovanje protipoplavnih ukrepov (npr. na območjih pomembnega vpliva poplav), predlagamo uporabo hidroloških modelov, ki omogočajo izračun zveznih vrednosti pretokov in ne samo za posamezni padavinski dogodek (npr. Sezen et al., 2019). Dodatno je takšen postopek primeren tudi za določene druge hidrološke količine, kot je na primer podatek o srednjem letnem pretoku, ki ga z uporabo

metodologije iz poglavja 3.1 ne moremo določiti. Parametre takšnih modelov lahko določimo glede na enega izmed štirih zgoraj omenjenih načinov (3.1.2.4), ki jih predlagajo Blöschl et al. (2013).

Za določanje projektnih padavinskih dogodkov pa imamo prav tako na voljo veliko število različnih metod in postopkov (npr. Blöschl et al., 2013). Eden izmed možnih načinov je tudi uporaba t.i. stohastičnih padavinskih modelov, s katerimi lahko simuliramo padavine na podlagi preteklega dogajanja na lokaciji (npr. Haberlandt and Radtke, 2014). Takšna obravnava namreč omogoča tudi simulacije več stoletnih nizov podatkov o pretokih, na podlagi katerih lahko nato izvedemo verjetnostne analize ter projektne hidrograme določimo z uporabo metodologije opisane v poglavju 2 (podobno, kot če bi razpolagali z merjenimi podatki o pretokih).

3.2.1 Simulacije z uporabo stohastičnega padavinskega modela in uporabo hidrološkega modela padavine-odtok v primeru manjših porečij

Če je v sklopu hidrološke študije treba določiti tudi katere druge hidrološke spremenljivke (npr. srednji letni pretok ali nizke pretoke), je za takšne analize smiselno uporabiti hidrološki model padavine-odtok, ki omogoča zvezne simulacije. Eden takšnih modelov je GR4H (Coron et al., 2017; Lavtar et al., 2020; Mathevet, 2005; Perrin et al., 2003; Sezen et al., 2019). Gre za enovit konceptualni hidrološki model padavine-odtok, ki omogoča izračun pretokov na podlagi podatkov o padavinah in potencialni evapotranspiraciji (PET) oziroma temperaturi zraka. Model je bil v preteklosti že večkrat uporabljen na slovenskih porečjih in se je izkazal kot ustrezna izbira za modeliranje površinskega odtoka. Model GR4H je bil uporabljen za modeliranje kraških območij (Sezen et al., 2019, 2018), za analizo vpliva podnebnih sprememb na nastop sočasnih ekstremnih dogodkov (Sezen et al., 2020), za napoved proženja plazov (Bezak et al., 2019), za analize vpliva podnebnih sprememb na razmere, pomembne za proženje plazov (Bezak et al., 2021b), za analizo vpliva podnebnih sprememb na nizke in visoke pretoke (Sapač et al., 2019), za modeliranje odtoka reke Save (Lavtar et al., 2020), itd. Za takšen namen pa se seveda lahko uporabi tudi kakšen drug podoben hidrološki model (npr. HBV ali HEC-HMS z uporabo modulov, ki omogočajo izvedbo zveznih simulacij). Z uporabo modela padavine-odtok, ki omogoča zvezne simulacije pretokov, lahko projektne pretoke oziroma hidrograme določimo glede na naslednji postopek:

- Postavitev hidrološkega modela in ocena parametrov modela.
- Umerjanje (kalibracija) in preverjanje (verifikacija) hidrološkega modela glede na merjene podatke o pretokih, v kolikor so le-ti na voljo.
- Postavitev stohastičnega modela padavin in ocena parametrov stohastičnega padavinskega dogodka glede na dejanske podatke o padavinah ter kontrola ali je stohastični padavinski model sposoben ustrezno simulirati podatke o padavinah.

- Simulacija dovolj dolgih nizov podatkov o padavinah (npr. več 100 let), ki jih uporabimo kot vhodni podatek v umerjen in preverjen hidrološki model padavine-odtok. Izračun odтока z uporabo hidrološkega modela na podlagi stohastičnih padavin.
- Na podlagi simuliranih pretokov lahko nadalje npr. izvedemo verjetnostne analize (največje letne konice) za določitev projektnih pretokov ter za določitev projektnih hidrogramov izberemo tipični hidrogram, ki opisuje stanje na obravnavanem porečju. Uporabimo lahko postopke opisane v poglavju 2.

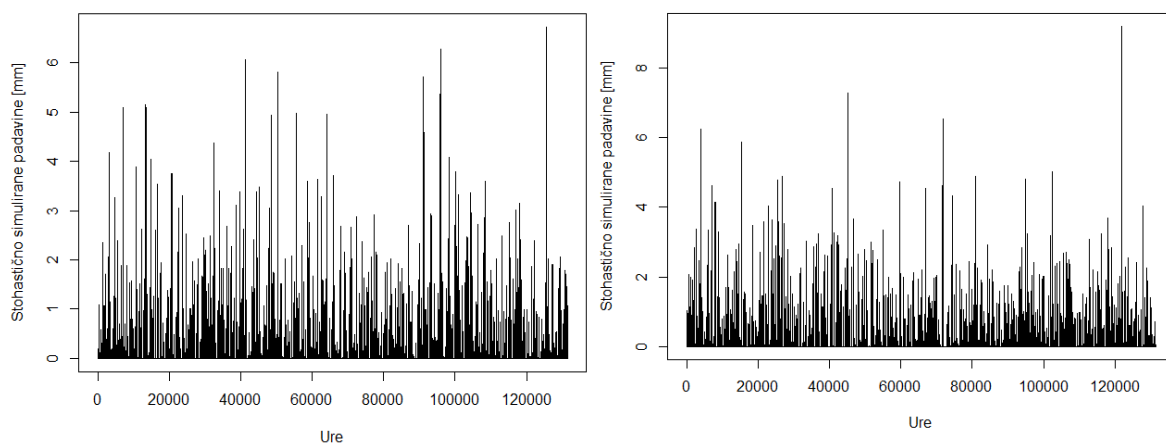
Primer uporabe stohastičnega modela padavin in hidrološkega modela GR4H je prikazan v študiji UL FGG (2022), kjer je bila uporabljena naslednja metodologija določanja projektnih pretokov:

- Z uporabo stohastičnega padavinskega modela smo simulirali 100-krat po 60-let urnih vrednosti padavin (lahko se uporabi tudi več ali manj simulacij, odvisno od hitrosti delovanja stohastičnega padavinskega modela). Primer takšnih simulacij je prikazan na sliki 44.
- Z uporabo stohastičnega modela smo simulirali 100-krat po 60-let dnevnih vrednosti temperature zraka, ki se nato uporabijo za izračun urnih vrednosti potencialne evapotranspiracije. Primer simulacije dnevnih vrednosti je prikazan na sliki 45.
- Parametre hidrološkega modela GR4H smo ocenili glede na značilnosti porečja (npr. delež gozda, delež slabo izdatnih vodonosnikov, povprečni odtočni potencial, povprečni naklon porečja) in z regionalizacijo parametrov, če merjenih podatkov o pretokih ni na razpolago. V nasprotnem primeru se priporoča določitev parametrov glede na postopek umerjanja. Primer regionalizacije parametrov je prikazan na sliki 46. Dodatno se lahko za oceno parametrov uporabi tudi katera izmed drugih metod, ki so prikazane v poglavju 3.1.2.4.
- Za vsako izmed 100 simulacij smo zagnali hidrološki model GR4H z uporabo ocenjenih ali umerjenih vrednosti parametrov modela in z upoštevanjem generiranih urnih vrednosti padavin in potencialne evapotranspiracije. Vsak izmed zagonov tako upošteva malce drugačne podatke o padavinah in potencialni evapotranspiraciji. S tem se upošteva tudi variabilnost, povezana s padavinami in temperaturo zraka.
- Za vsakega izmed 100 modelov (izračunov) smo izvednotili srednji pretok v posameznem letu (Q_s) in pa tudi največji pretok v posameznem letu (Q_{vk}).
- Na podlagi Q_{vk} vrednosti smo za vsakega izmed 100 zagonov modela izvedli verjetnostne analize z uporabo Pearsonove porazdelitve tipa 3 (parametri porazdelitve ocenjeni z uporabo metode momentov L). Izbira porazdelitve je pogojena s samo lokacijo študije in je opisana v poglavju 2.1. Za vsakega izmed 100 zagonov smo tako ocenili vrednosti Q_{10} , Q_{20} , Q_{50} , Q_{100} , Q_{500} in Q_{1000} (vsakič smo uporabili 60 let podatkov in metodo AM). Z upoštevanjem 100 različnih zagonov smo določili možen razpon vrednosti posameznega karakterističnega pretoka,

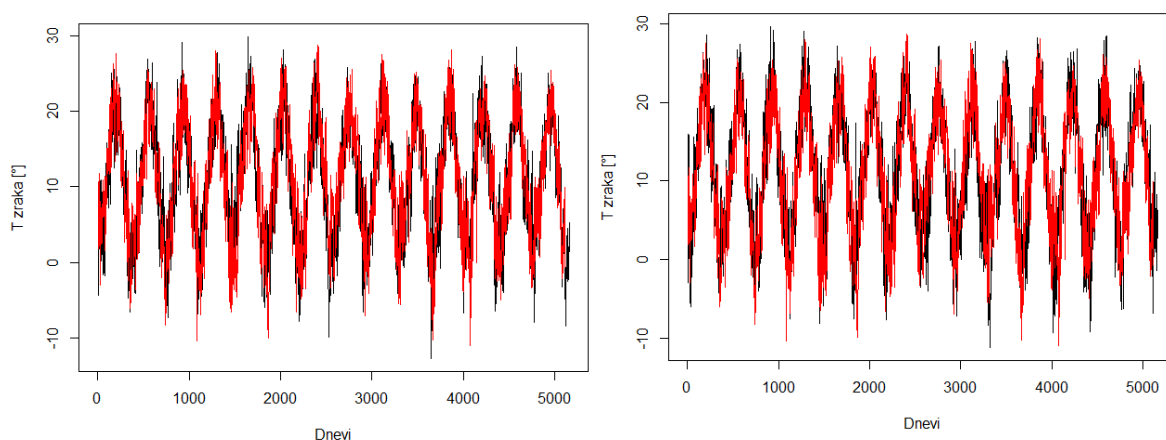
pri čemer se lahko upoštevajo 90% empirični intervali zaupanja. Primer tako izvedenih verjetnostnih analiz je prikazan na sliki 47.

