

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Menih, M., 2014. Analiza vpliva izbranega obdobja meritev na rezultate verjetnostnih analiz visokovodnih konic. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Šraj, M.): 58 str.

Datum arhiviranja: 21-10-2014

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



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

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

This is original version of final thesis.

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

Menih, M., 2014. Analiza vpliva izbranega obdobja meritev na rezultate verjetnostnih analiz visokovodnih konic. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Šraj, M.): 58 pp.

Archiving Date: 21-10-2014

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
VODARSTVA IN
OKOLJSKEGA INŽENIRSTVA

Kandidat:

MATEVŽ MENIH

**ANALIZA VPLIVA IZBRANEGA OBDOBJA MERITEV
NA REZULTATE VERJETNOSTNIH ANALIZ
VISOKOVODNIH KONIC**

Diplomska naloga št.: 21/B-VOI

**ANALYSIS OF THE IMPACT OF THE SELECTED
MEASUREMENT PERIOD ON THE RESULTS OF
FLOOD FREQUENCY ANALYSES**

Graduation thesis No.: 21/B-VOI

Mentorica:
doc. dr. Mojca Šraj

Predsednik komisije:
doc. dr. Mojca Šraj

Ljubljana, 10. 07. 2014

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Matevž Menih izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »**Analiza vpliva izbranega obdobja meritev na verjetnostne analize visokovodnih konic**«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, julij 2014

Matevž Menih

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 519.2:556.166(497.4)(043.2)
Avtor: Matevž Menih
Mentor: doc. dr. Mojca Šraj
Naslov: Analiza vpliva izbranega obdobja meritev na rezultate verjetnostnih analiz visokovodnih konic
Tip dokumenta: Diplomsko delo - tip UNI
Obseg in oprema: 58 str., 20 pregl., 30 sl.
Ključne besede: Metoda letnih maksimumov, metoda L-momentov, verjetnostna analiza visokih vod, Mann-Kendall test

Izvleček

Poplave so naraven in izredno dinamičen pojav. V Sloveniji se pojavljajo kot posledica intenzivnih padavin in taljenja snega ali kombinacije obojega. Za učinkovito zaščito pred poplavami je zelo pomembna kvalitetna in zanesljiva izvedba verjetnostnih analiz, saj poplave povzročajo ogromno škodo in lahko ogrožajo tudi človeška življenja.

V nalogi so verjetnostne analize visokih vod narejene na vzorcih letnih maksimumov. Metoda letnih maksimumov se v praksi uporablja najpogosteje. Predstavljene so različne teoretične porazdelitve in metoda momentov L za oceno njihovih parametrov. Opisanih je tudi nekaj statističnih testov, ki se uporabljajo za določitev najustreznejše porazdelitve. Predstavljen je tudi statistični Mann-Kendallov test za ugotavljanje trendov.

V praktičnem delu naloge so za vodomerne postaje Slovenije narejene verjetnostne analize visokovodnih konic za različna 30-letna obdobja meritev. Pri verjetnostnih analizah je uporabljenih šest najpogosteje uporabljenih porazdelitvenih funkcij in narejena ocena parametrov po metodi momentov L. Z uporabo različnih testov smo za vsako postajo in obdobje izbrali porazdelitev, ki se najbolj prilega merjenim podatkom. Primerjali smo projektne pretoke izbranih povratnih dob med obdobjema 1961-1990 in 1981-2010 ter ugotovili, da lahko izbrano obdobje meritev pomembno vpliva na rezultate verjetnostnih analiz oz. da ima spremenljivost podnebja pomemben vpliv tudi na projektne pretoke večine vodomernih postaj v Sloveniji.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 519.2:556.166(497.4)(043.2)
Author: Matevž Menih
Supervisor: Assist. Prof. Mojca Šraj, PhD.
Title: Analysis of the impact of the selected measurement period on the results of flood frequency analyses
Document type: Graduation Thesis – University studies
Scope and tools: 58 p., 20 tab., 30 fig.
Keywords: Annual maximum series method, method of L-moments, flood frequency analysis, flow, Mann-Kendall test.

Abstract

Floods are a natural and a very dynamic phenomena. In Slovenia they may occur due to intense rainfall, snowmelt or a combination of both. Quality and reliable flood frequency analyses are necessary for effective flood protection, as floods caused extensive damage and can also threaten human lives.

In the thesis flood frequency analyses were carried out with annual maximum series method which is most often used in practice. Different theoretical distributions are presented and the method of L-moments for parameters estimation. Some statistical tests used to determine the most appropriate distribution are described. A statistical Mann-Kendall test for determining trends is also presented.

In the practical part of the thesis flood frequency analyses for different 30-year periods of measurements for gauging station Slovenia are made. Six most commonly used distribution functions were used and parameters were estimated with the method of L-moments. Different tests were used to select the best fitting distribution for each measuring period and station. We compared the design flow of the selected return periods between the periods 1961-1990 and 1981-2010 and found that the selected measurement period has a significant impact on the results of the flood frequency analyses or in other words that climate variability has a significant impact on the design flow of the majority of gauging stations in Slovenia.

ZAHVALA

Za pomoč pri izdelavi diplomske naloge se iskreno zahvaljujem svoji mentorici doc. dr. Mojci Šraj za njeno strokovno pomoč in veliko njenega časa ter Nejcju Bezaku za pomoč pri praktičnem delu.

Posebno bi se rad zahvalil svoji družini, ki mi je omogočila študij in me podpirala ter spodbujala v času študija in vsem prijateljem, ki so mi ta čas stali ob strani.

KAZALO PREGLEDNIC	VIII
KAZALO SLIK	X
1 UVOD	1
1.1 Cilj diplomske naloge	2
2 VERJETNOSTNA ANALIZA VISOKOVODNIH KONIC	4
2.1 Teorija verjetnosti in osnovni pojmi statistike	4
2.2 Verjetnostna analiza visokih vod	5
3 METODA LETNIH MAKSIMUMOV	6
3.1 Metode ocenjevanja parametrov porazdelitve	6
3.1.1 Metoda momentov L	6
3.2 Generalizirana logistična (GL) porazdelitev	7
3.2.1 Ocena parametrov po metodi momentov L	9
3.3 Generalizirana porazdelitev ekstremnih vrednosti (GEV)	10
3.3.1 Ocena parametrov po metodi momentov L	11
3.4 Gumbelova porazdelitev	11
3.4.1 Ocena parametrov po metodi momentov L	11
3.5 Logaritemsko normalna porazdelitev	12
3.5.1 Ocena parametrov po metodi momentov L	12
3.6 Pearsonova III porazdelitev	12
3.6.1 Ocena parametrov po metodi momentov L	13
3.7 Logaritemsko Pearsonova III porazdelitev	13
3.7.1 Ocena parametrov po metodi momentov L	14
4 TESTI	14
4.1 Testi ustreznosti porazdelitve	14
4.1.1 Test RMSE	14
4.1.2 Test MAE	15
4.1.3 Test MSE	15
4.1.4 Koeficient korelacije	16
4.2 Mann-Kendallov statistični test trenda	16
4.3 Testiranje hipotez (domnev)	17

5 PRIMER VERJETNOSTNE ANALIZE VISOKOVODNIH KONIC NA VODOMERNI POSTAJI NAZARJE NA REKI SAVINJI.....	19
5.1 Vhodni podatki	19
5.2 Program R	23
5.2.1 Opis programa	23
5.3 Verjetnostna analiza z metodo letnih maksimumov	24
5.3.1 Rezultati verjetnostne analize za posamezna obdobja	25
5.3.1.1 Obdobje 1931-1960.....	25
5.3.1.2 Obdobje 1941-1970.....	27
5.3.1.3 Obdobje 1951-1980.....	28
5.3.1.4 Obdobje 1961-1990.....	29
5.3.1.5 Obdobje 1971-2000.....	30
5.3.1.6 Obdobje 1981-2010.....	31
5.3.2 Rezultati verjetnostne analize za celotno obdobje	33
6 VERJETNOSTNA ANALIZA VISOKOVODNIH KONIC NA VODOMERNIH POSTAJAH SLOVENIJE	39
6.1 Vhodni podatki	39
6.2 Mann-Kendallov statistični test trenda	43
6.3 Rezultati verjetnostnih analiz visokovodnih konic za posamezna 30-letna obdobja na vodomernih postajah Slovenije.....	47
7 ANALIZA IN PRIMERJAVA REZULTATOV	50
7.1 Analiza in primerjava rezultatov verjetnostnih analiz za vodomerno postajo Nazarje na reki Savinji	50
7.2 Analiza in primerjava rezultatov verjetnostnih analiz za vodomerne postaje Slovenije.....	51
8 ZAKLJUČKI.....	54
VIRI.....	56

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Lastnosti vodomerne postaje Nazarje na Savinji (6060).....	19
Preglednica 2: Letni maksimumi na vodomerni postaji Nazarje od leta 1931 do leta 2012 (Agencija RS za okolje, 2014)	25
Preglednica 3: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1931-1960	26
Preglednica 4: Prikaz rezultatov testov za obdobje 1931-1960.....	26
Preglednica 5: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1941-1970	27
Preglednica 6: Prikaz rezultatov testov za obdobje 1941-1970.....	27
Preglednica 7: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1951-1980	28
Preglednica 8: Prikaz rezultatov testov za obdobje 1951-1980.....	29
Preglednica 9: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1961-1990	29
Preglednica 10: Prikaz rezultatov testov za obdobje 1961-1990.....	30
Preglednica 11: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1971-2000	30
Preglednica 12: Prikaz rezultatov testov za obdobje 1971-2000.....	31
Preglednica 13: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1981-2010.	32
Preglednica 14: Prikaz rezultatov testov za obdobje 1981-2010.....	32
Preglednica 15: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za celotno obdobje celotnega obdobja	33
Preglednica 16: Vodomerne postaje, ki so vključene v analizo	41
Preglednica 17: Prikaz rezultatov Mann-Kendallovega testa za obravnavane vodomerne postaje	43
Preglednica 18: Rezultati verjetnostne analize obravnavanih vodomernih postaj za določene povratne dobe.....	47

Preglednica 19: Primerjava projektni pretoki izbranih povratnih dob vseh 30-letnih obdobj vodomerne postaje Nazarje na reki Savinji	50
Preglednica 20: Analiza trendov projektnih pretokov izbranih povratnih dob obravnavanih vodomernih postaj	51

KAZALO SLIK

Slika 1: Opozorilna karta poplav (IzVRS, 2012).....	2
Slika 2: Gostota verjetnosti porazdelitve GL za različne vrednosti parametrov (Bezak, 2012)	8
Slika 3: Porazdelitvena funkcija porazdelitve GL za različne vrednosti parametrov (Bezak, 2012)	9
Slika 4: Gostota verjetnosti GEV porazdelitve za različne kombinacije parametrov (Bezak, 2012)	10
Slika 5: Mreža vodomernih postaj (Agencija RS za okolje, 2012).....	20
Slika 6: Lokacija vodomerne postaje Nazarje (Geopedia, 2013)	20
Slika 7: Vodomerna postaja Nazarje.....	21
Slika 8: Vodomerna letev na vodomerni postaji.....	22
Slika 9: Tablica na vodomerni letvi, ki prikazuje do sedaj najvišjo izmerjeno gladino.....	23
Slika 10: Program R Studio.....	24
Slika 11: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1931-1960.....	26
Slika 12: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1941-1970.....	27
Slika 13: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1951-1980.....	28
Slika 14: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1961-1990.....	30
Slika 15: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1971-2000.....	31
Slika 16: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1981-2010.....	32
Slika 17: Prikaz rezultatov verjetnostne analize za celotno obdobje meritev	33
Slika 18: Prikaz rezultatov verjetnostne analize za Gumbelovo porazdelitev za posamezna obdobja ..	34
Slika 19: Prikaz rezultatov verjetnostne analize za Pearsonovo III porazdelitev za posamezna obdobja	34
Slika 20: Prikaz rezultatov verjetnostne analize za porazdelitev GEV za posamezna obdobja	35

Slika 21: Prikaz rezultatov verjetnostne analize za porazdelitev GL za posamezna obdobja	35
Slika 22: Prikaz rezultatov verjetnostne analize za logaritemsko normalno porazdelitev za posamezna obdobja	36
Slika 23: Prikaz rezultatov verjetnostne analize za logaritemsko Pearsonovo III porazdelitev za posamezna obdobja	36
Slika 24: Rezultati verjetnostnih analiz posameznih obdobj za 10-letno povratno dobo in posamezne porazdelitve	37
Slika 25: Rezultati verjetnostnih analiz posameznih obdobj za 100-letno povratno dobo in posamezne porazdelitve	37
Slika 26: Rezultati verjetnostnih analiz posameznih obdobj za 500-letno povratno dobo in posamezne porazdelitve	38
Slika 27: Mreža vodomernih postaj z označenimi postajami, ki so vključene v analizo	40
Slika 28: Prikaz rezultatov Mann-Kendallovega testa trendov.....	46
Slika 29: Prikaz spreminjanja projektnih pretokov izbranih povratnih dob skozi 30-letna obdobja meritev.....	50
Slika 30: Prikaz trendov projektnih pretokov izbranih povratnih dob obravnavanih vodomernih postaj	53

Ta stran je namenoma prazna.