- Na podlagi Q_s , določenega za vsako leto, smo za vseh 100 simulacij določili najmanjši srednji pretok v 60-letnem obdobju (nQ_s) in pa povprečni srednji pretok v 60-letnem obdobju (sQ_s). Tudi v tem primeru izračun z uporabo 100 simulacij omogoča upoštevanje negotovosti. Primer tako ocenjenih vrednosti je prikazan na sliki 48.

Omenjena metodologija je bila preverjena na porečju Medije (postaja Zagorje) ter dodatno še na naslednjih območjih: Sopota (Žebnik), Sevnica (Metni Vrh), Dreta (Kraše), Gračnica (Vodiško). Metodologija pa je bila nato uporabljena za določitev projektnih hidrogramov za večje pritoke reke Save med Litijo in Zidanim Mostom (npr. Boben, Trboveljščica, itd.) (UL FGG, 2022).

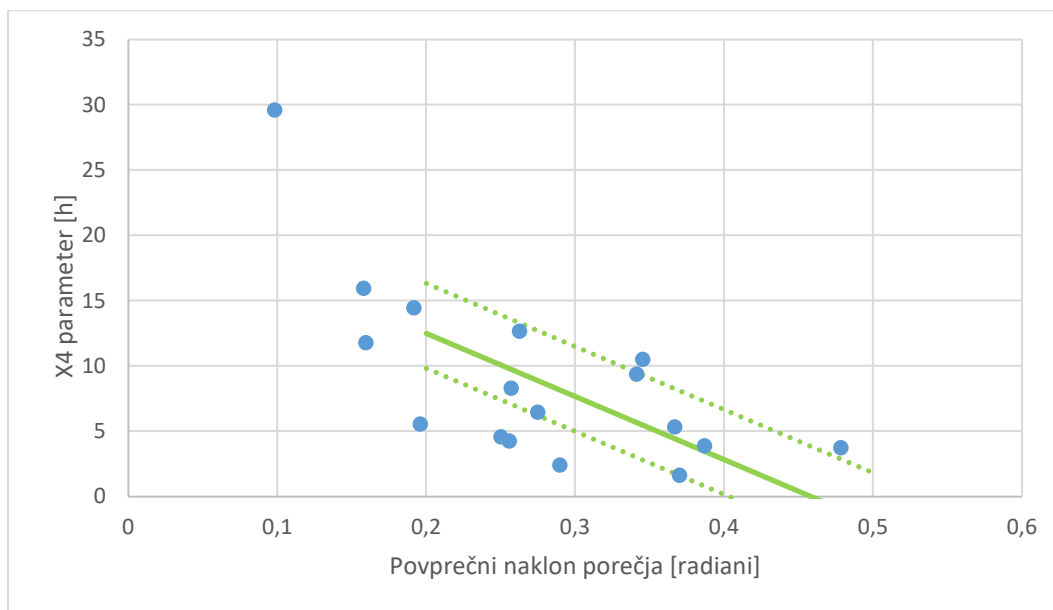


Slika 44: Primer uporabe stohastičnega modela padavin oz. simulacije urnih padavin za približno 13 let z urnim časovnim korakom. Celotna količina simuliranih padavin je znašala 16936 mm (letno približno 1300 mm) v primeru na levi sliki in 19378 mm (letno približno 1490 mm) v primeru na desni sliki. Prikazani so rezultati za padavinsko postajo Hrastnik. Povzeto po UL FGG (2022).

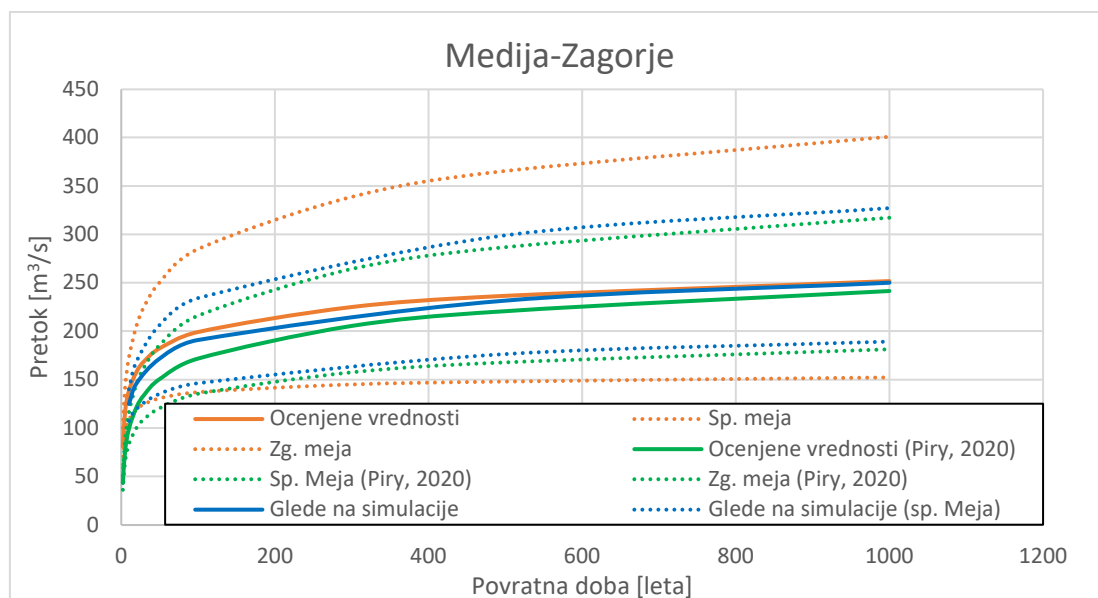


Slika 45: Primer simulacije dnevni vrednosti temperature zraka (rdeča črta) in merjenih dnevni vrednosti (črna črta). Povprečna vrednost temperature zraka je znašala 11,0 °C v primeru na levi sliki

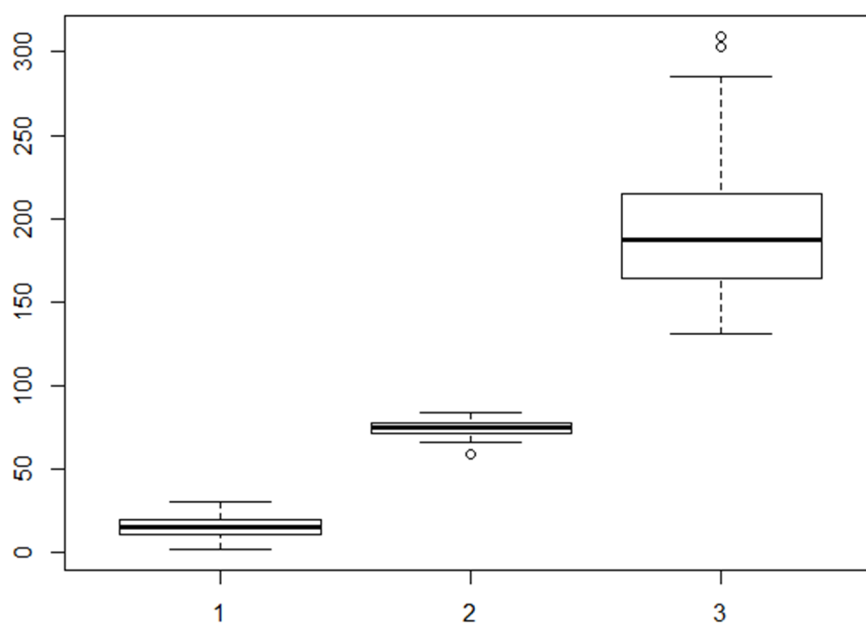
in 11,4 °C v primeru na desni sliki. Prikazani so rezultati za postajo Hrastnik. Povzeto po UL FGG (2022).



Slika 46: Primer regionalizacije enega izmed 4 parametrov (X_4) modela GR4H. Povezava med povprečno vrednostjo naklona porečja in parametrom X_4 (zelená črta) ter 50 % intervali zaupanja (zeleni črtkani črti). Povzeto po UL FGG (2022).



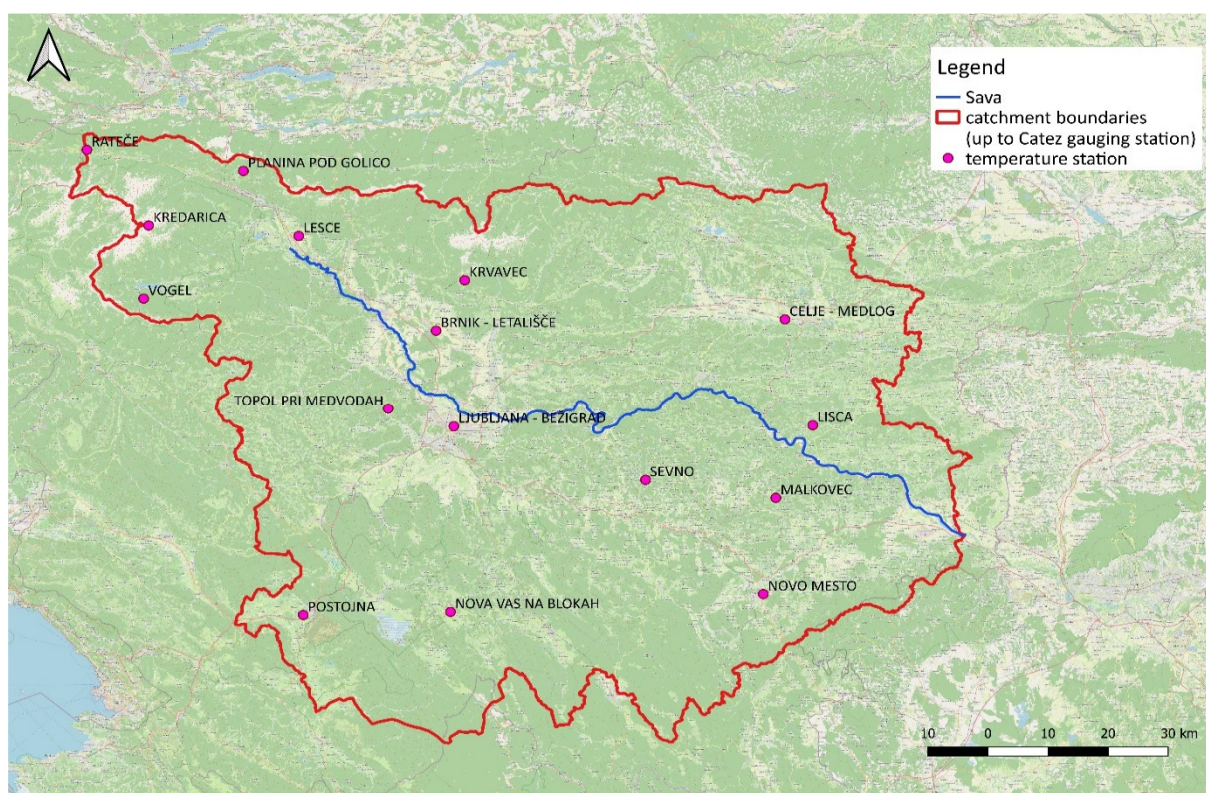
Slika 47: Primer primerjave rezultatov verjetnostnih analiz določenih s predlagano metodologijo in rezultatov na podlagi merjenih podatkov o pretokih. Prikazani so podatki za vodomerno postajo Zagorje na vodotoku Medija. Povzeto po UL FGG (2022).



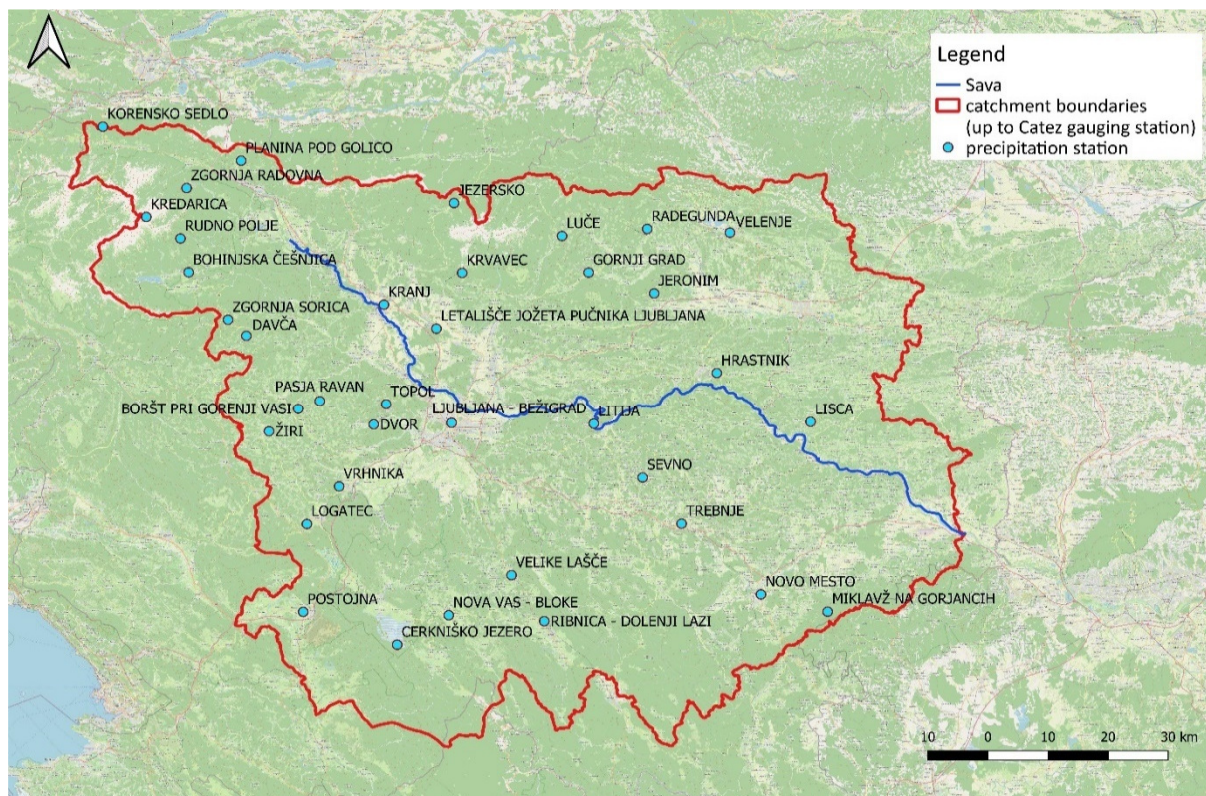
Slika 48: Primer rezultatov za vrednosti nQ_{vk} (1), sQ_{vk} (2) in vQ_{vk} (3) na podlagi 100 simulacij. Rezultati so prikazani z uporabo okvirjev z ročaji. Y-os prikazuje vrednosti pretokov v m³/s. Prikazani so podatki za lokacijo vodomerne postaje Zagorje na vodotoku Medija z upoštevanjem predlagane metodologije. Povzeto po UL FGG (2022).

3.2.2 Vpliv prostorske nehomogenosti ekstremnih padavin z uporabo hidrološkega modela padavine-odtok v primeru večjih porečij

Kot je bilo prikazano v poglavju 3.1.2.3 je v primeru porečij, manjših od 1.200 km², v Sloveniji smiselno upoštevati prostorsko homogene ekstremne padavine. V primeru večjih porečij pa smo analizirali vpliv prostorske razporeditve padavin in vpliv predhodne namočenosti tal na rezultate. Za namen teh analiz smo izbrali porečje reke Save do vodomerne postaje Čatež s površino 10.231 km² (Serwinska, 2022). Uporabljen je bil hidrološki model GR4H, ki ga je v svoji nalogi uporabil tudi (Alexopoulos, 2021). Na podlagi točkovnih podatkov o temperaturi zraka (slika 49) in padavinah (slika 50) so bile najprej določene prostorske vrednosti obeh spremenljivk z upoštevanjem Thiessenovih poligonov (Serwinska, 2022).

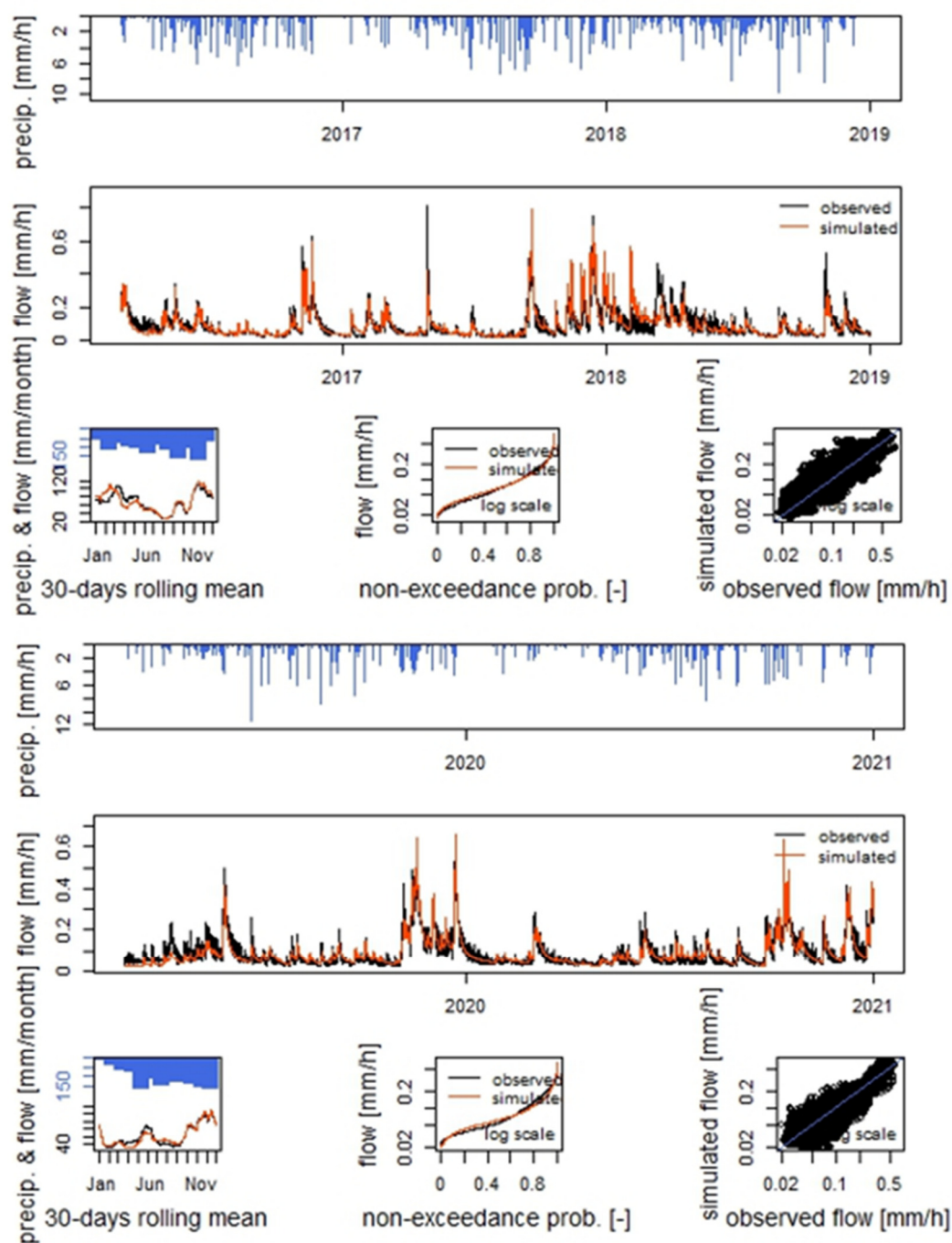


Slika 49: Prikaz temperaturnih postaj, ki so bile uporabljene v postopku hidrološkega modeliranja Serwinska (2022).



Slika 50: Prikaz padavinskih postaj, ki so bile uporabljene v postopku hidrološkega modeliranja Serwinska (2022).