1 UVOD

Hidrologija kot znanost se ukvarja z vodo. Preučuje gibanje vode, njene lastnosti ter kroženje vode na kopnem. Je ena najstarejših znanosti, saj jo zasledimo že pri prvih znanih civilizacijah. V razvoju znanosti pa so vsekakor nujne meritve. V slovenskem prostoru so bile prve stalne vodomerne postaje postavljene že pred več kot 150 leti (Brilly in Šraj, 2005).

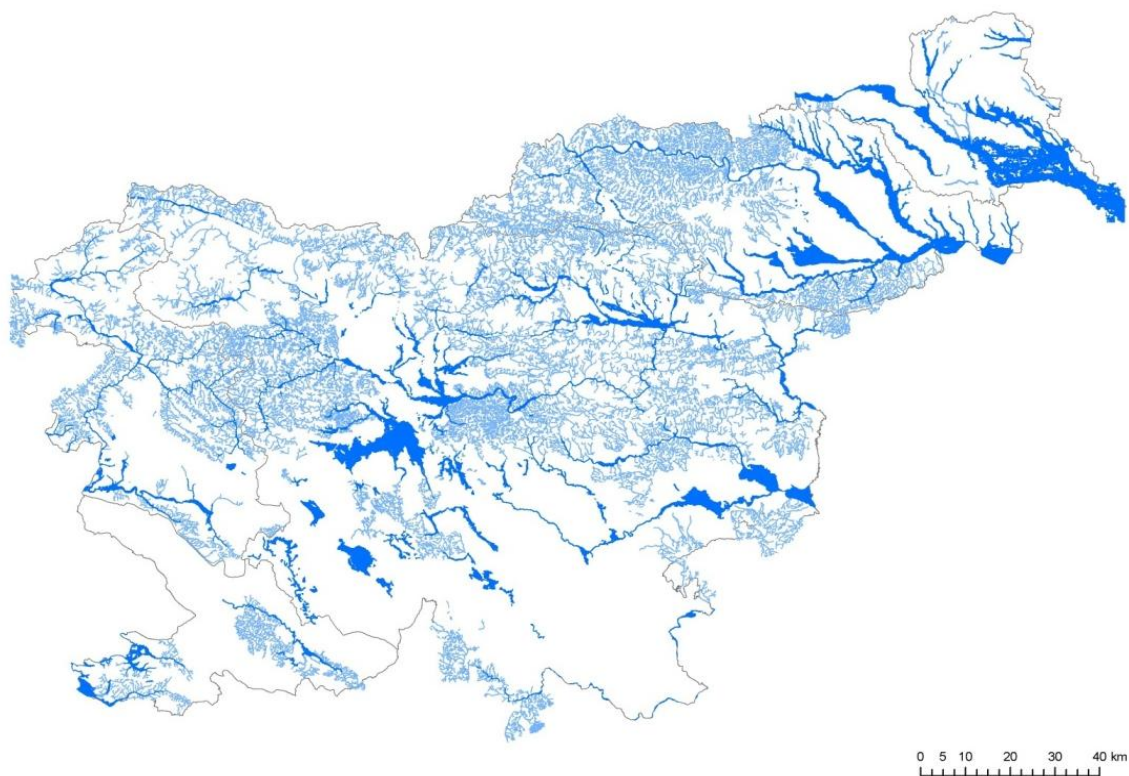
Poplave so običajno naraven, redek in izredno dinamičen pojav. V Sloveniji je njihov nastanek povezan z močnimi ali dolgo trajajočimi padavinami in taljenjem snega oziroma kombinacijo obojega. Manjše ne povzročijo veliko škode, ko pa pride do večjih poplav imenovanih povodnji pa gre za naravne nesreče, pri katerih je lahko povzročena večja materialna škoda, ki je posledica delovanja človeka in pri katerih lahko pride tudi do človeških žrtev (Brilly et al., 1999).

Ogroženost, ranljivost in nevarnost opredeljujejo varstvo pred vodnimi ujmami. Ogroženost posameznega območja določata ranljivost, ki določa ceno škode, ki je bila povzročena na človeških dejavnostih in nevarnost, katera določa stopnjo verjetnosti pojava poplav in naravne pogoje za le-te. Ker je nastala škoda običajno velikih razsežnosti, popolne zaščite pa ni, lahko z uporabo pravih verjetnostnih analiz veliko pripomoremo k zmanjšanju materialne škode (Brilly et al., 1999).

Cilj zaščite pred poplavami na družbeno sprejemljivo raven je zmanjševanje posledic poplav (Brilly et al., 1999). Ko se visoka gladina vode prelije čez rob struge in se razlije po okolici, pride do pojava preplavljanja. Gladina vode pa upada počasneje, kot se je dvigala (Mikoš et al., 2002).

Poplave ogrožajo okoli 10 % slovenskega ozemlja (slika 1), kar je nekaj več kot 2000 kvadratnih kilometrov površin (Đurovič, 2012).

Soodvisnost med pretokom (Q) in povratno dobo (T) imenujemo verjetnost pojava poplav (Brilly et al., 1999). Povratna doba je interval časa, v katerem bo dogodek dosežen ali presežen (Brilly in Šraj, 2005). Če želimo ugotoviti povezavo med pretokom in povratno dobo (Q - T povezava) je treba najprej izvesti kvalitetne meritve pretoka nato pa lahko preko različnih statističnih metod dobimo povezavo Q - T , ki je za vsako vodomerno postajo svojstvena (Bezák, 2012).



Slika 1: Opozorilna karta poplav (Iz VRS, 2012)

Analize v Sloveniji kažejo, da se ekstremni poplavni dogodki v zadnjih dveh desetletjih pojavljajo pogostejše kot prej, kar bi lahko imelo vpliv tudi na ocenjene projektne pretoke.

Podnebni sistem poleg atmosfere sestavljajo še hidrosfera, kriosfera, biosfera in njihove interakcije. Stanje podnebnega sistema določa zelo kompleksen pojem podnebje (klima). Zemljino podnebje se je vedno spreminjalo. Podnebje se spreminja kot posledica notranje spremenljivosti v samem podnebnem sistemu in zunanjih vplivov. V zgodovini Zemlje je bilo veliko obdobj, ko je bilo mnogo topleje in tudi mnogo hladneje kot danes. Svet je bil prekrit s tropskimi gozdovi ali z ledenimi prostranstvi. Podnebje se je v zgodovini Zemlje vedno spreminjalo brez človeškega vpliva. Trenutni trend segrevanja Zemlje lahko sledimo vsaj 200 let nazaj t.j. od zadnjega zelo hladnega obdobja, imenovanega mala ledena doba. V preteklosti pa so bila obdobja, ko so bile temperature precej višje od današnjih (srednjeveško toplo obdobje, holocenski maksimum) (Durkin, 2007). Podnebna spremenljivost je torej dokazana, vzroki zanjo pa so še vedno velika polemika.

1.1 Cilj diplomske naloge

Cilj diplomske naloge je ugotoviti vpliv podnebne spremenljivosti na projektne pretoke vodomernih postaj v Sloveniji. Zato smo naredili verjetnostne analize visokovodnih konic za različna 30-letna obdobja meritev ter rezultate primerjati med seboj. Kot orodje za izvedbo verjetnostnih analiz smo

uporabili program R. V teoretičnem delu so predstavljene vse uporabljene metode. V praktičnem delu pa so izvedene verjetnostne analize za vse vodomerne postaje v Sloveniji, ki imajo dolžino obdobja meritev pretoka vsaj 50 let. V nalogi so predstavljeni le povzetki vseh rezultatov analiz, natančna analiza pa je predstavljena na primeru vodomerne postaje Nazarje na Savinji.

2 VERJETNOSTNA ANALIZA VISOKOVODNIH KONIC

2.1 Teorija verjetnosti in osnovni pojmi statistike

Za verjetnostne analize uporabljamo verjetnostni račun, ki je osnova statistike. Je veja matematike, ki obravnava dogodke, ki se bolj ali manj verjetno zgodijo. Med osnovne pojme verjetnostnega računa štejemo dogodek, poskus in verjetnost dogodka. Poskus predstavlja splet pojavov. Rezultat tega je dogodek. Pri enakih poskusih lahko dobimo različne dogodke (Turk, 2011). Ker želimo dobiti čim več informacij o nekem pojavu, uporabljamo različne statistike (Brilly in Šraj, 2005).

Teorija verjetnosti je zasnovana na aksiomu, da ima vsak elementarni slučajni dogodek x_i mero verjetnosti p_i z naslednjimi lastnostmi (Brilly in Šraj, 2005):

$$0 < p_i < 1, \quad (1)$$

$$\sum p_i = 1, \quad (2)$$

kjer je $i = 1, 2, \dots, n$.

Porazdelitvena funkcija $F_x(x)$ slučajne spremenljivke X je funkcija, ki ima pri vsakem realnem x vrednost, enako verjetnosti dogodka ($X \leq x$):

$$F_x(x) = P(X \leq x). \quad (3)$$

Verjetnostne spremenljivke so lahko zvezne, diskretne ali mešane.

Primer diskretne spremenljivke je na primer število dni z določeno vrednostjo pretoka v določenem časovnem obdobju. Slučajna spremenljivka X je diskretna, če lahko prevzame eno od vrednosti $x_1, x_2, \dots, x_n$ s pripadajočimi verjetnostmi $p_1, p_2, \dots, p_n$ pri čemer je (Brilly in Šraj, 2005):

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1. \quad (4)$$

Za zvezno spremenljivko je značilno, da zavzema vse vrednosti nekega končnega ali neskončnega intervala. Primer zvezne spremenljivke so lahko maksimalni pretoki reke v nekem časovnem obdobju. Tako za vsak x nekega intervala med a in b velja (Brilly in Šraj, 2005):

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x < X < x + \Delta x)}{\Delta x} = f_x(x), \quad (5)$$

kjer predstavlja $f_x(x)$ gostoto verjetnosti.

V hidrologiji pa se namesto porazdelitvene funkcije pogosteje uporablja izraz povratna doba (T). Zveza med porazdelitveno funkcijo $F_x(x)$ in povratno dobo je določena z naslednjo zvezo (Brilly in Šraj, 2005):

$$F_x(x) = 1 - \frac{1}{T} = T_1. \quad (6)$$

2.2 Verjetnostna analiza visokih vod

Velikost hidrološkega pojava z njegovo pogostostjo povezujejo verjetnostne analize, ki nam omogočajo, da lahko določimo pogostost ekstremnih dogodkov, kot so na primer poplave in ekstremni padavinski dogodki, za povratne dobe, ki so daljše od opazovanega obdobja. Temelj verjetnostnih analiz so tri osnovne predpostavke (Beguería, 2005):

- Za ekstremne dogodke velja, da so slučajne spremenljivke, zato jih lahko opišemo z verjetnostnimi porazdelitvami;
- Obravnavan vzorec je homogen, zato se porazdelitve ne spreminjajo;
- Neodvisnost podatkov.

Za učinkovito planiranje in načrtovanje hidrotehničnih objektov ter razumevanje vodnih procesov so verjetnostne analize nujne. Kot rezultat teh analiz dobimo zvezo med pretokom in povratno dobo. V verjetnostnih analizah so najpogosteje upoštevane visokovodne konice oziroma ekstremne vrednosti. Za metodo letnih maksimumov velja, da vzorec vsebuje največje pretoke v posameznem letu. Tako dobimo v vzorcu toliko elementov kolikor let obravnavamo.

3 METODA LETNIH MAKSIMUMOV

Metoda letnih maksimumov se v hidrologiji uporablja pogosto, ker je enostavno izbrati vzorec, saj vzorec vsebuje toliko elementov, kolikor je obravnavanih let. Elementi v vzorcu predstavljajo maksimalne vrednosti pretokov vsakega leta, zaradi tega ne pride do težav z odvisnostjo posameznih elementov vzorca. Edina slabost te metode je, da lahko pride do neupoštevanja dogodkov, ki sicer niso bili največji v določenem letu, so pa bili dovolj veliki, da bi se jih v analizi moralo upoštevati. Pri metodi letnih maksimumov predstavlja povratna doba povprečni interval časa, v katerem se je zgodil eden ali več dogodkov, ki so večji od izbranega pretoka.

Po mnenju Todoroviča (1978) je metoda letnih maksimumov premalo teoretična in naj bi temeljila na empiričnem postopku, pri katerem se podatki ujemajo z izbrano porazdelitvijo. Poleg tega Todorovič (1978) dodaja, da je postopek pri katerem izberemo porazdelitveno funkcijo, ki se najbolj prilega podatkom brez teoretičnih in fizikalnih osnov.

Za verjetnostno analizo visokovodnih konic z uporabo metode letnih maksimumov se v svetu najpogosteje uporabljajo naslednje teoretične porazdelitve: Gumbelova porazdelitev, porazdelitev GEV, porazdelitev GL, logaritem Pearsonova 3 porazdelitev, Pearsonova 3 porazdelitve in logaritemsko normalna porazdelitev. Za oceno parametrov teoretičnih porazdelitev se lahko uporabljajo tri metode: metoda navadnih momentov, metoda momentov L in metoda največjega verjetja. V nadaljevanju je predstavljena metoda momentov L za ocenjevanje parametrov posameznih porazdelitev, ki je po mnenju mnogih avtorjev najučinkovitejša (Bezák, 2012; Hosking in Wallis, 1997; Sankarasubramanian in Srinivasan, 1999).