Hidrološki model GR4H je bil najprej umerjen na podlagi urnih podatkov o pretokih z vodomerne postaje Čatež za obdobje 2017–2019 in nato še validiran s podatki obdobja 2020–2021 (slika 51). Preverili smo ustreznost modela brez vključenega snežnega modula kot tudi model z vključenim snežnim modulom (CemaNeige) (Serwinska, 2022). V obeh primer je bila uspešnost modela podobna, kar pomeni, da smo za namen teh analiz nadalje uporabili model brez snežnega modula (GR4H). Vrednosti Kling-Gupta kriterija ustreznosti (KGE) rezultatov modeliranja so bile tako v obdobju umerjanja kot validacije višje od 0,87. To pomeni, da je model v grobem sposoben ponazoriti naravne procese na tem območju.

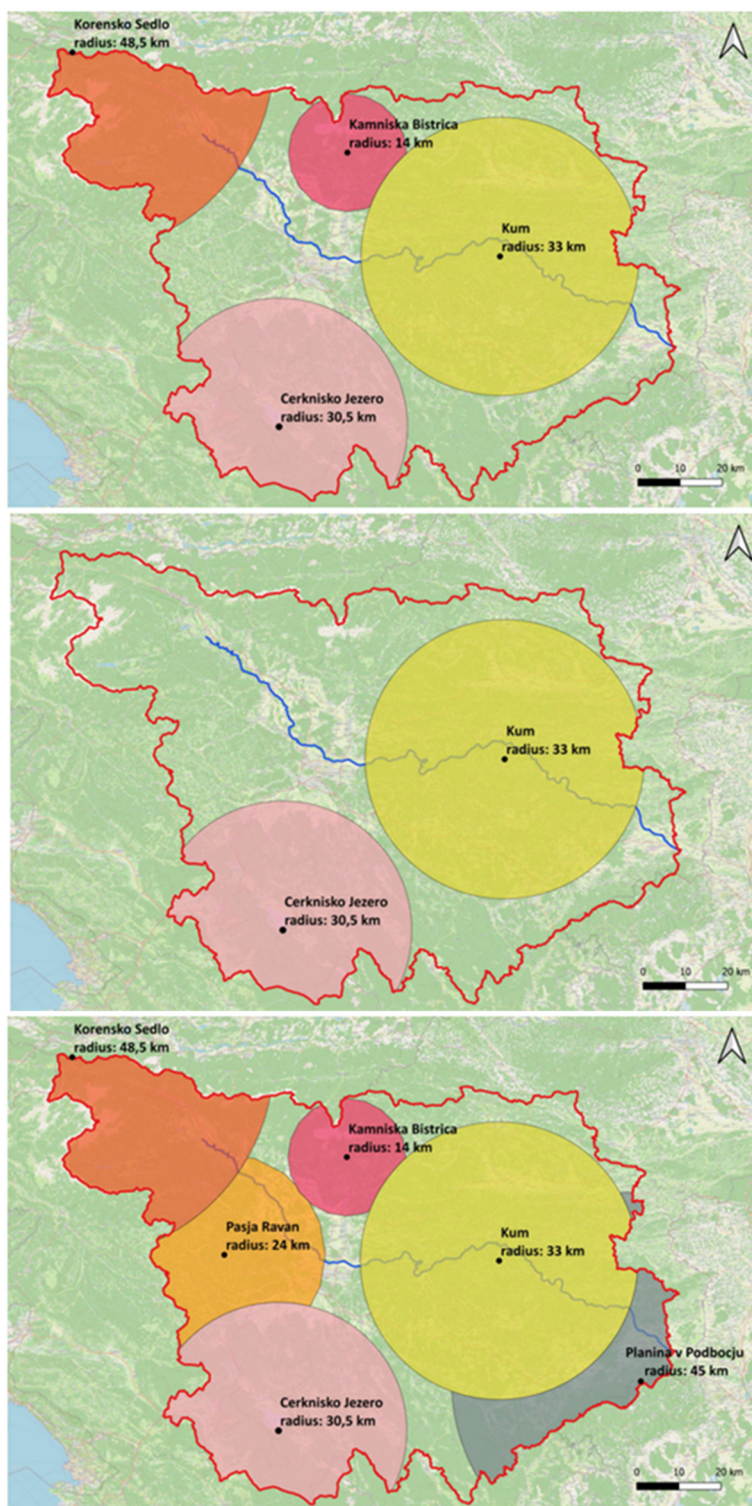


Slika 51: Rezultati hidrološkega modela GR4H glede na podatke z vodomerne postaje Čatež v obdobju umernjanja (zgoraj) in obdobju validacije (spodaj). Povzeto po Serwinska (2022).

Sledilo je preverjanje več različnih možnosti definicije projektne padavinskega dogodka z upoštevanjem analiz sočasnosti nastopa padavin (Serwinska, 2022). Ocenjen čas koncentracije porečja Save do vodomerne postaje Čatež je bil ocenjen na 24 ur, kar pomeni, da je bilo to tudi izbrano trajanje projektne padavinskega dogodka. Količina padavin je bila določena na podlagi ITP krivulj za 10- in 100-letno povratno dobo. Za opis porazdelitve padavin znotraj padavinskega dogodka pa smo uporabili Huffove krivulje (Dolšak, 2015). Podrobnejši opis postopka je na voljo v nalogi, ki jo je pripravila (Serwinska, 2022). Kot izhodišče oziroma vrednosti za primerjavo smo uporabili rezultate verjetnostnih analiz za vodomerno postajo Čatež (ARSO, 2013). Za določitev projektne padavinskega dogodka in predhodnih padavin smo uporabili različne kombinacije, ki so prikazane v preglednici 8. Različni prostorski scenariji porazdelitve padavin so prikazani na sliki 52.

Preglednica 8: Prikaz osnovnih scenarijev za določitev projektne padavinskega dogodka in predhodnih padavin, ki so bili analizirani. Povzeto po Serwinska, 2022.

Primer	Količina padavin [mm]	Trajanje padavinskega dogodka [h]	Scenarij prostorske porazdelitve padavin	Huffova krivulja [%]	Količina predhodnih padavin [mm]	Trajanje predhodnih padavin [h]	Simulirana konica pretoka na postaji Čatež [m ³ /s]
1	131	24	Scenarij 1	10	-	-	1291
2	131	24	Scenarij 1	50	-	-	1265
3	131	24	Scenarij 1	90	-	-	1269
4	131	24	Scenarij 1	90	-	-	1299
5	200	24	Celotno porečje	90	-	-	2832
6	131	24	Scenarij 1	10	2 x 82	2 x 12	4034
7	131	24	Scenarij 1	50	2 x 82	2 x 12	3906
8	131	24	Scenarij 1	90	2 x 82	2 x 12	4014
9	131	24	Scenarij 1	90	1 x 155	1 x 24	3855
10	131	24	Scenarij 1	90	3 x 55	3 x 6	3963
11	89	24	Scenarij 2	90	3 x 113	3 x 12	4026
12	160	24	Scenarij 3	90	1 x 90	1 x 24	3988
13	131	24	Scenarij 1	90	2 x 82	2 x 12	2456
14	89	24	Scenarij 2	90	3 x 113	3 x 12	2881
15	160	24	Scenarij 3	90	1 x 90	1 x 24	221



Slika 52: Prikaz treh različnih scenarijev prostorske porazdelitve padavin (scenarij 1 - zgoraj, scenarij 2 - v sredini, scenarij 3 - spodaj). Povzeto po Serwinska (2022).

Izvedene analize so pokazale na številne praktične zaključke, ki so pomembni z vidika hidrološkega modeliranja. Ugotovimo lahko, da tudi če se ekstremne padavine zgodijo na celotnem porečju Save (do vodomerne postaje Čatež), je simulirana konica pretoka manjša (Scenarij 5 v preglednici 8), kot je tista,

ki jo lahko določimo v primeru verjetnostnih analiz, ko je Q_{100} ocenjen na $4000 \text{ m}^3/\text{s}$. To pomeni, da je v primeru določanja projektnih pretokov in hidrogramov z uporabo umerjenega hidrološkega modela pri večjih porečjih nujno upoštevati tudi predhodno namočenost, saj ima ta v veliki meri večji vpliv na simulirane vrednosti pretokov, kot pa sam prostorski obseg padavinskega dogodka (preglednica 8). Nadalje lahko ugotovimo, da je bil vpliv razporeditve padavin v primerjavi z vplivom predhodnih padavin relativno majhen (preglednica 8). Posledično je v primeru takšnih analiz nujno ustrezno upoštevati predhodno vlažnost tal. Veliko pomembnost predhodne vlažnosti tal na nastop poplav so potrdile tudi številne raziskave tako v Evropi kot v ZDA (Berghuijs et al., 2019, 2016; Blöschl et al., 2019b). V analiziranem primeru se je scenarij št. 8 (preglednica 8) izkazal kot tisti, kjer je bila modelirana konica pretoka najbolj podobna konici pretoka, ki jo lahko določimo na podlagi verjetnostnih analiz. Ta scenarij je tudi v primeru 10-letne povratne dobe dal precej podobne rezultate kot verjetnostne analize ($2810 \text{ m}^3/\text{s}$) (scenarij 13 v Preglednica 8 8).

Glede na izvedene analize predlagamo, da se pri definiciji projektnih padavin v primeru večjih porečij kot izhodišče upoštevajo rezultati verjetnostnih analiz, saj je v Sloveniji gostota vodomernih postaj relativno visoka, kar pomeni, da lahko v primeru večjih porečij najdemo vodomerno postajo, kjer je na voljo dovolj merjenih podatkov. To omogoča tudi umerjanje in validacijo hidrološkega modela. Projektni padavinski dogodek pa naj se nato ustrezno določi z uporabo različnih vrednosti predhodne količine padavin (upoštevanje predhodne vlažnosti tal) in primerjavo z rezultati verjetnostnih analiz.

4 Usklajevanje, sinteza in diseminacija predlagane metodologije za določanje projektnih pretokov in hidrogramov

4.1 Usklajevanje predlagane metodologije s stroko in diseminacija

Okvirni predlog metodologije smo javno predstavili širši strokovni javnosti že na Mišičevem vodarskem dnevu v letu 2021, ki se ga vsako leti udeleži okrog 240 udeležencev iz različnih slovenskih vodnogospodarskih in projektantskih podjetij, javnih in upravnih služb ter raziskovalnih ustanov, ki delujejo na področju vodarstva. Prispevek z naslovom Razvoj metodologije za določanje projektnih pretokov je objavljen na spletni strani <https://www.mvd20.com/LETO2021/R6.pdf>. Poleg tega smo prve rezultate projekta predstavili tudi v mednarodnem prostoru, in sicer na mednarodnih konferencah IAHS in IAHR.

Dne 29. 11. 2022 je bila na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo (Univerza v Ljubljani) izvedena strokovna delavnica z naslovom Razvoj metodologije za izračun visokovodnih valov na podlagi ekstremnih padavinskih dogodkov (projekt št. V2-2137 v okviru »CRP 2021«). Na delavnico so bili vabljeni strokovnjaki iz prakse (projektanti), odločevalci oz. zaposleni v državnih organizacijah (npr. MOP, ARSO, DRSV) ter ostali, ki se v Sloveniji ukvarjajo s hidrološkimi in hidravličnimi študijami. Skupaj je bilo razposlanih več kot 60 vabil na različna podjetja in institucije. Delavnice se je udeležilo 27 oseb. V okviru delavnice je bila predstavljena predlagana metodologija za določanje projektnih pretokov in hidrogramov z opisom glavnih korakov posameznih postopkov. Poseben poudarek je bil namenjen tudi vsem negotovostim, ki se pojavljajo praktično v vseh fazah hidroloških analiz, od negotovosti v samih izmerjenih podatkih in pretočnih krivuljah do negotovosti pri določanju parametrov modelov ali izbiri posameznih metod ter ne nazadnje tudi negotovosti zaradi podnebne spremenljivosti.

Po predstavitvi je sledila razprava. Predlog metodologije je bil dobro sprejet s strani udeležencev, saj tovrsten pregled različnih metod na enem mestu skupaj s smernicami o ustreznosti uporabe predstavlja novost v slovenskem prostoru. Pripravljen dokument s predlagano metodologijo in primeri bo skupaj z nekaterimi novimi podatki v pomoč tako izvajalcem hidroloških in hidravličnih študij kot tudi naročnikom in odločevalcem. Na predlog metodologije, povzet v preglednici 9, ni bilo vsebinskih pripomb. Kljub temu pa je razprava odprla nekaj vprašanj, povezanih predvsem z vidikom kritične presoje vhodnih podatkov, izračunov in rezultatov. Strinjali smo se z dejstvom, da je hidrološki del projektne dokumentacije večinoma zelo kratek in preveč podcenjen glede na pomembnost izvrednotenih hidroloških podatkov za vse nadaljnje korake. Pogosto prihaja do izrazitih nesorazmerij med natančnostjo in kompleksnostjo hidroloških in hidravličnih izračunov, kar zmanjšuje uporabno vrednost

oziroma natančnost rezultatov hidrološko-hidravličnih študij. Pri interpretaciji končnih rezultatov hidravličnih modelov pa se po navadi pozabi na kakovost vhodnih hidroloških podatkov in se jih obravnava z močno precenjeno natančnostjo. Poleg vsega naštetega se pri določanju projektnih pretokov v slovenski vodarski praksi skoraj nikoli ne upošteva negotovosti. To med drugim vključuje tudi kritično presojo podatkov, s katerimi razpolaga ARSO in so pogosto (nekritično) uporabljeni pri hidroloških študijah. Konkretno so bili v razpravi izpostavljeni na primer arhivski podatki o pretokih, kjer bi kritično presojo poleg samih podatkov izboljšale informacije o morebitnih spremembah pretočnih krivulj in sledljivost teh sprememb, informacije o načinu merjenja pretokov in zgodovinska sledljivost izbranih načinov meritev, mnenje o ustreznosti merskega profila, informacije o morebitnih razlivanjih ob visokih vodah ipd. Za zmanjšanje tveganja napak, do katerih lahko pride zaradi človeškega dejavnika (npr. tipkarske napake), so udeleženci predlagali tudi kontrolo informacij iz temeljnih knjig razvoja vodomernih postaj.

Kot dodatno zgoraj omenjenim predlogom, je bilo na delavnici izpostavljeno, da bi bilo smiselno nadgraditi oziroma periodično obnavljati podatke, ki predstavljajo vhodne podatke v hidrološke študije (npr. ITP krivulje, Huffove krivulje) ter jih v prvi vrsti najprej potrditi s strani pristojnih institucij (DRSV, MOP) ter potem objavljati na spletnih straneh pristojnih institucij (npr. ARSO) kot sestavni del uradnih dokumentov, ki bi uporabnikom v praksi služili kot konsistentni vhodni podatki za nadaljnje analize. To velja tudi za novo razvite metode ali podatke (npr. Huffove krivulje), ki so bile razvite v sklopu zaključnih del na UL FGG, katerim kvalitete nihče ne oporeka, ravno nasprotno, a bi bilo prav, da bi bile tudi uradno potrjene s strani pristojnih institucij (DRSV, MOP). Taka potrjevanja novih podatkov in metod bi se morala izvajati periodično, saj se hidrologija kot veda v svetu in s tem tudi v Sloveniji nenehno razvija. V smislu uradno potrjenih podatkov je bil izpostavljen tudi problem objavljanja starejših podatkov (npr. Povratne dobe velikih in malih pretokov za merilna mesta državnega hidrološkega monitoringa površinskih voda (ARSO, 2013)) na uradnih spletnih straneh ARSO, saj naročniki študij in odločevalci (npr. občine) smatrajo te podatke za uradne, kljub temu da so stari in bi jih bilo z vidika podnebnih sprememb nujno sproti (npr. po večjih poplavnih dogodkih) oz. vsaj na nekaj let posodablјati. Poleg tega pa bi nujno morali vsebovati tudi podatek o negotovosti (npr. meje zaupanja).

Posledično je, kot je bilo še posebej poudarjeno na delavnici, nujno upoštevati vse negotovosti ter v nekaterih primerih narediti kontrolo izračunov z uporabo vsaj dveh različnih postopkov in na ta način pridobiti možen razpon rezultatov projektnih vrednosti. Vsekakor je vsako porečje treba obravnavati kot unikatno in uporabiti diagnostični pristop pri vrednotenju rezultatov posameznih hidroloških metod. Skladno s tem se priporoča, da se v postopku priprave projektne dokumentacije obvezno izvedejo tudi terenski ogledi in po potrebi tudi meritve pretoka, ki so ključne predvsem pri umerjanju modelov. Ob tem velja dodatno opozoriti na dejstvo, da je uporaba neumerjenih modelov (tako hidroloških kot

hidravličnih) za analizo dogajanja ob določenih poplavnih dogodkih lahko zelo vprašljiva. Zato naj se tovrstne analize izvedejo z veliko mero previdnosti in kritično presojo dobljenih rezultatov.

Izpostavljeno je bilo tudi vprašanje določanja projektnih pretokov oziroma hidrogramov, ki s predlagano metodologijo niso bili izrecno pokriti, kot so na primer porečja, manjša od 1 km², za katera ni na voljo merjenih podatkov. Ker je v tem primeru uporaba regionalnih empiričnih krivulj manj primerna, se predlaga uporabo hidrološkega modela in upoštevanje sintetičnega padavinskega dogodka z ustreznim upoštevanjem negotovosti (npr. različne definicije porazdelitve padavin, variabilnost v parametrih modela itd.).

4.2 Povzetek predlagane metodologije za določanje projektnih pretokov in hidrogramov

Glede na rezultate raziskave je kratek povzetek predlagane metodologije za določanje projektnih pretokov in hidrogramov prikazan v preglednici 9, predlogi uporabe posamezne kategorije metod pa so predstavljeni v preglednici 10.

Preglednica 9: Kratek povzetek predlaganih metod za določanje projektnih pretokov in hidrogramov. Podrobnejši opisi metod so podani v prejšnjih poglavjih tega poročila.

	MERJENA POREČJA (PODATKI O PRETOKIH SO NA VOLJO)	NEMERJENA POREČJA (PODATKOV O PRETOKIH NI ALI JIH JE PREMALO)
ENOSTAVNEJŠA METODA	Univariatne verjetnostne analize z uporabo največjih letnih konic o pretokih (AM). Rezultati že izdelanih verjetnostnih analiz do leta 2018 so na voljo za 179 vodomernih postaj na območju Slovenije (Piry, 2020). Negotovost se upošteva preko intervalov zaupanja.	Ali uporaba regionalnih empiričnih krivulj za podatek o projektnem pretoku in (ali) uporaba hidrološkega modela (npr. HEC-HMS) padavine-odtok z upoštevanjem projektnih padavin. Negotovost se upošteva z definicijo različnih projektnih padavin.
KOMPLEKSNEJŠA METODA	Multivariatne analize z uporabo metodologije, ki so jo predlagali Brunner et al. (2017). Negotovost se upošteva z upoštevanjem različnih definicij povratnih dob.	Uporaba hidrološkega modela padavine-odtok, ki omogoča zvezne simulacije ali z uporabo stohastičnega padavinskega modela ali z upoštevanjem več različnih scenarijev projektnih padavinskih dogodkov in predhodne vlažnosti v odvisnosti od velikosti porečja

Preglednica 10: Primeri uporabe posamezne kategorije metod.

PRIMER UPORABE	
ENOSTAVNEJŠA METODA	Izračuni povezani z načrtovanjem premostitvenih in ostalih objektov na manj pomembni infrastrukturi, izrisom kart poplavne nevarnosti in razredov poplavne nevarnosti ter vodnogospodarskimi ureditvami na območjih, ki niso opredeljena kot območja pomembnega vpliva poplav itd.
KOMPLEKSNEJŠA METODA	Vsi izračuni povezani z načrtovanjem zahtevnih hidrotehničnih objektov (npr. hidroenergetskih objektov, vodni zadrževalniki, hidrotehničnih objektov na kritični infrastrukturi), analizami poplavne nevarnosti na območjih pomembnega vpliva poplav ter načrtovanjem protipoplavnih ukrepov na teh območjih.