3.1 Metode ocenjevanja parametrov porazdelitve

V hidrološki praksi se pri verjetnostnih analizah letnih maksimumov uporabljajo tri metode: metoda momentov, metoda momentov L in metoda največjega verjetja. Izbira metode lahko bistveno vpliva na rezultate verjetnostne analize (Bezák, 2012; Hosking in Wallis, 1997; Sankarasubramanian in Srinivasan, 1999). V nadaljevanju je predstavljena metoda momentov L, ki je bila uporabljena v praktičnem delu naloge.

3.1.1 Metoda momentov L

Metoda momentov L temelji na momentih L, medtem ko gre pri metodi momentov za navadne momente. Metoda je računsko dokaj enostavna in izhaja iz metode verjetnostno obteženih momentov (angl. *Probability weighted moments*) (Hosking in Wallis, 1997). Momenti L so bolj primerni za

uporabo v primeru majhnih vzorcev in so manj občutljivi na osamelce, ki se lahko nahajajo v vzorcu. (Hosking in Wallis, 1997).

Ocene momentov temeljijo na vzorcu velikosti n , ki je razporejen po naraščajočem vrstnem redu. Za eno izmed možnosti določitve parametrov porazdelitve izberemo oceno vrednosti verjetnostno obteženih momentov in zapišemo kot (Hosking in Wallis, 1997):

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j, \\ b_1 &= \frac{1}{n} \sum_{j=2}^n \frac{(j-1)}{(n-1)} x_j, \\ b_2 &= \frac{1}{n} \sum_{j=3}^n \frac{(j-1)(j-2)}{(n-1)(n-2)} x_j, \\ b_3 &= \frac{1}{n} \sum_{j=4}^n \frac{(j-1)(j-2)(j-3)}{(n-1)(n-2)(n-3)} x_j, \end{aligned} \quad (7)$$

kjer je:

n velikost vzorca
 x_j j -ti element vzorca

Zapišemo vrednosti momentov L (Hosking in Wallis, 1997):

$$\begin{aligned} l_1 &= b_0, \\ l_2 &= 2b_1 - b_0, \\ l_3 &= 6b_2 - 6b_1 + b_0, \\ l_4 &= 20b_3 - 30b_2 + 12b_1 - b_0. \end{aligned} \quad (8)$$

Koeficient variacije momentov L, koeficient simetrije momentov L in koeficient sploščenosti momentov L (angl. *L-moment ratios*) lahko uporabimo za oceno parametrov porazdelitve ter jih izračunamo z naslednjimi izrazi (Hosking in Wallis, 1997):

$$\begin{aligned} t_2 &= l_2/l_1 \quad \text{koeficient variacije L,} \\ t_3 &= l_3/l_2 \quad \text{koeficient asimetrije L,} \\ t_4 &= l_4/l_1 \quad \text{koeficient sploščenosti L.} \end{aligned} \quad (9)$$

3.2 Generalizirana logistična (GL) porazdelitev

Porazdelitev GL je troparametrski porazdelitev, katere poseben primer je dvoparametrski logistični porazdelitev in gre za poseben primer štiriparametrski porazdelitve Kappa. Porazdelitvena funkcija je definirana z izrazom (Robson in Reed, 1999):

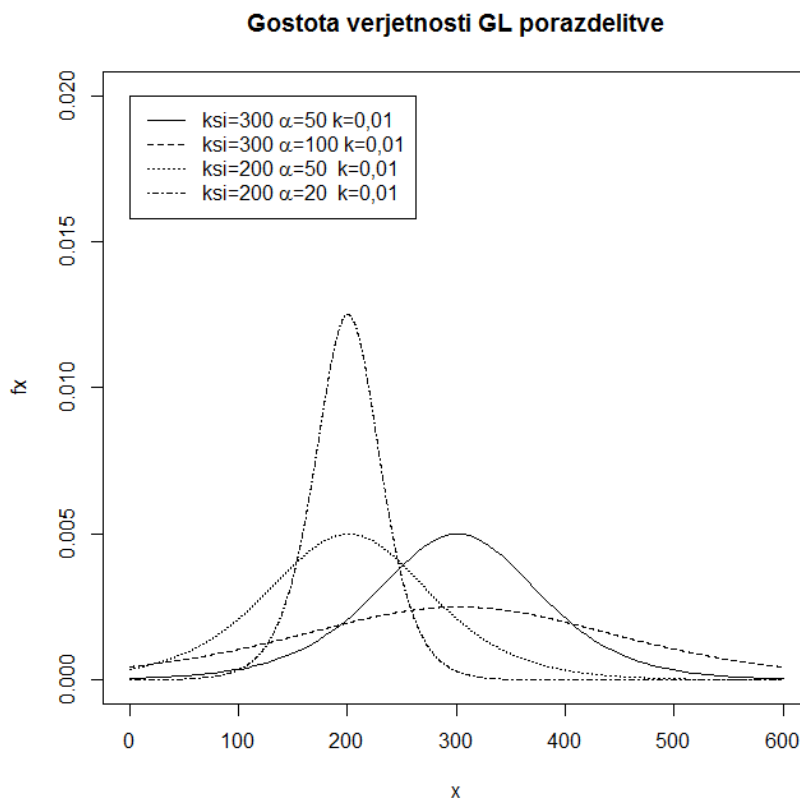
$$F_x(x) = (1 + \{1 - \frac{k}{\alpha} [x - \xi]^{\frac{1}{k}}\})^{-1}, \quad (10)$$

kjer je:

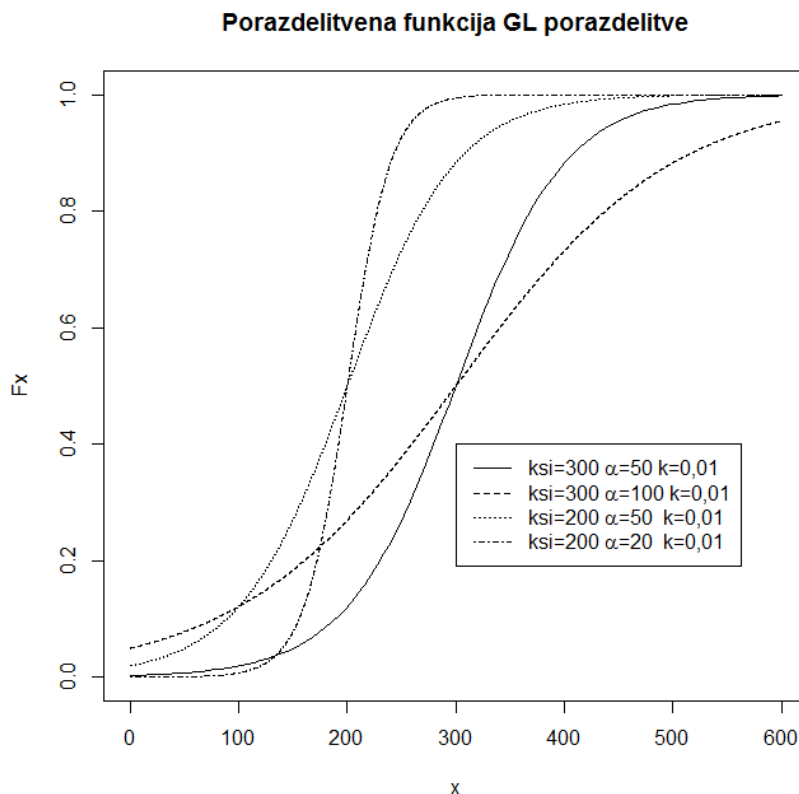
- k oblikovni parameter,
- ξ parameter obsega,
- α lokacijski parameter.

Slika 2 prikazuje gostoto verjetnosti (angl. *Probability density function*) porazdelitve GL za štiri različne kombinacije vrednosti parametrov ($\xi=300, \alpha=50, k=0,01$; $\xi=300, \alpha=100, k=0,01$; $\xi=200, \alpha=50, k=0,01$; $\xi=200, \alpha=20, k=0,01$) (Bezák, 2012).

Slika 3 prikazuje pripadajoče porazdelitvene funkcije (angl. *Cumulative distribution function*) porazdelitve GL za iste kombinacije parametrov, kot na sliki 2 (Bezák, 2012).



Slika 2: Gostota verjetnosti porazdelitve GL za različne vrednosti parametrov (Bezák, 2012)



Slika 3: Porazdelitvena funkcija porazdelitve GL za različne vrednosti parametrov (Bezák, 2012)

3.2.1 Ocena parametrov po metodi momentov L

Ocene pretoka, ki pripada T-letni povratni dobi lahko izračunamo po običajnem postopku, to je z uporabo inverzne porazdelitvene funkcije $x(F_x)$. Z metodo momentov L lahko ocenimo parametre porazdelitve (Hosking in Wallis, 1997):

$$x(F_x) = \xi + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - \left(\frac{1-F_x}{F_x} \right)^k \right\}, \quad (11)$$

$$k = -t_3$$

$$\alpha = \frac{l_2}{\Gamma(1+k)\Gamma(1-k)},$$

$$\xi = l_1 + \frac{l_2 - \alpha}{k}.$$

Enačbe za oceno momentov L so prikazane v poglavju 3.1.1.

3.3 Generalizirana porazdelitev ekstremnih vrednosti (GEV)

Porazdelitev GEV je poseben primer porazdelitve Kappa in se pogosto uporablja za verjetnostne analize visokih vod. Porazdelitev je troparameterska in zajema vse tri porazdelitve ekstremnih vrednosti. Porazdelitvena funkcija je definirana z naslednjo enačbo (Robson in Reed, 1999):

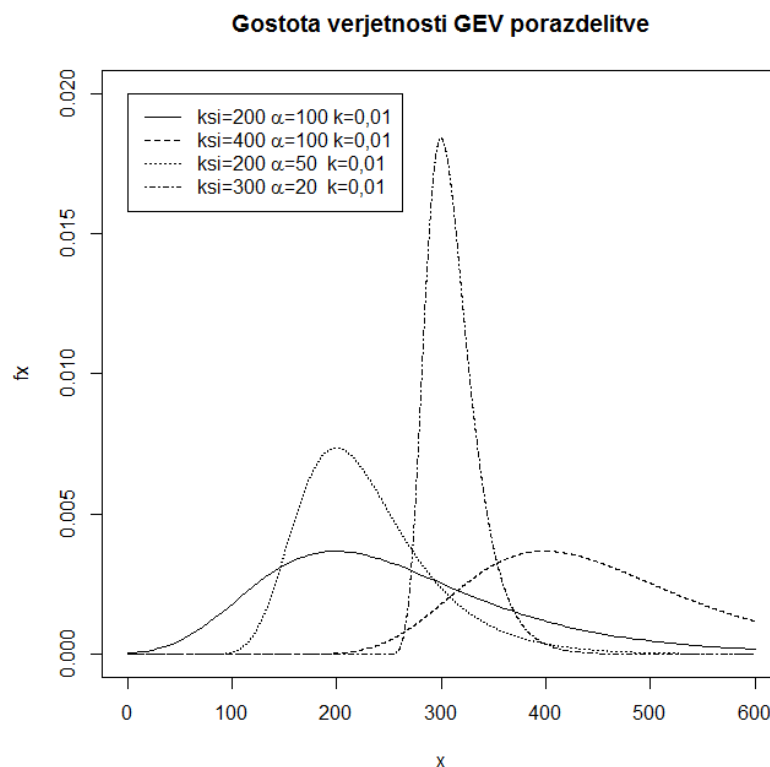
$$F_x(x) = \exp\left(-\left\{1 - k \left[\frac{x-\xi}{\alpha}\right]\right\}^{1/k}\right), \quad (12)$$

kjer je:

k oblikovni parameter.

Tip porazdelitve ekstremnih vrednosti določa oblikovni parameter. Če je $k=0$ potem gre za porazdelitev ekstremnih vrednosti tipa 1 oziroma Gumbelovo porazdelitev, če je $k<0$ gre za porazdelitev ekstremnih vrednosti tipa 2 oziroma Frechetovo porazdelitev, če pa je $k>0$ potem gre pa za porazdelitev ekstremnih vrednosti tipa 3 oziroma Weibullovo porazdelitev.

Slika 4 prikazuje gostoto verjetnosti GEV porazdelitve za različne vrednosti parametrov ($\xi=200$, $\alpha=100$, $k=0,01$; $\xi=400$, $\alpha=100$, $k=0,01$; $\xi=200$, $\alpha=50$, $k=0,01$; $\xi=300$, $\alpha=20$, $k=0,01$) (Bezák, 2012).