5 Zaključki

Poročilo prikazuje analize, izvedene v okviru CRP projekta V2-2137 z naslovom: »Razvoj metodologije za izračun visokovodnih valov na podlagi ekstremnih padavinskih dogodkov«. Na podlagi izvedenega pregleda literature je v poročilu prikazana predlagana metodologija za izračun projektnih pretokov v Sloveniji, tako na podlagi merjenih podatkov o pretokih kot tudi za primere, ko merjenih podatkov o pretokih ni na voljo. Za vsakega izmed teh primerov je predlaganih več različnih načinov določitve projektnih pretokov oziroma projektnih hidrogramov, ki jih je treba smiselno uporabiti glede na zahteve projektnih nalog, kjer se uporabljajo rezultati hidroloških analiz. Točnost določitve projektnih pretokov je namreč ključnega pomena za učinkovito upravljanje voda in zmanjševanje poplavne nevarnosti, kar obsega tako načrtovanje protipoplavnih in ostalih vodnogospodarskih ukrepov kot tudi umeščanje ostalih objektov in infrastrukture v vplivna območja vodotokov. Ker se nove metode razvijajo relativno hitro, se lahko smiselno uporabijo ali prilagodijo tudi druge metode oz. modeli, ki imajo podobno raven kompleksnosti oz. natančnosti in so ustrezno umerjeni ter validirani.

Eden od glavnih zaključkov projekta je, da je vsako porečje treba obravnavati kot unikatno in uporabiti diagnostični pristop pri vrednotenju rezultatov posameznih hidroloških metod. To pomeni, da uporabimo vse dodatne obstoječe kvalitativne in/ali kvantitativne informacije, ki so lahko časovne (npr. zgodovinski podatki o poplavah), prostorske (npr. merjeni podatki na podobnih sosednjih porečjih) in vzročne (razumevanje lokalnih vzrokov za nastanek poplav in odziva posameznih porečij), kar lahko naredi le strokovno usposobljena in izkušena oseba, ki dobro razume hidrološke procese in povezave med njimi. Skladno s tem se priporoča, da se v postopku priprave projektne dokumentacije obvezno izvedejo tudi terenski ogledi in po potrebi tudi dodatne meritve pretoka, ki so ključne predvsem pri umerjanju tako hidroloških kot tudi hidravličnih modelov. Dodatno je smiselno rezultate (npr. projektne hidrograme) ovrednotiti tudi z vidika ocene koeficienta odtoka ter volumnov visokovodnih valov glede na lastnosti določenega porečja (npr. maksimalna količina padavin, ki jo lahko pričakujemo na določenem območju). Poleg tega je smiselno kritično ovrednotiti tudi obliko projektnih hidrogramov, ki jih dobimo kot rezultat izračunov. Oblika projektnih hidrogramov naj bo približno podobna dejanskim merjenim hidrogramom.

Trenutno je v praksi hidrološki del projektne dokumentacije večinoma zelo kratek in preveč podcenjen glede na pomembnost izvedenih hidroloških podatkov za vse nadaljnje korake. Pogosto prihaja do izrazitih nesorazmerij med natančnostjo in kompleksnostjo hidroloških in hidravličnih izračunov, kar zmanjšuje uporabno vrednost oziroma natančnost rezultatov hidrološko-hidravličnih študij. Pri interpretaciji končnih rezultatov hidravličnih modelov pa se po navadi pozabi na kakovost vhodnih

hidroloških podatkov in se jih obravnava z močno precenjeno natančnostjo. To je vsekakor potrebno spremeniti in rezultati tega projekta so prvi korak k temu.

Predlagamo, da se v vseh primerih v izračune oziroma končne rezultate vključi tudi oceno negotovosti (npr. meje zaupanja) določene projektne količine (npr. pretoka s 100-letno povratno dobo) ter v nekaterih primerih narediti kontrolo izračunov z uporabo vsaj dveh različnih postopkov in na ta način pridobiti možen razpon rezultatov projektnih vrednosti. Upoštevanje negotovosti pa se potem smiselno prenese v naslednje korake uporabe teh podatkov (npr. načrtovanje protipoplavnih ureditev, načrtovanje prepustov in cestnih odprtín, izris kart razredov poplavne nevarnosti itd.).

Za zmanjšanje negotovosti pa je vsekakor potrebna tudi kritična presoja vhodnih podatkov, pri čemer bi kritično presojo poleg samih podatkov izboljšale dodatne informacije o morebitnih spremembah pretočnih krivulj in sledljivost teh sprememb, informacije o načinu merjenja pretokov in zgodovinska sledljivost izbranih načinov meritev, mnenje o ustreznosti merskega profila, informacije o morebitnih razlivanjih in obtekanjih merskih profilov ob visokih vodah ipd., ki bi bile dostopne skupaj s podatki posamezne vodomerne postaje.

Nujno bi bilo potrebno tudi nadgraditi oziroma periodično obnavljati podatke, ki predstavljajo vhodne podatke v hidrološke študije (npr. ITP krivulje, Huffove krivulje), predvsem pa jih najprej uradno potrditi s strani pristojnih institucij (DRSV, MOP) ter potem objavljati na spletnih straneh pristojnih institucij (npr. ARSO). To velja tudi za novo razvite metode ali podatke (npr. Huffove krivulje), ki so bili razviti v sklopu raziskovalnih nalog ali zaključnih del na UL FGG. Taka potrjevanja novih podatkov in metod bi se morala izvajati periodično, saj se hidrologija kot veda v svetu in s tem tudi v Sloveniji nenehno razvija, zaradi podnebne spremenljivosti pa lahko že eno dodatno leto novih meritev spremeni situacijo.

Kljub temu da je bila implementacija poplavne direktive (EU Flood, Directive 2007/60/EC) izvedena relativno uspešno (Poljansek et al., 2019), je na področju poplavnega tveganja in priprave t. i. poplavnih kart treba storiti korak naprej in v izračune vključiti različne scenarije (npr. različni scenariji padavinskih dogodkov in predhodne vlažnosti tal), kar bi potencialno omogočalo pripravo poplavnih kart z upoštevanjem verjetnosti pojava ter ostalih negotovosti (npr. Donevska, 2022; Mudashiru et al., 2021). Tudi v načrtovanje različnih hidrotehničnih objektov bi bilo smiselno vključiti izračune z uporabo različnih kombinacij projektnih hidrogramov in upoštevanjem negotovosti.

Dodatno neznanko in velik problem pri določanju projektnih pretokov v zadnjih desetletjih predstavlja tudi vpliv spremenljivosti podnebja oz. njegova nestacionarnost (Blöschl et al., 2019b; Šraj et al., 2016).

Ta dokazano vpliva tudi na pretoke v Sloveniji (ARSO, 2021; Oblak et al., 2021), zato bi jo bilo potrebno smiselno upoštevati. Možni načini upoštevavanja podnebnih sprememb in prakse nekaterih drugih držav so predstavljeni v prvem delu poročila (poglavje 1.1), za končno odločitev o primerni metodologiji pa je potreben širši konsenz več strok in pristojnih institucij.

6 Reference

- Alexopoulos, M.J., 2021. Use of the reanalysis products for the hydrological rainfall-runoff modelling: Slovenian case studies. Master thesis. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
- ARSO, 2022. Kategorizacija vodotokov [WWW Document]. URL https://gis.arso.gov.si/wfs_web/faces/WFSLayersList.jspx (accessed 8.1.22).
- ARSO, 2021. Podnebne spremembe 2021: Fizikalne osnove in stanje v Sloveniji. Poročilo IPCC 2021. Povzetek za odločevalce z dodanim opisom stanja v Sloveniji. Ljubljana, Slovenia.
- ARSO, 2013. Povratne dobe velikih in malih pretokov. Agencija RS za okolje, Ljubljana.
- Ayalew, D.W., Petroselli, A., De Luca, D.L., Grimaldi, S., 2022. An evidence for enhancing the design hydrograph estimation for small and ungauged basins in Ethiopia. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 42, 101123. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101123>
- Banasik, K., Woodward, D., 2010. Empirical determination of runoff Curve Number for a small agricultural watershed in Poland. 2nd Jt. Fed. Interag. Conf. 11.
- Berghuijs, W.R., Harrigan, S., Molnar, P., Slater, L.J., Kirchner, J.W., 2019. The Relative Importance of Different Flood-Generating Mechanisms Across Europe. *Water Resour. Res.* 55, 4582–4593. <https://doi.org/10.1029/2019WR024841>
- Berghuijs, W.R., Woods, R.A., Hutton, C.J., Sivapalan, M., 2016. Dominant flood generating mechanisms across the United States. *Geophys. Res. Lett.* 43, 4382–4390. <https://doi.org/10.1002/2016GL068070>
- Bezak, N., Borrelli, P., Panagos, P., 2021a. A first assessment of rainfall erosivity synchrony scale at pan-European scale. *Catena* 198, 105060. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105060>
- Bezak, N., Brilly, M., Šraj, M., 2014. Comparison between the peaks-over-threshold method and the annual maximum method for flood frequency analysis. *Hydrol. Sci. J.* 59, 959–977. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.831174>
- Bezak, N., Jemec Auflič, M., Mikoš, M., 2019. Application of hydrological modelling for temporal prediction of rainfall-induced shallow landslides. *Landslides* 16, 1273–1283. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01169-9>
- Bezak, N., Mikoš, M., 2014. Ocena projektnih pretokov z uporabo univariatnih ter multivariatnih metod s poudarkom na vplivu nadpovprečno mokrega leta. *Acta Hydrotechnica* 27, 103–117.
- Bezak, N., Mikoš, M., Arbanas, Ž., 2022. Evaluation of hydrological rainfall loss methods using small-scale physical landslide model. V recenziji. *Water*.
- Bezak, N., Peternel, T., Medved, A., Mikoš, M., 2021b. Climate Change Impact Evaluation on the Water Balance of the Koroška Bela Area, NW Slovenia, in: Vilímek, V., Wang, F., Strom, A., Sassa, K., Bobrowsky, P.T., Takara, K. (Eds.), *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk. ICL Contribution to Landslide Disaster Risk Reduction*. Springer, Cham., pp. 221–228.