Slika 4: Gostota verjetnosti GEV porazdelitve za različne kombinacije parametrov (Bezák, 2012)

3.3.1 Ocena parametrov po metodi momentov L

S pomočjo enačb iz poglavja 3.1.1 lahko določimo parametre inverzne porazdelitve z naslednjimi izrazi (Hosking in Wallis, 1997):

$$\begin{aligned} x(F_x) &= \xi + \frac{\alpha}{k} \{1 - (-\ln F_x)^k\}, \\ c &= \frac{2}{3+t_3} - \frac{\ln 2}{\ln 3}, \\ k &= 7,8590c + 2,9554c^2, \\ \alpha &= \frac{kl_2}{\Gamma(1+k)(1-2^{-k})}, \\ \xi &= l_1 + \frac{\alpha(\Gamma(1+k)-1)}{k}. \end{aligned} \quad (13)$$

3.4 Gumbelova porazdelitev

Gumbelova porazdelitev ali porazdelitev ekstremnih vrednosti tipa 1 je asimetrična in dvoparametrška ter se pogosto uporablja za analize visokih vod in maksimalnih padavin. Porazdelitvena funkcija in gostota verjetnosti $f_x(x)$ sta enaki in sta definirani z izrazom (Brilly in Šraj, 2005):

$$\begin{aligned} f_x &= \frac{1}{\alpha} e^{-(x-u)/(\alpha - e^{-(x-u)/\alpha})}, \\ F_x(x) &= e^{-e^{-(x-u)/\alpha}} \quad -\infty < x < \infty, \end{aligned} \quad (14)$$

kjer je:

u lokacijski parameter.

Pri analizi ekstremov se uporabljata parametra u in α , slednji vpliva na razpršenost porazdelitve.

3.4.1 Ocena parametrov po metodi momentov L

Z uporabo inverzne oblike porazdelitvene funkcije lahko dobimo oceno vrednosti pretokov (Hosking in Wallis, 1997):

$$\begin{aligned} x(F_x) &= u - \alpha \ln(-\ln F_x), \\ \alpha &= \frac{l_2}{\ln 2}, \\ u &= l_1 - 0,5772157\alpha. \end{aligned} \quad (15)$$

3.5 Logaritemsko normalna porazdelitev

Logaritemsko normalna porazdelitev je asimetrična in dvoparametrška ter izhaja iz normalne oziroma Gaussove porazdelitve. Definirana je za vrednosti spremenljivke x , kjer velja $x > 0$ (Brilly in Šraj, 2005).

Kadar je slučajna spremenljivka X porazdeljena normalno in velja enačba $\ln Y = X$, potem je slučajna spremenljivka Y porazdeljena logaritemsko normalno (Turk, 2011).

Porazdelitvena funkcija $F_X(x)$ in gostota verjetnosti $f_X(x)$ sta definirani z naslednjim izrazom (Brilly in Šraj, 2005):

$$f_X(x) = \frac{1}{x\sigma_Y\sqrt{2\pi}} e^{-(\ln x - \mu_Y)^2 / 2\sigma_Y^2}, \quad (16)$$

$$F_X(x) = \int_0^x \frac{1}{x\sigma_Y\sqrt{2\pi}} e^{-(\ln x - \mu_Y)^2 / 2\sigma_Y^2} dx \quad 0 < x < \infty,$$

$$\sigma_Y = \left[\ln \left(1 + \frac{\sigma_X^2}{\mu_X^2} \right) \right]^{1/2},$$

$$\mu_X = \ln \mu_X - \frac{\sigma_X^2}{2} = m_Y.$$

3.5.1 Ocena parametrov po metodi momentov L

Z uporabo metode momentov L lahko izračunamo oceno parametrov logaritemsko normalne porazdelitve, pri čemer izračunamo vrednosti momentov L na logaritmiranih vrednostih pretokov (Hosking in Wallis, 1997):

$$\mu_Y = l_1, \quad (17)$$

$$\sigma_Y = \sqrt{\pi} l_2.$$

3.6 Pearsonova III porazdelitev

Pearsonova porazdelitev tipa 3 se v hidrologiji pogosto uporablja za analize maksimalnih pretokov. Porazdelitev je troparametrška in asimetrična ter je ena od gama porazdelitev (Brilly in Šraj 2005). V naslednjih izrazih sta predstavljeni porazdelitvena funkcija $F_X(x)$ in gostota verjetnosti $f_X(x)$ (Brilly in Šraj, 2005):

$$f_X(x) = \frac{1}{\beta\Gamma(\alpha)} \left(\frac{x-c}{\beta} \right)^{\alpha-1} e^{-\frac{(x-c)}{\beta}}, \quad (18)$$

$$F_X(x) = \int_c^x \frac{1}{\beta\Gamma(\alpha)} \left(\frac{x-c}{\beta} \right)^{\alpha-1} e^{-\frac{(x-c)}{\beta}} dx.$$

Vrednosti pretokov lahko ocenimo na več načinov. Lahko jih ocenimo s pomočjo računalniških programskih orodij (Bezak, 2012), ki imajo vgrajeno funkcijo gama ali z uporabo enačbe linearne transformacije, kjer lahko iz tabel, ki se nahajajo v literaturi (Brilly in Šraj, 2005) razberemo faktorje frekvence ali jih preprosto izračunamo po naslednji enačbi (USWRC, 1981):

$$z(T) = \frac{2}{c_s} \left(\left(\left(K_n - \frac{c_s}{6} \right) \frac{c_s}{6} + 1 \right)^3 - 1 \right), \quad (19)$$

kjer je:

- K_n standardizirana normalna spremenljivka,
- C_s koeficient simetrije.

3.6.1 Ocena parametrov po metodi momentov L

Z uporabo metode momentov L lahko izračunamo ocene parametrov po naslednjih enačbah (Hosking in Wallis, 1997):

- $t_3 < 1/3$ (20)

$$z = 3\pi t_3^2,$$

$$\alpha = \frac{1+0,2906z}{z+0,1882z^2+0,0442z^3},$$

- $1/3 < t_3 < 1$ (21)

$$z = 1 - t_3,$$

$$\alpha = \frac{0,36067z - 0,59567z^2 + 0,25361z^3}{1 - 2,78861z + 2,56096z^2 - 0,77045z^3}.$$

Neodvisno od vrednosti koeficienta asimetrije lahko izračunamo še ostala dva parametra z izrazoma (Hosking in Wallis, 1997):

$$\beta = \text{sign}(t_3) \sqrt{\pi} l_2 \frac{\Gamma(\alpha)}{\Gamma(\alpha+0,5)}, \quad (22)$$

$$c = l_1 - \alpha\beta.$$

3.7 Logaritemsko Pearsonova III porazdelitev

Logaritemsko Pearsonova porazdelitev tipa 3 se pogosto uporablja pri verjetnostnih analizah visokovodnih konic (Brilly in Šraj, 2005), tudi v Sloveniji (Bezak, 2012; Kučič, 2007). Izhaja iz Pearsonove III porazdelitve (Brilly in Šraj, 2005). Porazdelitvena funkcija $Fy(y)$ in gostota verjetnosti $f_y(y)$ sta definirani z naslednjim izrazom (Kučič, 2007):

$$\begin{aligned}
 f_Y(y) &= \frac{1}{\beta \Gamma(\alpha)} \left(\frac{y-c}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-(y-c)/\beta}, \\
 F_Y(y) &= \int_0^y \frac{1}{\beta \Gamma(\alpha)} \left(\frac{y-c}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-(y-c)/\beta} dy, \\
 y &= \log x.
 \end{aligned} \tag{23}$$

3.7.1 Ocena parametrov po metodi momentov L

Ocene parametrov porazdelitve z metodo momentov L izračunamo z enakim postopkom kot je predstavljen v poglavju 3.6.1, vendar vrednosti momentov L izračunamo iz logaritmiranih vrednosti pretokov.

Ko določimo parametre porazdelitve, lahko ocenimo vrednost pretokov na več načinov: z računalniškimi orodji, v katerih je vgrajena gama funkcija, z enačbo linearne transformacije ali jih izračunamo z enačbo (18) v poglavju 3.6 (Bezák, 2012).

4 TESTI

Po izvedbi verjetnostnih analiz je potrebno preveriti še ustreznost posamezne porazdelitve in izbrati tisto, katera se najbolj prilega podatkom. V svetu se uporablja veliko različnih testov, nekateri so bolj, nekateri manj primerni za preverjanje ustreznosti porazdelitve. V nadaljevanju so predstavljeni testi: RMSE, MSE, MAE in koeficient korelacije r . Poleg tega je predstavljen tudi Mann-Kendallov statistični test za ugotavljanje trenda v podatkih.

4.1 Testi ustreznosti porazdelitve

4.1.1 Test RMSE

Test RMSE (angl. *Root mean square error*) je eden izmed mnogih testov za določitev najustreznejše porazdelitve. V nadaljevanju je predstavljena enostavna enačba testa RMSE, ki jo določata izmerjen in izračunan pretok in pri katerem morajo biti izračunani podatki oziroma pretoki urejeni po vrstnem redu od najmanjšega k največjemu. Najpogosteje z Weibullovo, lahko pa tudi s katero drugo enačbo določimo povratno dobo posameznega pretoka ter za te vrednosti povratnih dob s pomočjo izbrane porazdelitve izračunamo še vrednost pretoka (Maidment, 1993).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - Q_{max,i})^2}, \tag{24}$$

kjer je:

x_i izračunana vrednost pretoka za izbrano porazdelitev,

$Q_{max,i}$ izmerjena vrednost pretoka.

Rezultati testa RMSE niso dobri ali slabi, ampak ustrežnejši in manj ustrezni oziroma je porazdelitev, ki se najbolj prilega podatkom najustrežnejša ter jo zato lahko izberemo za nadaljnje analize. Merilo izbire je tista porazdelitev, ki ima najnižjo vrednost testne statistike RMSE. Osamelci imajo velik vpliv na izračunano vrednost (Swanson et al., 2011).

4.1.2 Test MAE

Eden izmed testov za določitev najustrežnejše porazdelitve je test MAE (angl. *mean absolute error*), kjer je vrednost testne statistike določena z naslednjo enačbo (Maidment, 1993):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - Q_{max,i}|, \quad (25)$$

kjer je:

x_i izračunana (ocenjena) vrednost pretoka za izbrano porazdelitev,

$Q_{max,i}$ izmerjena vrednost pretoka,

n število elementov v vzorcu.

Osamelci imajo manjši vpliv na rezultate testa MAE, kot na rezultate testa RMSE, zaradi tega naj bi bil ta test, ki uporablja absolutno vrednost razlike, bolj zanesljiv ocenjevalec razlike med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi (Maidment, 1993). Testna statistika MAE je v povprečju manjša od vrednosti testne statistike RMSE ter je podana v enakih enotah, kot so osnovni podatki (Swanson et al., 2011).

4.1.3 Test MSE

V statistiki je srednja kvadratna napaka MSE (angl. *mean square error*) mera uspešnosti avtomatsko zgrajenih zveznih modelov. Definirana je kot povprečni kvadrat razlike med izračunano (ocenjeno) vrednostjo in izmerjeno vrednostjo in je predstavljena z naslednjim izrazom (Lehmann in Casella, 1998):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - Q_{max,i})^2, \quad (26)$$

kjer je:

x_i izračunana (ocenjena) vrednost pretoka za izbrano porazdelitev,

$Q_{max,i}$ izmerjena vrednost pretoka,

n število elementov v vzorcu.

4.1.4 Koeficient korelacije

Pearsonov koeficient korelacije je statistična številska mera, ki predstavlja mero linearne povezanosti spremenljivk X in Y in je definirana kot razmerje med kovarianco in produktom standardnih odklonov (Brilly in Šraj, 2005):

$$\rho_{xy} = \frac{\text{cov}[X,Y]}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (27)$$

kjer je:

$$\text{COV}[X, Y] = E[(X - \mu_x)(Y - \mu_y)] \quad \text{kovarianca,}$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad \text{standardna deviacija slučajne spremenljivke } X,$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{N}} \quad \text{standardna deviacija slučajne spremenljivke } Y.$$

Vrednost koeficienta se giblje v intervalu med -1 in 1, pri čemur vrednost 1 pomeni močno pozitivno linearno povezanost spremenljivk X in Y , pri vrednosti -1 pa močno negativno linearno povezanost oziroma če se slučajna spremenljivka X povečuje, se slučajna spremenljivka Y zmanjšuje (Brilly in Šraj, 2005).

Na podlagi podatkov vzorca pa znaša ocena korelacijskega koeficienta r (Brilly in Šraj, 2005):

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{\sqrt{(n \sum_{i=1}^n X_i^2 - (\sum_{i=1}^n X_i)^2)(n \sum_{i=1}^n Y_i^2 - (\sum_{i=1}^n Y_i)^2)}}. \quad (28)$$

4.2 Mann-Kendallov statistični test trenda

Osnova Mann-Kendallovega testa je rangiranje podatkovnih nizov, pri čemer se predpostavlja, da so podatki neodvisni in identično porazdeljeni, vendar pa se dejanske podatkovne vrednosti ne uporabijo. Vsaka največja vrednost v nizu podatkov se rangira z n (Jurko, 2009).

Mann-Kendallov test je enostaven za uporabo, še posebej je uporaben za zaznavanje postopne spremembe ali trenda v časovnih nizih. V analizah hidroloških podatkov velja Mann-Kendallov test za enega izmed najširše uporabljenih robustnih ne-parametričnih testov na trend (Jurko, 2009).

Glede na to, da so se s tem testom ukvarjali številni raziskovalci, spada test med izredno učinkovite (Hirsch et al., 1982; Gan, 1992). Test služi za identifikacijo pomembnih trendov v spremenljivkah in je zasnovan na »Tau« statistiki ter ima dva parametra, to sta stopnja značilnosti (angl. *Significance*

level), ki označuje moč trenda in velikost obsega (angl. *slope magnitude estimate*), ki označuje smer in obseg trenda (Jurko, 2009).

Dejanska porazdelitev podatkov na test nima nikakršnega vpliva, glavna zahteva je, da so podatki neodvisni, v nasprotnem primeru bi pozitivna serijska korelacija povečala možnost statistično značilnega trenda (Jurko, 2009).

V nadaljevanju je prikazana Kendall-ova vsota testne statistike S , ki je deljena s kvadratnim korenom variance (Kundzewicz et al, 2004), kjer je n dolžina časovnega niza in $a_1, a_2, \dots, a_n$ vrednosti časovnega niza.

$$\frac{1}{\sqrt{v}} S, \tag{29}$$
$$S = \sum \text{sgn}(a_j - a_i),$$
$$v = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18},$$

kjer je:

S Kendallova vsota,
 v varianca,
 $\text{Sgn}(a_j - a_i)$ indikacijska funkcija.

Če je $a_j - a_i > 0$, potem je vrednost indikacijske funkcije 1, če je $a_j - a_i = 0$, potem je vrednost indikacijske funkcije 0 in če je $a_j - a_i < 0$ potem je vrednost indikacijske funkcije -1, povsod velja da je $a > i$ (Jurko, 2009).

Vrednost τ je definirana kot vsota S deljena z D , pri čemer je D največja možna vrednost S s porazdelitvijo vrednosti časovne spremenljivke. V primeru, da v časovnem nizu podatki niso zvezno porazdeljeni, se test trenda izvede s predpostavko, da pomanjkljive nize izloči iz računa.

4.3 Testiranje hipotez (domnev)

Pri večjih človeških posegih v rečni režim, kot je na primer zožitev struge, je enostavno najti vzroke za statistično značilne spremembe v časovnih nizih podatkov o pretokih. Problem nastane takrat, ko se pojavijo postopne spremembe v obnašanju ekstremov toka znotraj močne naravne spremenljivosti kot posledice podnebnih vplivov (Kundzewicz, 2004). Tako je izsleditev šibkega toplogrednega signala v hidrološkem nizu polnem šumov zelo dolgotrajna (Jurko, 2008).

Za izvedbo statistične analize je tako potrebno najprej definirati ničelno hipotezo H_0 , katero preizkušamo in alternativno hipotezo H_1 , ki je nezdržljiva z ničelno domnevo (Turk, 2011). V primeru, da želimo srednjo vrednost niza analizirati na trend, predstavlja ničelna hipoteza (H_0) trditev,

da ni spremembe v srednji vrednosti niza in alternativna hipoteza predstavlja trditev, da srednja vrednost s časom narašča oziroma pada (Jurko, 2008).

Izberemo testno statistiko in primerjamo ničelno in alternativno hipotezo ter na podlagi razpoložljivih podatkov ovrednotimo njeno statistično značilnost. Za testno statistiko velja, da je enostavna numerična vrednost, izračunana iz podatkov, katere testiramo in je izbrana tako, da poudari razliko med dvema hipotezama (Jurko, 2008)

Upoštevati je potrebno nekatere predpostavke kot so: normalno porazdeljeni podatki, trajnost porazdelitve - vse podatkovne točke imajo enako porazdelitev in neodvisnost. V primeru, da podatki ne izpolnjujejo predpostavk, potem so rezultati brez pomena, saj bi bile ocene stopnje značilnosti v veliki meri napačne. Za hidrološke podatke pa splošno velja, da so podatki ne-normalno porazdeljeni, kar pomeni, da so testi, ki predvidevajo osnovno normalno porazdelitev neprimerni (Jurko, 2008).

Pri statističnih testih se uporablja stopnja značilnosti kot kriterij za zavrnitev ničelne domneve, saj noben test ni popoln, tudi če so izpolnjene vse predpostavke. V kolikšni meri se testna statistika razlikuje glede na niz vrednosti, meri stopnja značilnosti. Stopnja značilnosti 95 % predstavlja v povprečju 5 % verjetnost, da bo izračun napačen (Jurko, 2008).

5 PRIMER VERJETNOSTNE ANALIZE VISOKOVODNIH KONIC NA VODOMERNI POSTAJI NAZARJE NA REKI SAVINJI

5.1 Vhodni podatki

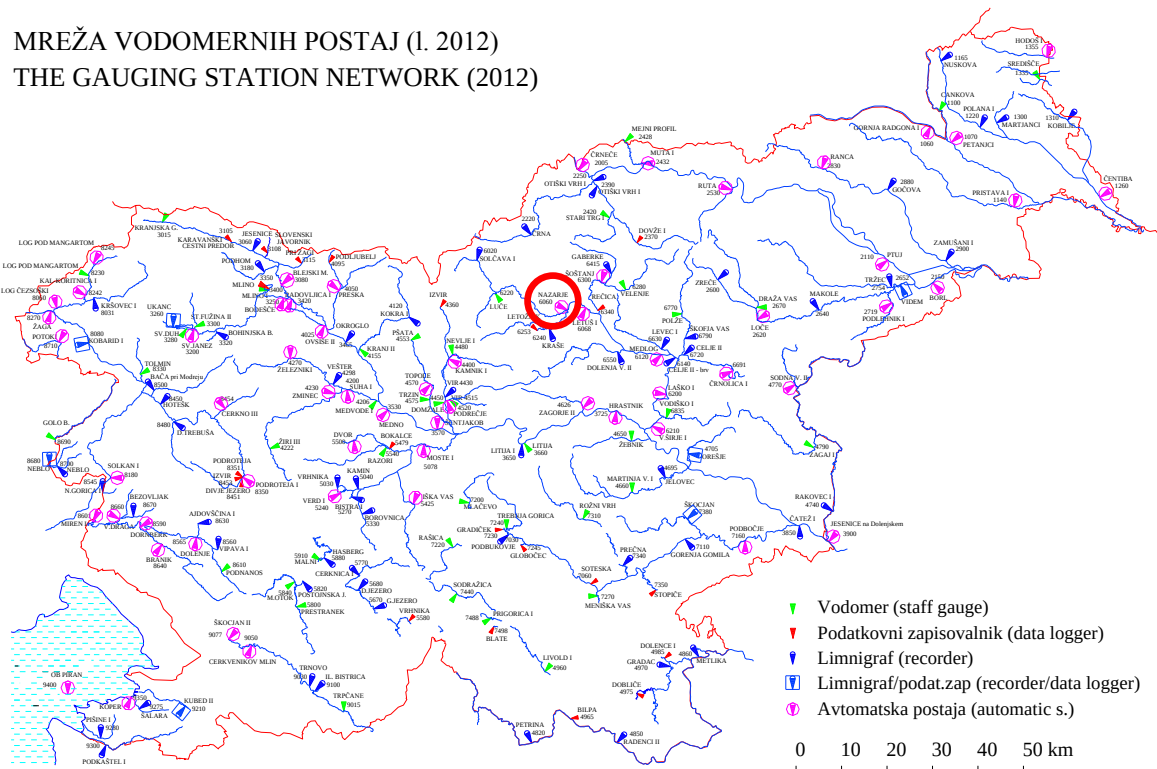
Vodomerne postaje Nazarje na reki Savinji je bila zgrajena že leta 1904, na kar opozarja letnica na spodnjem delu zidu vodomerne postaje. Meritve pa so začeli izvajati leta 1926 in se neprekinjeno izvajajo še danes. Vodomerne postaje se nahaja na desni strani reke Savinje, nekaj deset metrov po sotočju reke Drete v Savinjo. Reka Savinja je po dolžini šesta najdaljša reka v Sloveniji, ki izvira v Kamniško-Savinjskih Alpah in se kot levi pritok reke Save v Zidanem mostu izliva vanjo. Reka Savinja ima alpski dežno – snežni režim, s prvim viškom jeseni zaradi velike količine padavin in drugim spomladi zaradi taljenja snega (Frantar in Hrvatin, 2008). Zaradi primerjave še z ostalimi vodomernimi postajami smo izvedli verjetnostno analizo visokovodnih konic od leta 1931 do leta 2010. To 80-letno obdobje smo razdelili na posamezna 30-letna obdobja s korakom deset let in dobili šest obdobj, ki smo jih analizirali.

Preglednica 1: Lastnosti vodomerne postaje Nazarje na Savinji (6060)

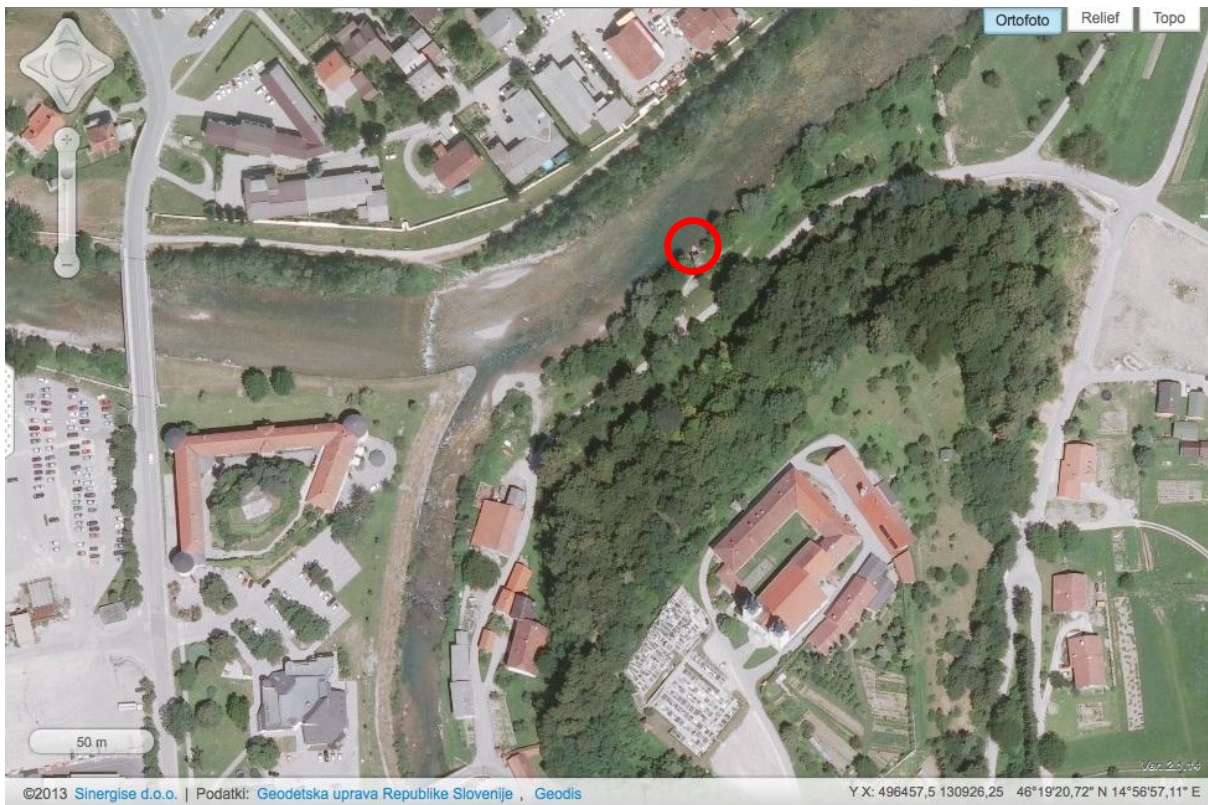
Lastnosti/ postaja	Nazarje
Merilna naprava	Merska letev (1926-1932) limnigraf (1933-2006, 2008) tlačna sonda (2007, 2009-2011) senzor z mehurčki (2012-danes)
Površina porečja [km²]	457,3
Gauss-Krügerjeva koordinata X	130800
Gauss-Krügerjeva koordinata Y	496710
Kota [m.n.m]	336,97
Začetek opazovanja	1926

Slika 5 prikazuje lokacijo vodomerne postaje Nazarje na karti Slovenije, na sliki 6 pa je prikazana natančna lokacija vodomerne postaje. Slika 7 prikazuje vodomerno postajo Nazarje, slika 8 prikazuje vodomerno letev, ki je pripeta na vodomerno postajo in slika 9 tablico na vodomerni postaji, ki prikazuje najvišjo izmerjeno gladino, ki se je zgodila ob poplavih leta 1990.