- Bezak, N., Šraj, M., Mikoš, M., 2017. Vpliv padavin na projektne pretoke. *Gradb. Vestn.* 66, 241–248.
- Blöschl, G., Bierkens, M.F.P., Chambel, A., Cudennec, C., Destouni, G., Fiori, A., Kirchner, J.W., McDonnell, J.J., Savenije, H.H.G., Sivapalan, M., Stumpp, C., Toth, E., Volpi, E., Carr, G., Lupton, C., Salinas, J., Széles, B., Viglione, A., Aksoy, H., Allen, S.T., Amin, A., Andréassian, V., Arheimer, B., Aryal, S.K., Baker, V., Bardsley, E., Barendrecht, M.H., Bartosova, A., Batelaan, O., Berghuijs, W.R., Beven, K., Blume, T., Bogaard, T., Borges de Amorim, P., Böttcher, M.E., Boulet, G., Breinl, K., Brilly, M., Brocca, L., Buytaert, W., Castellarin, A., Castelletti, A., Chen, X., Chen, Yangbo, Chen, Yuanfang, Chiffard, P., Claps, P., Clark, M.P., Collins, A.L., Croke, B., Dathe, A., David, P.C., de Barros, F.P.J., de Rooij, G., Di Baldassarre, G., Driscoll, J.M., Duethmann, D., Dwivedi, R., Eris, E., Farmer, W.H., Feicabrino, J., Ferguson, G., Ferrari, E., Ferraris, S., Fersch, B., Finger, D., Foglia, L., Fowler, K., Gartsman, B., Gascoin, S., Gaume, E., Gelfan, A., Geris, J., Gharari, S., Gleeson, T., Glendell, M., Gonzalez Bevacqua, A., González-Dugo, M.P., Grimaldi, S., Gupta, A.B., Guse, B., Han, D., Hannah, D., Harpold, A., Haun, S., Heal, K., Helfricht, K., Herrnegger, M., Hipsey, M., Hlaváčiková, H., Hohmann, C., Holko, L., Hopkinson, C., Hrachowitz, M., Illangasekare, T.H., Inam, A., Innocente, C., Istanbuloglu, E., Jarihani, B., Kalantari, Z., Kalvans, A., Khanal, S., Khatami, S., Kiesel, J., Kirkby, M., Knoben, W., Kochanek, K., Kohnová, S., Kolechkina, A., Krause, S., Kreamer, D., Kreibich, H., Kunstmann, H., Lange, H., Liberato, M.L.R., Lindquist, E., Link, T., Liu, J., Loucks, D.P., Luce, C., Mahé, G., Makarieva, O., Malard, J., Mashtayeva, S., Maskey, S., Mas-Pla, J., Mavrova-Guirguinova, M., Mazzoleni, M., Mernild, S., Misstear, B.D., Montanari, A., Müller-Thomy, H., Nabizadeh, A., Nardi, F., Neale, C., Nesterova, N., Nurtaev, B., Odongo, V.O., Panda, S., Pande, S., Pang, Z., Papacharalampous, G., Perrin, C., Pfister, L., Pimentel, R., Polo, M.J., Post, D., Prieto Sierra, C., Ramos, M.H., Renner, M., Reynolds, J.E., Ridolfi, E., Rigon, R., Riva, M., Robertson, D.E., Rosso, R., Roy, T., Sá, J.H.M., Salvadori, G., Sandells, M., Schaeffli, B., Schumann, A., Scolobig, A., Seibert, J., Servat, E., Shafiei, M., Sharma, A., Sidibe, M., Sidle, R.C., Skaugen, T., Smith, H., Spiessl, S.M., Stein, L., Steinsland, I., Strasser, U., Su, B., Szolgay, J., Tarboton, D., Tauro, F., Thirel, G., Tian, F., Tong, R., Tussupova, K., Tyrallis, H., Uijlenhoet, R., van Beek, R., van der Ent, R.J., van der Ploeg, M., Van Loon, A.F., van Meerveld, I., van Nooijen, R., van Oel, P.R., Vidal, J.P., von Freyberg, J., Vorogushyn, S., Wachniew, P., Wade, A.J., Ward, P., Westerberg, I.K., White, C., Wood, E.F., Woods, R., Xu, Z., Yilmaz, K.K., Zhang, Y., 2019a. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH)—a community perspective. *Hydrol. Sci. J.* 64, 1141–1158. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507>
- Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A., Perdigão, R.A.P., Parajka, J., Merz, B., Lun, D., Arheimer, B., Aronica, G.T., Bilibashi, A., Boháč, M., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G.B., Claps, P., Frolova, N., Ganora, D., Gorbachova, L., Gül, A., Hannaford, J., Harrigan, S., Kireeva, M., Kiss, A., Kjeldsen, T.R., Kohnová, S., Koskela, J.J., Ledvinka, O., Macdonald,

- N., Mavrova-Guirguinova, M., Mediero, L., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Murphy, C., Osuch, M., Ovcharuk, V., Radevski, I., Salinas, J.L., Sauquet, E., Šraj, M., Szolgay, J., Volpi, E., Wilson, D., Zaimi, K., Živković, N., 2019b. Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature* 573, 108–111. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>
- Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A., Savenije, H., 2013. Runoff prediction in ungauged basins: Synthesis across processes, places and scales, *Runoff Prediction in Ungauged Basins: Synthesis Across Processes, Places and Scales*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139235761>
- Brilly, M., Šraj, M., 2019. Modeliranje površinskega odtoka. Učno gradivo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Brilly, M., Šraj, M., Bezak, N., Vidmar, A., Rusjan, S., Kryžanowski, A., Horvat, A., Štravs, L., Schnabl, S., 2015. Analiza poplav z uporabo Copula funkcij : zaključno poročilo raziskovalnega projekta ARRS J2-4096. Ljubljana, UL FGG.
- Brunner, M., Viviroli, D., Sikorska, A.E., Vannier, O., Favre, A.C., Seibert, J., 2017. Flood type specific construction of synthetic design hydrographs. *Water Resour. Manag.* 53, 1390–1406. <https://doi.org/10.1002/2016WR019535>
- Brunner, M.I., Seibert, J., Favre, A.C., 2016. Bivariate return periods and their importance for flood peak and volume estimation. *Wiley Interdiscip. Rev. Water* 3, 819–833. <https://doi.org/10.1002/wat2.1173>
- Center for Ecology and Hydrology, 2013a. Review of applied-statistical methods for flood-frequency analysis in Europe. WG2: Assessment of statistical methods for flood frequency estimation. Centre for Ecology and Hydrology, UK.
- Center for Ecology and Hydrology, 2013b. A review of applied methods in Europe for flood-frequency analysis in a changing environment. WG4: Flood frequency estimation methods and environmental change. Centre for Ecology and Hydrology, UK.
- Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C., Andréassian, V., 2017. The suite of lumped GR hydrological models in an R package. *Environ. Model. Softw.* 94, 166–171. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.05.002>
- Dirnbek, L., Šraj, M., 2010. Hidrološko modeliranje: vpliv histograma padavin na hidrogram površinskega odtoka. *Gradb. Vestn.* 59, 48–56.
- Dolšak, D., 2015. Algoritem za analizo časovne porazdelitve padavin znotraj padavinskega dogodka. Magistrska naloga. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
- Dolšak, D., Bezak, N., Šraj, M., 2016. Temporal characteristics of rainfall events under three climate types in Slovenia. *J. Hydrol.* 541, 1395–1405. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.047>
- Dolšak, D., Bezak, N., Šraj, M., 2015. Pomembnost poznavanja časovne porazdelitve padavin znotraj padavinskega dogodka v vodarski praksi. *Gradb. Vestn.* 64, 231–238.

- Donevska, J., 2022. Analysis of uncertainties in the process of flood hazard maps elaboration. Master thesis. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
- DWA, 2012. Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. Merkblatt DWA-M 552.
- Eckhardt, K., 2005. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrol. Process.* 19, 507–515. <https://doi.org/10.1002/hyp.5675>
- England, J.F., Cohn, T.A., Faber, B.A., Stedinger, J.R., Thomas, W.O., Veilleux, A.G., Kiang, J.E., Mason, R.R., 2019. Guidelines for determining flood flow frequency-Bulletin 17C, Techniques and Methods, book 4, chap. B5. USGS.
- Gądek, W., Baziak, B., Tokarczyk, T., Szalińska, W., 2022. A Novel Method of Design Flood Hydrographs Estimation for Flood Hazard Mapping. *Water* 14, 1856. <https://doi.org/10.3390/w14121856>
- Grimaldi, S., Petroselli, A., 2015. Do we still need the Rational Formula? An alternative empirical procedure for peak discharge estimation in small and ungauged basins. *Hydrol. Sci. J.* 60, 67–77. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.880546>
- Grimaldi, S., Petroselli, A., Serinaldi, F., 2012. Design hydrograph estimation in small and ungauged watersheds: Continuous simulation method versus event-based approach. *Hydrol. Process.* 26, 3124–3134. <https://doi.org/10.1002/hyp.8384>
- Haberlandt, U., Radtke, I., 2014. Hydrological model calibration for derived flood frequency analysis using stochastic rainfall and probability distributions of peak flows. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 353–365. <https://doi.org/10.5194/hess-18-353-2014>
- Heco, D., 2015. Določanje parametra CN za manjše porečje. Diplomaska naloga. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
- Horvat, A., 2014. Primerjava metod izločanja baznega odtoka in analiza visokovodnih valov v Sloveniji. Diplomaska naloga. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
- Houghton-Carr, H., 2008. Restatement and application of the Flood Studies Report rainfall-runoff method. Volume 4, in: *Flood Estimation Handbook*. Centre for Ecology and Hydrology, UK, p. 288.
- Hrachowitz, M., Savenije, H.H.G., Blöschl, G., McDonnell, J.J., Sivapalan, M., Pomeroy, J.W., Arheimer, B., Blume, T., Clark, M.P., Ehret, U., Fenicia, F., Freer, J.E., Gelfan, A., Gupta, H. V., Hughes, D.A., Hut, R.W., Montanari, A., Pande, S., Tetzlaff, D., Troch, P.A., Uhlenbrook, S., Wagener, T., Winsemius, H.C., Woods, R.A., Zehe, E., Cudennec, C., 2013. A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)-a review. *Hydrol. Sci. J.* 58, 1198–1255. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.803183>
- Huff, F.A., 1967. Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resour. Res.* 3, 1007–1019. <https://doi.org/10.1029/WR003i004p01007>
- IAHS, 2012. Predictions in Ungauged Basins (PUB) [WWW Document].