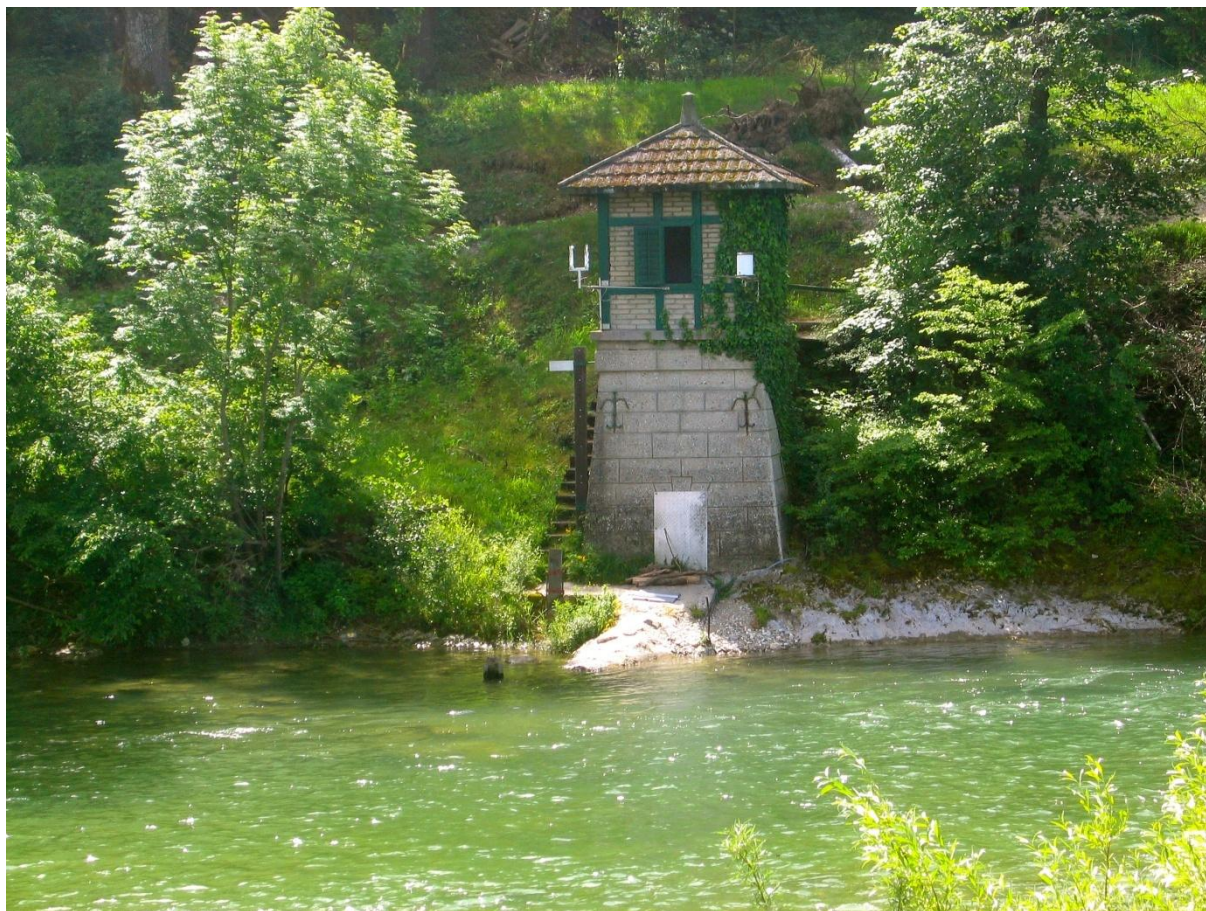
MREŽA VODOMERNIH POSTAJ (I. 2012) THE GAUGING STATION NETWORK (2012)



Slika 5: Mreža vodomernih postaj (Agencija RS za okolje, 2012)



Slika 6: Lokacija vodomerne postaje Nazarje (Geopedia, 2013)



Slika 7: Vodomerna postaja Nazarje



Slika 8: Vodomerna letev na vodomerni postaji



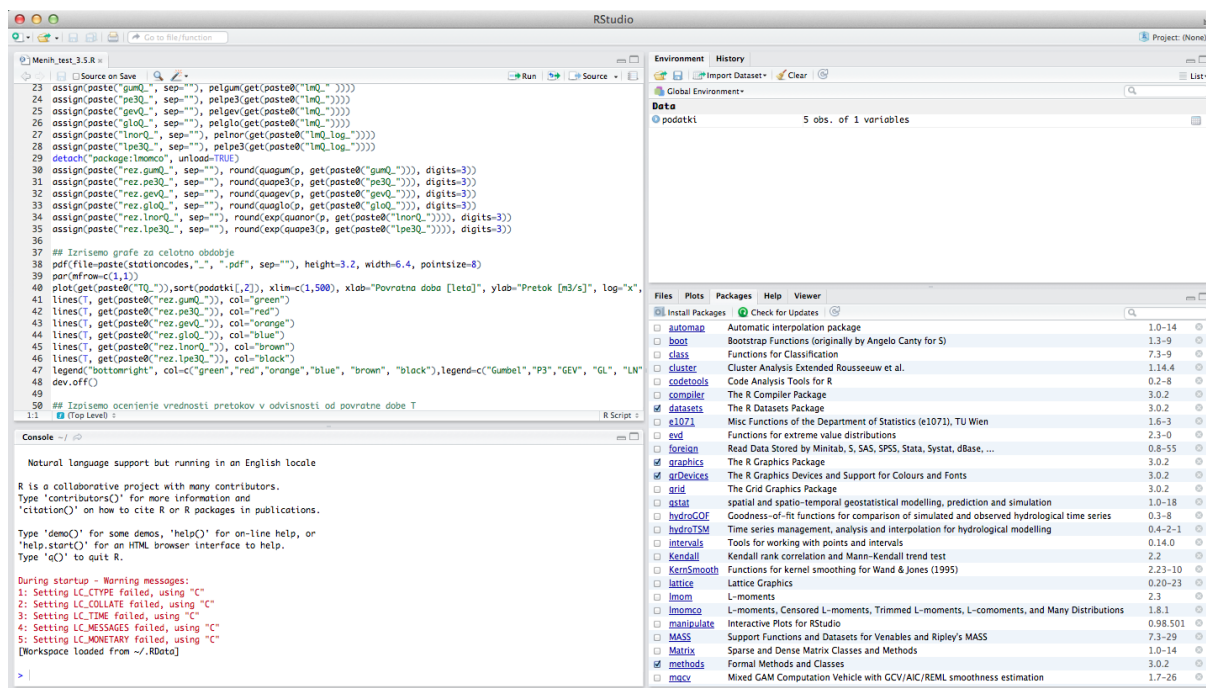
Slika 9: Tablica na vodomerni letvi, ki prikazuje do sedaj najvišjo izmerjeno gladino

5.2 Program R

5.2.1 Opis programa

Program R oziroma vmesnik tega programa R Studio je prosto dostopen in odprtokodni program, ki se večinoma uporablja za statistične analize in je po zmogljivosti primerljiv z ostalimi programi kot je na primer Matlab. Poleg operacijskega sistema Windows ga je mogoče poganjati tudi na Linux in Mac OS X.

R je torej okolje, v katerem se lahko izvajajo statistične analize različne zahtevnosti in v katerem lahko s preprostimi ukazi izrišemo grafe, katere ni mogoče z drugimi pogostejše uporabljenimi programi (na primer Numbers v Mac OS X in Excel v Windows okolju) in programski jezik, ki omogoča mnogo več kot le izvajanje osnovnih statističnih analiz (Bezák, 2013).



Slika 10: Program R Studio

Slika 10 prikazuje delovno podlago programa R Studio, katera je razdeljena na štiri polja zaradi boljše preglednosti. Vsako polje ima določeno funkcijo. Na primer polje levo zgoraj se imenuje »script« je namenjeno za pisanje kode.

5.3 Verjetnostna analiza z metodo letnih maksimumov

Pred izvedbo verjetnostne analize je potrebno pregledati vzorec, če je ustrezen oziroma, če so podatki zvezni. Če so podatki nezvezni oziroma podatki znotraj vzorca manjkajo, potem se vzorec smatra kot neustrezen. Podatki iz vodomerne postaje Nazarje so zvezni, tako smo lahko izvedli verjetnostno analizo.

Kot je že zgoraj omenjeno, so na vodomerni postaji Nazarje začeli z neprekinjenimi meritvami leta 1926, za potrebe verjetnostne analize pa smo v nalogi vzeli podatke od leta 1931 naprej, da smo lažje primerjali posamezna obdobja in posamezne vodomerne postaje. V preglednici 2 so prikazani maksimalni letni pretoki vodomerne postaje Nazarje.

Preglednica 2: Letni maksimumi na vodomerni postaji Nazarje od leta 1931 do leta 2012 (Agencija RS za okolje, 2014)

Leto	$Q_{\max}[\text{m}^3/\text{s}]$	Leto	$Q_{\max}[\text{m}^3/\text{s}]$	Leto	$Q_{\max}[\text{m}^3/\text{s}]$	Leto	$Q_{\max}[\text{m}^3/\text{s}]$
1931	288,0	1951	147,0	1971	116,0	1991	206,0
1932	157,0	1952	219,0	1972	250,0	1992	371,0
1933	462,0	1953	189,0	1973	308,0	1993	281,0
1934	242,0	1954	206,0	1974	244,0	1994	183,0
1935	179,0	1955	198,0	1975	188,0	1995	247,7
1936	347,0	1956	204,0	1976	217,0	1996	281,8
1937	176,0	1957	163,0	1977	188,0	1997	313,1
1938	249,0	1958	302,0	1978	160,0	1998	629,9
1939	193,0	1959	232,0	1979	276,0	1999	176,6
1940	331,0	1960	194,0	1980	377,0	2000	455,0
1941	133,0	1961	245,0	1981	149,0	2001	241,0
1942	111,0	1962	412,0	1982	276,0	2002	180,5
1943	155,0	1963	252,0	1983	200,0	2003	179,0
1944	144,0	1964	287,0	1984	253,0	2004	191,1
1945	83,2	1965	229,0	1985	239,0	2005	185,0
1946	93,2	1966	305,0	1986	248,0	2006	133,0
1947	229,0	1967	216,0	1987	233,0	2007	507,4
1948	234,0	1968	287,0	1988	190,0	2008	179,5
1949	176,0	1969	245,0	1989	274,0	2009	308,1
1950	179,0	1970	193,0	1990	635,0	2010	366,6

Za verjetnostno analizo smo uporabili šest najpogostejše uporabljenih porazdelitev, to so: Gumbelova porazdelitev (G), porazdelitev GEV, porazdelitev GL, Pearsonova III porazdelitev (P3), logaritemsko normalna porazdelitev (LN) in logaritemsko Pearsonova III porazdelitev (LP3). Z uporabo metode momentov L pa smo ocenili parametre porazdelitev. Merjeni pretoki so grafično umeščeni v verjetnostno mrežo s pomočjo Weibullove porazdelitve.

Kot je že uvodoma omenjeno nas zanima, če vse pogostejši ekstremni poplavni dogodki, ki se dogajajo v Sloveniji v zadnjem času, vplivajo na ocenjene projektne pretoke. Tako smo torej 80-letno obdobje meritev na postaji Nazarje razdelili na 30-letna obdobja s korakom 10 let in tako dobili 6 obdobj, ter vsako posebej analizirali. V nadaljevanju je predstavljena verjetnostna analiza visokovodnih konic vsakega posameznega obdobja.

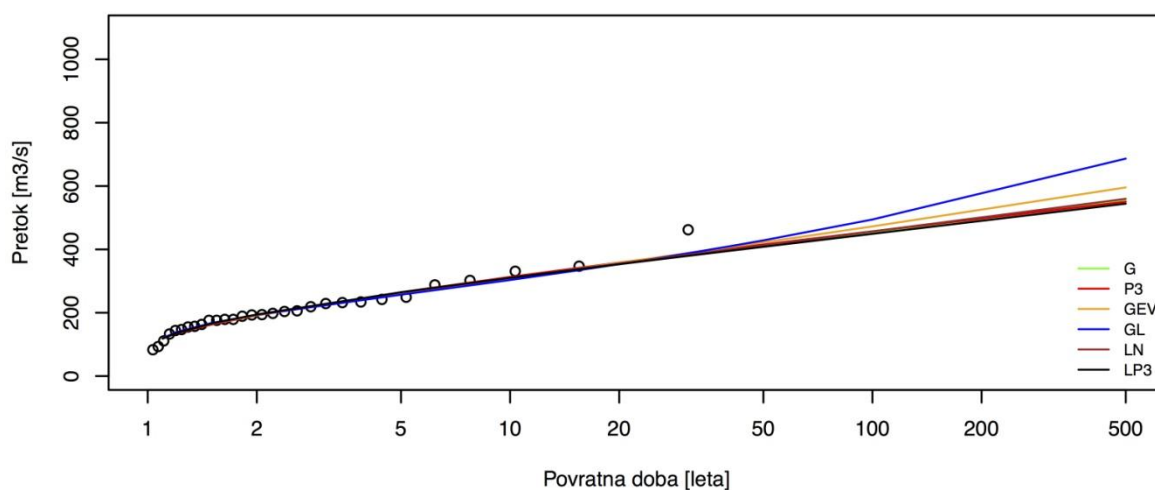
5.3.1 Rezultati verjetnostne analize za posamezna obdobja

5.3.1.1 Obdobje 1931-1960

Prvo obdobje traja od leta 1931 do leta 1960. Rezultati verjetnostne analize tega obdobja so prikazani v preglednicah 3 in 4 ter na sliki 11.

Preglednica 3: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1931-1960

	G	P3	GEV	GL	LN	LP3
Q₁₀ [m³/s]	309,9	313,1	309,7	303,3	310,9	310,1
Q₅₀ [m³/s]	411,3	415,4	422,2	428,5	413,1	408,1
Q₁₀₀ [m³/s]	454,2	457,0	472,6	494,4	456,7	449,1
Q₅₀₀ [m³/s]	553,2	550,6	595,8	686,6	559,6	544,4



Slika 11: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1931-1960

Preglednica 4: Prikaz rezultatov testov za obdobje 1931-1960

Ime testa	G	PE3	GEV	GL	LN	LP3
MAE	10,14	10,61	9,72	9,16	10,23	10,48
MSE	294,93	289,62	262,35	265,57	290,59	311,42
RMSE	17,17	17,02	16,2	16,3	17,05	17,65
r	0,98	0,98	0,99	0,99	0,98	0,98
R2	0,96	0,96	0,97	0,98	0,96	0,96

Iz preglednice 4 je razvidno, da se za prvo obdobje podatkom najbolj prilega porazdelitev GEV. Najustreznejša je tista porazdelitev, pri kateri je rezultat testa najmanjši. Kot merodajni test smo uporabili test RMSE.

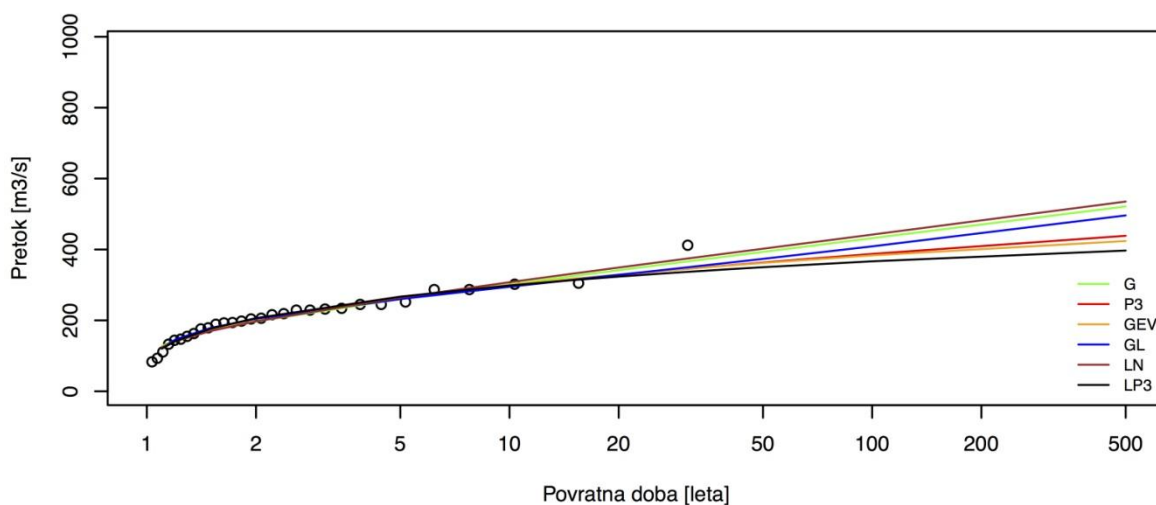
Rezultat Mann – Kendallovega testa je dal vrednost testne statistike »tau« -0,053 in p-vrednost 0,695. Tako lahko za obdobje od leta 1931 do 1960 s 5 % stopnjo značilnosti trdimo, da maksimalni pretoki nimajo statistično značilno padajočega trenda.

5.3.1.2 Obdobje 1941-1970

Drugo obravnavano obdobje traja od leta 1941 do leta 1970. Rezultati verjetnostne analize tega obdobja so prikazani v preglednicah 5 in 6 ter na sliki 12.

Preglednica 5: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1941-1970

	G	P3	GEV	GL	LN	LP3
Q_{10} [m ³ /s]	301,5	298,9	300,0	294,8	307,7	298,4
Q_{50} [m ³ /s]	393,2	363,4	362,1	373,5	402,2	350,0
Q_{100} [m ³ /s]	432,0	387,5	383,4	408,8	442,0	366,6
Q_{500} [m ³ /s]	521,5	438,6	424,0	496,1	535,1	397,0



Slika 12: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1941-1970

Preglednica 6: Prikaz rezultatov testov za obdobje 1941-1970

ime testa	G	PE3	GEV	GL	LN	LP3
MAE	10,30	7,81	8,02	7,24	10,47	8,13
MSE	199,12	203,06	207,18	175,76	178,31	245,79
RMSE	14,11	14,25	14,39	13,26	13,35	15,68
r	0,98	0,98	0,98	0,99	0,98	0,98
R2	0,96	0,96	0,96	0,97	0,96	0,95

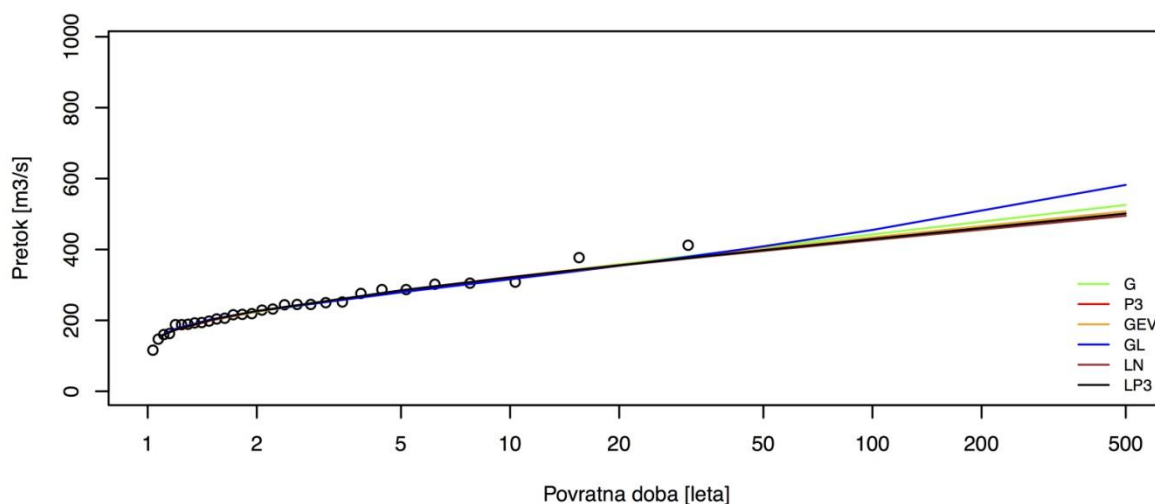
Iz preglednice 6 je razvidno, da se za drugo obdobje podatkom najbolj prilega porazdelitev GL. Kot je že zgoraj omenjeno je najustreznejša tista porazdelitev, pri kateri je rezultat testa najmanjši. Kot merodajni smo uporabili test RMSE. Rezultat Mann–Kendallovega testa je dal vrednost testne statistike »tau« 0,512 in p-vrednost 0,0538. Tako lahko za obdobje od leta 1941 do 1970 s 5 % stopnjo značilnosti trdimo, da maksimalni pretoki nimajo statistično značilno naraščajočega trenda.

5.3.1.3 Obdobje 1951-1980

Tretje obravnavano obdobje traja od leta 1951 do leta 1980. Rezultati verjetnostne analize tega obdobja so prikazani v preglednicah 7 in 8 ter na sliki 13.

Preglednica 7: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1951-1980

	G	P3	GEV	GL	LN	LP3
Q_{10} [m ³ /s]	321,3	322,2	321,2	315,9	321,0	321,4
Q_{50} [m ³ /s]	406,5	398,4	401,5	408,9	395,8	398,1
Q_{100} [m ³ /s]	442,5	428,6	434,3	455,1	426,2	429,6
Q_{500} [m ³ /s]	525,7	495,4	507,9	582,2	495,0	501,5



Slika 13: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1951-1980

Preglednica 8: Prikaz rezultatov testov za obdobje 1951-1980

ime testa	G	PE3	GEV	GL	LN	LP3
MAE	7,21	7,28	7,15	7,33	7,28	7,19
MSE	121,86	134,01	125,95	127,38	135,75	130,93
RMSE	11,04	11,58	11,22	11,29	11,65	11,44
r	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
R2	0,98	0,97	0,98	0,98	0,97	0,97

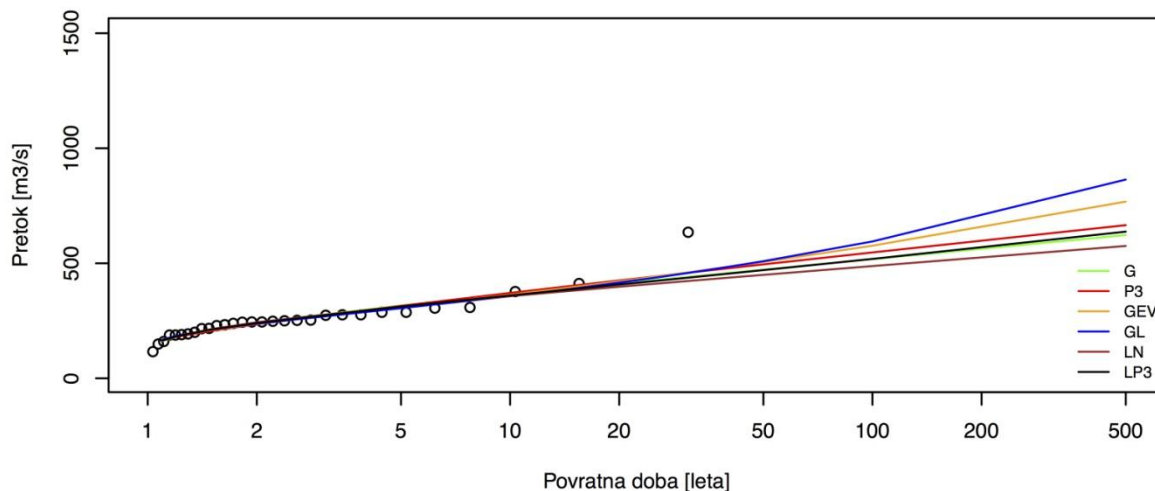
Iz preglednice 8 je razvidno, da se za tretje obdobje podatkom najbolj prilega Gumbelova porazdelitev. Kot je že zgoraj omenjeno je najustrežnejša tista porazdelitev, pri kateri je rezultat testa najmanjši. Kot merodajni smo uporabili test RMSE. Rezultat Mann–Kendallovega testa je dal vrednost testne statistike »tau« 0,120 in p-vrednost 0,363. Tako lahko za obdobje od leta 1951 do 1980 s 5 % stopnjo značilnosti trdimo, da maksimalni pretoki nimajo statistično značilno naraščajočega trenda.

5.3.1.4 Obdobje 1961-1990

Četrto obravnavano obdobje traja od leta 1961 do leta 1990. Rezultati verjetnostne analize tega obdobja so prikazani v preglednicah 9 in 10 ter na sliki 14.

Preglednica 9: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1961-1990

	G	P3	GEV	GL	LN	LP3
Q ₁₀ [m ³ /s]	365,2	371,1	363,6	356,9	357,1	360,2
Q ₅₀ [m ³ /s]	472,5	495,2	505,9	509,0	449,7	470,4
Q ₁₀₀ [m ³ /s]	517,9	547,1	576,5	594,9	487,9	519,0
Q ₅₀₀ [m ³ /s]	622,8	665,8	768,2	864,0	575,3	637,6



Slika 14: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1961-1990

Preglednica 10: Prikaz rezultatov testov za obdobje 1961-1990

ime testa	G	PE3	GEV	GL	LN	LP3
MAE	18,37	19,31	17,01	15,96	18,75	18,06
MSE	1485,83	1329,51	1215,84	1207,7	1714,89	1508,31
RMSE	38,55	36,46	34,87	34,75	41,41	38,84
r	0,92	0,93	0,94	0,95	0,91	0,92
R2	0,85	0,86	0,89	0,90	0,83	0,85

Iz preglednice 10 je razvidno, da se za četrto obdobje podatkom najbolj prilega porazdelitev GL. Kot je že zgoraj omenjeno je najustreznejša tista porazdelitev, pri kateri je rezultat testa najmanjši. Kot merodajni smo uporabili test RMSE. Rezultat Mann–Kendallovega testa je dal vrednost testne statistike »tau« -0,086 in p-vrednost 0,520. Tako lahko za obdobje od leta 1961 do 1990 s 5 % stopnjo značilnosti trdimo, da maksimalni pretoki nimajo statistično značilno padajočega trenda.

5.3.1.5 Obdobje 1971-2000

Peto obravnavano obdobje traja od leta 1971 do leta 2000. Rezultati verjetnostne analize tega obdobja so prikazani v preglednicah 11 in 12 ter na sliki 15.