- Jurček, T., 2016. Izračun odtoka s povirnega dela Gradaščice. Diplomaska naloga. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
- Koutsoyiannis, D., 2007. A Critical Review of Probability of Extreme Rainfall: Principle and Models, in: Ashley, R., Garvin, S., Pasche, E., Vassilopoulos, A., Zevenbergen, C. (Eds.), *Advances in Urban Flood Management*. Taylor & Francis, London, pp. 139–166. <https://doi.org/10.1201/9780203945988.ch7>
- Kučić, K., 2007. Metoda momentov pri verjetnostni analizi visokih vod. Diplomaska naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
- Lacko, M., Potočki, K., Škreb, K.A., Bezak, N., 2022. Joint Modelling of Flood Hydrograph Peak , Volume and River in Croatia , Europe.
- Lavtar, K., Bezak, N., Šraj, M., 2020. Rainfall-runoff modeling of the nested non-homogeneous sava river sub-catchments in Slovenia. *Water (Switzerland)* 12. <https://doi.org/10.3390/w12010128>
- Mathevet, T., 2005. Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire ? Développement empirique et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. GREF - Cemagref (Antony), Paris, France.
- Mavri, D., 2022. Predlog razvoja enačbe za določitev sintetičnega hidrograma enote na podlagi podatkov z območja Slovenije. Diplomaska naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Mavri, D., Šraj, M., Bezak, N., 2023. Razvoj enačbe za oceno časa zakasnitve za slovenska porečja = Lag time equation development for Slovenian catchments. *Gradb. Vestn.* 72, 34–41.
- Mediero, L., Jiménez-Álvarez, A., Garrote, L., 2010. Design flood hydrographs from the relationship between flood peak and volume. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 2495–2505. <https://doi.org/10.5194/hess-14-2495-2010>
- Merz, R., Blöschl, G., 2008. Flood frequency hydrology: 1. Temporal, spatial, and causal expansion of information. *Water Resour. Res.* 44, 1–17. <https://doi.org/10.1029/2007WR006744>
- Mešl, M., 2018. Izračun površinskega odtoka z zgornjega dela porečja Dravinje. Diplomaska naloga. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
- Mikoš, M., 2020. Poplavna nevarnost v Sloveniji in ocena ekstremnih projektnih poplavnih pretokov. *Acta hydrotechnica* 33, 43–59. <https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2020.04>
- Mikoš, M., Kranjc, A., Matičič, B., Müller, J., Rakovec, J., Roš, M., Brilly, M., 2002. Hidrološko izrazje = Terminology in Hydrology. *Acta hydrotechnica* 20, 3–325.
- Montanari, A., Young, G., Savenije, H.H.G., Hughes, D., Wagener, T., Ren, L.L., Koutsoyiannis, D., Cudennec, C., Toth, E., Grimaldi, S., Blöschl, G., Sivapalan, M., Beven, K., Gupta, H., Hipsey, M., Schaeffli, B., Arheimer, B., Boegh, E., Schymanski, S.J., Di Baldassarre, G., Yu, B., Hubert, P., Huang, Y., Schumann, A., Post, D.A., Srinivasan, V., Harman, C., Thompson, S., Rogger, M., Viglione, A., McMillan, H., Characklis, G., Pang, Z., Belyaev, V., 2013. “Panta Rhei-Everything

- Flows”: Change in hydrology and society-The IAHS Scientific Decade 2013-2022. *Hydrol. Sci. J.* 58, 1256–1275. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.809088>
- Mudashiru, R.B., Sabtu, N., Abustan, I., Balogun, W., 2021. Flood hazard mapping methods: A review. *J. Hydrol.* 603, 126846. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126846>
- Nathan, R.J., McMahon, T.A., 1990. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resour. Res.* 26, 1465–1473. <https://doi.org/10.1029/WR026i007p01465>
- Oblak, J., Kobold, M., Šraj, M., 2021. The influence of climate change on discharge fluctuations in Slovenian rivers. *Acta Geogr. Slov.* 61, 155–169. <https://doi.org/10.3986/AGS.9942>
- Pan, X., Rahman, A., Haddad, K., Ouarda, T.B.M.J., 2022. Peaks-over-threshold model in flood frequency analysis: a scoping review. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 6. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02174-6>
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.* 279, 275–289. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7)
- Petroselli, A., Grimaldi, S., 2018. Design hydrograph estimation in small and fully ungauged basins: a preliminary assessment of the EBA4SUB framework. *J. Flood Risk Manag.* 11, S197–S210. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12193>
- Piry, M., 2020. Analiza projektnih pretokov z upoštevanjem negotovosti. Magistrska naloga. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
- Poljansek, K., Casajus Valles, A., Marin Ferrer, M., Artes Vivancos, T., Boca, R., Bonadonna, C., Branco, A., Campanharo, W., De Jager, A., De Rigo, D., Dottori, F., Durrant, T., Estreguil, C., Ferrari, D., Frischknecht, C., Galbusera, L., Garcia Puerta, B., Giannopoulos, G., Girgin, S., Gowland, R., Grecchi, R., Hernandez Ceballos, M.A., Iurlaro, G., Kampourakis, G., Karlos, V., Krausmann, E., Larcher, M., Lequarre, A.S., Liberta, G., Loughlin, S.C., Maianti, P., Mangione, D., Marques, A., Menoni, S., Montero Prieto, M., Naumann, G., Necci, A., Jacome Felix Oom, D., Pfeiffer, H., Robuchon, M., Salamon, P., Sangiorgi, M., San-Miguel-Ayanz, J., Raposo De M. Do N. E S. De Sotto Mayor, M.L., Theocharidou, M., Theodoridis, G., Trueba Alonso, C., Tsionis, G., Vogt, J., Wood, M., 2019. Recommendations for National Risk Assessment for Disaster Risk Management in EU, EUR 29557 EN, EUR 29557 EN. Publications Office of the European Union, Luxembourg. <https://doi.org/10.2760/084707>
- R Core Team, 2018. R: A language and environment for statistical computing.
- Reed, D., 2008. Overview. Volume 1, in: *Flood Estimation Handbook*. Centre for Ecology and Hydrology, UK, p. 108.
- Robson, A., Reed, D., 2008. Statistical Procedures for flood frequency estimation. Volume 3, in: *Flood Estimation Handbook*. Centre for Ecology and Hydrology, UK, p. 338.
- Rogger, M., Kohl, B., Pirkl, H., Viglione, A., Komma, J., Kirnbauer, R., Merz, R., Blöschl, G., 2012. Runoff models and flood frequency statistics for design flood estimation in Austria - Do they tell

- a consistent story? *J. Hydrol.* 456–457, 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.068>
- Sapač, K., Medved, A., Rusjan, S., Bezak, N., 2019. Investigation of Low- and High-Flow Characteristics of Karst Catchments under Climate Change. *Water* 11, 925. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w11050925>
- Serwinska, A., 2022. The use of the rainfall compound analysis in the process of the design discharge estimation in Slovenia. Master thesis. University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering.
- Sezen, C., Bezak, N., Bai, Y., Mojca, Š., 2019. Hydrological modelling of karst catchment using lumped conceptual and data mining models. *J. Hydrol.* 576, 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.036>
- Sezen, C., Bezak, N., Šraj, M., 2018. Hydrological modelling of the karst Ljubljana river catchment using lumped conceptual model. *Acta Hydrotechnica* 31, 87–100. <https://doi.org/https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2018.06>
- Sezen, C., Šraj, M., Medved, A., Bezak, N., 2020. Investigation of rain-on-snow floods under climate change. *Appl. Sci.* 10. <https://doi.org/10.3390/app10041242>
- Sodnik, J., Mikoš, M., 2010. Modeling of a debris flow from the Hrenovec torrential watershed above the village of Kropa | Modeliranje drobirskega toka v hudourniškem območju Hrenovec nad Kropo. *Acta Geogr. Slov.* 50, 59–84. <https://doi.org/10.3986/AGS50103>
- Šraj, M., Bezak, N., 2020. Comparison of time trend- and precipitation-informed models for assessing design discharges in variable climate. *J. Hydrol.* 589. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125374>
- Šraj, M., Bezak, N., Brilly, M., 2015. Bivariate flood frequency analysis using the copula function: A case study of the Litija station on the Sava River. *Hydrol. Process.* 29, 225–238. <https://doi.org/10.1002/hyp.10145>
- Šraj, M., Bezak, N., Brilly, M., 2013. Primerjava med klasičnimi univariatnimi verjetnostnimi analizami in bivariatnimi z uporabo funkcije kopula. *Acta Hydrotechnica* 26, 37–48.
- Šraj, M., Bezak, N., Brilly, M., 2012. Vpliv izbire metode na rezultate verjetnostnih analiz konic, volumnov in trajanj visokovodnih valov Save v Litiji / The influence of the choice of method on the results of frequency analysis of peaks, volumes and durations of flood waves of the Sava River. *Acta Hydrotechnica* 25, 41–58.
- Šraj, M., Dirnbek, L., Brilly, M., 2010. The influence of effective rainfall on modeled runoff hydrograph. *J. Hydrol. Hydromechanics* 58, 3–14. <https://doi.org/10.2478/v10098-010-0001-5>
- Šraj, M., Viglione, A., Parajka, J., Bloeschl, G., 2016. The influence of non-stationarity in extreme hydrological events on flood frequency estimation. *J. Hydrol. Hydromechanics* 64, 426–437. <https://doi.org/10.1515/johh-2016-0032>
- Stanjko, S., 2015. Izračun odtoka z manjšega porečja. Diplomsko naloga. Fakulteta za gradbeništvo in

geodezijo, Ljubljana.

UK Environment Agency, 2020. Flood Estimation Guidelines.

UL BF, 2011. Trajnostna raba vode za krepitev rastlinskega pridelovalnega potenciala v Sloveniji.

Projekt V4-1066. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta.

UL FGG, 2022. Hidrološka analiza pritokov reke Save na območju Državnega prostorskega načrta za HE Renke, HE Trbovlje in HE Suhadol.

Viessman, W., Lewis, G.L., 2003. Introduction to Hydrology, 5th ed. Prantice Hall, New Jersey.

WMO, 2008. Manual on Low-flow Estimation and Prediction, Operational Hydrology Report. WMO, Geneva, Switzerland.

Yue, S., Ouara, T.B.M.J., Bobée, B., Legendre, P., Bruneau, P., 2002. Approach for Describing Statistical Properties of Flood Hydrograph. J. Hydrol. Eng. 7, 147–153.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(2002\)7:2\(147\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(2002)7:2(147))

Priloga 1: Interpolirane karte Huffovih krivulj