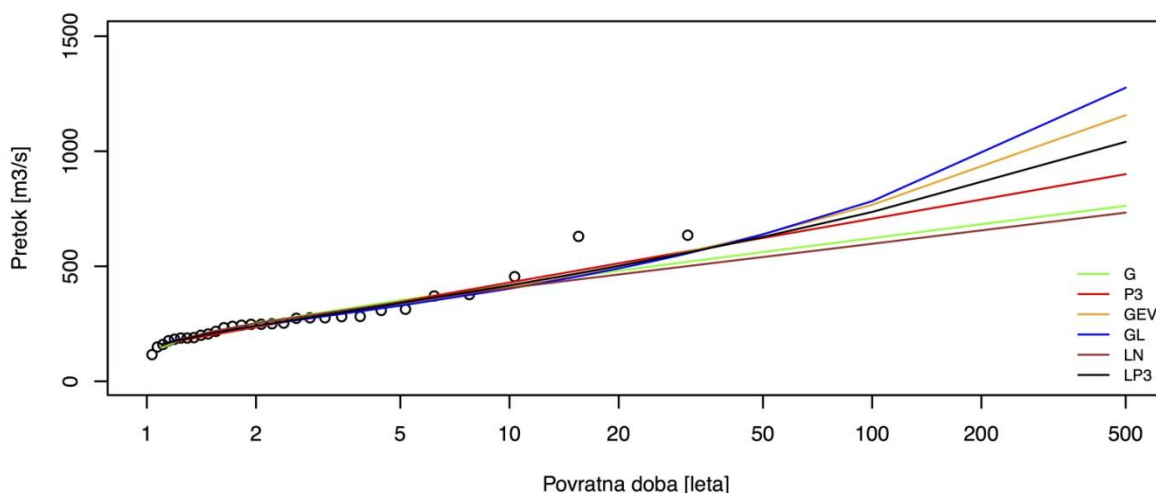
Preglednica 11: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1971-2000

	G	P3	GEV	GL	LN	LP3
Q_{10} [m³/s]	417,8	429,4	410,9	402,6	405,8	417,2
Q_{50} [m³/s]	561,6	623,3	639,7	638,7	540,3	627,8

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 11

$Q_{100}[\text{m}^3/\text{s}]$	622,4	706,7	767,1	783,0	597,7	736,1
$Q_{500}[\text{m}^3/\text{s}]$	762,8	900,5	1156,7	1276,3	733,3	1041,0



Slika 15: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1971-2000

Preglednica 12: Prikaz rezultatov testov za obdobje 1971-2000

ime testa	G	PE3	GEV	GL	LN	LP3
MAE	23,34	20,25	17,33	17,46	22,66	17,81
MSE	1790,46	1171,78	1250,75	1390,96	2048,62	1233,75
RMSE	42,31	34,23	35,37	37,3	45,26	35,12
r	0,94	0,97	0,97	0,97	0,95	0,97
R2	0,89	0,93	0,95	0,95	0,89	0,94

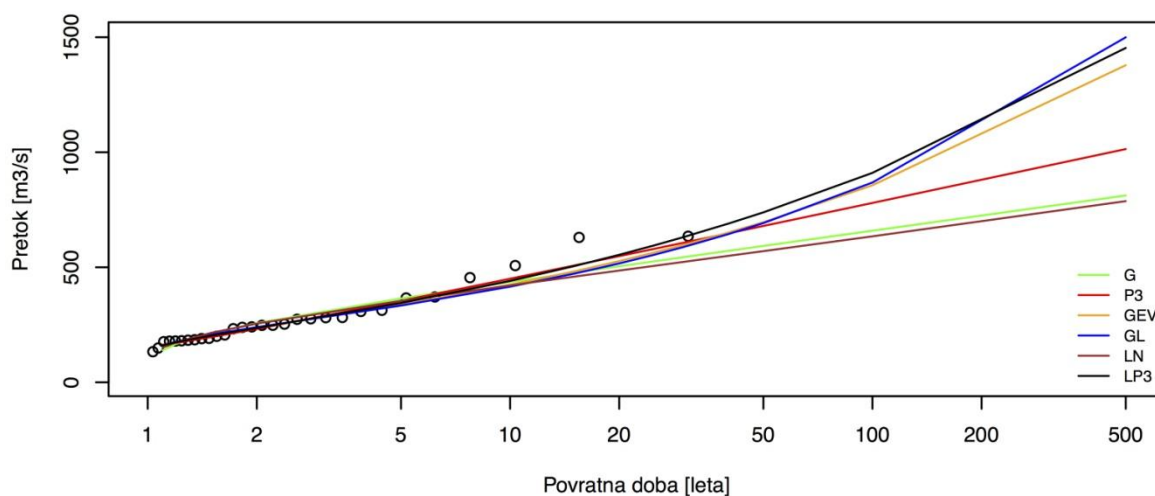
Iz preglednice 12 je razvidno, da se za peto obdobje podatkom najbolj prilega Pearsonova 3 porazdelitev. Kot je že zgoraj omenjeno je najustreznejša tista porazdelitev, pri kateri je rezultat testa najmanjši. Kot merodajni smo uporabili test RMSE. Rezultat Mann–Kendallovega testa je dal vrednost testne statistike »tau« 0,242 in p-vrednost 0,064. Tako lahko za obdobje od leta 1971 do 2000 s 5 % stopnjo značilnosti trdimo, da maksimalni pretoki nimajo statistično značilno naraščajočega trenda.

5.3.1.6 Obdobje 1981-2010

Šesto obravnavano obdobje traja od leta 1981 do leta 2010. Rezultati verjetnostne analize tega obdobja so prikazani v preglednicah 13 in 14 ter na sliki 16.

Preglednica 13: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1981-2010.

	G	P3	GEV	GL	LN	LP3
Q_{10} [m ³ /s]	436,0	450,3	424,2	415,8	421,3	440,8
Q_{50} [m ³ /s]	592,8	679,6	696,1	692,1	570,2	738,7
Q_{100} [m ³ /s]	659,0	779,7	856,5	868,5	634,5	910,5
Q_{500} [m ³ /s]	812,2	1013,9	1378,6	1499,7	787,7	1453,5



Slika 16: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za obdobje 1981-2010

Preglednica 14: Prikaz rezultatov testov za obdobje 1981-2010

ime testa	G	PE3	GEV	GL	LN	LP3
MAE	28,18	16,08	17,57	18,94	26,77	14,8
MSE	1654,71	753,3	1141,46	1350,5	1928,37	771,68
RMSE	40,68	27,45	33,79	36,75	43,91	27,78
r	0,96	0,98	0,98	0,98	0,96	0,98
R2	0,91	0,97	0,96	0,96	0,92	0,97

Iz preglednice 14 je razvidno, da se za šesto obdobje podatkom najbolj prilega Pearsonova 3 porazdelitev. Kot je že zgoraj omenjeno je najustreznejša tista porazdelitev, pri kateri je rezultat testa najmanjši. Kot merodajni smo uporabili test RMSE. Rezultat Mann–Kendallovega testa je dal vrednost testne statistike »tau« -0,002 in p-vrednost 1. Tako lahko za obdobje od leta 1981 do 2010 s 5 % stopnjo značilnosti trdimo, da maksimalni pretoki nimajo statistično značilno padajočega trenda.

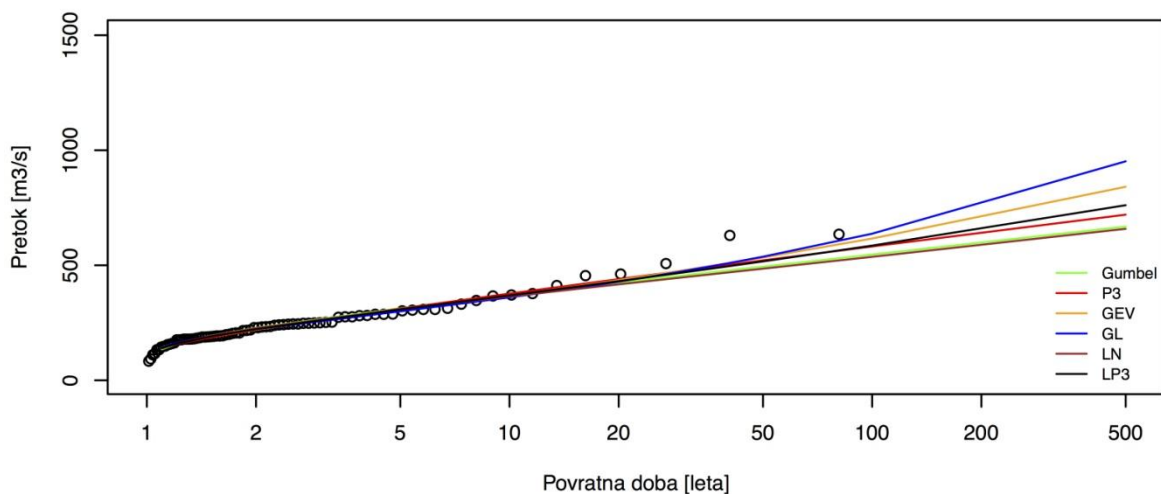
5.3.2 Rezultati verjetnostne analize za celotno obdobje

Rezultati verjetnostne analize visokovodnih konic celotnega obdobja meritev na vodomerni postaji Nazarje na Savinji so prikazani v preglednici 15.

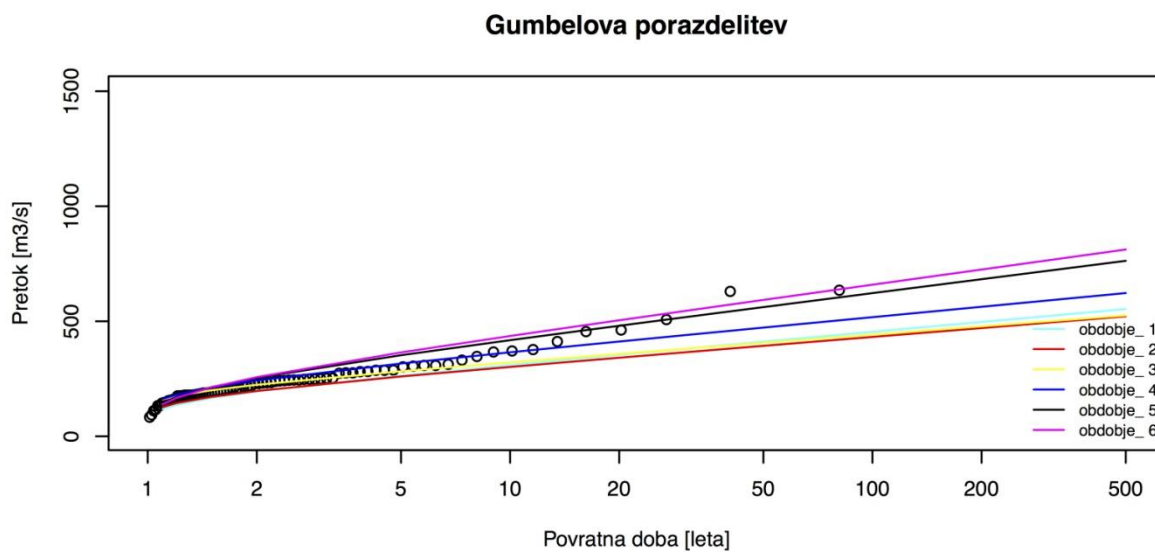
Preglednica 15: Prikaz rezultatov verjetnostne analize visokovodnih konic Savinje v Nazarjih za celotno obdobje celotnega obdobja

	G	P3	GEV	GL	LN	LP3
Q_{10} [m ³ /s]	369,9	376,9	368,0	360,3	364,5	369,0
Q_{50} [m ³ /s]	494,2	521,3	533,8	537,3	485,2	516,8
Q_{100} [m ³ /s]	546,8	581,8	616,3	637,4	536,8	585,5
Q_{500} [m ³ /s]	668,3	720,1	841,3	952,1	658,5	761,1

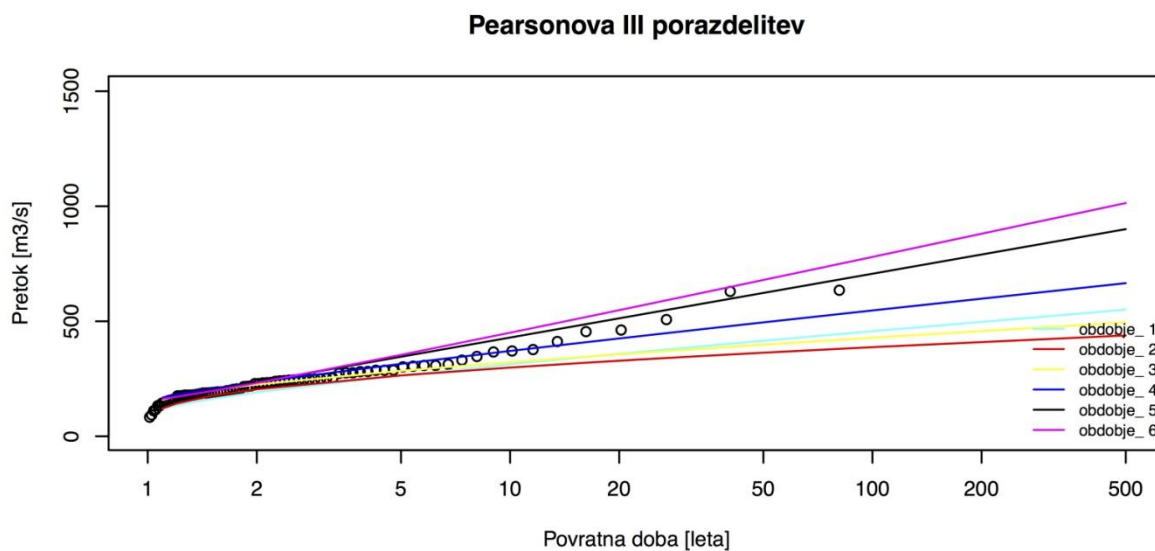
Za potrebe verjetnostne analize smo poleg običajnega grafa, ki prikazuje rezultate verjetnostne analize na sliki 17, naredili še grafe, ki prikazujejo kako se rezultati posameznih porazdelitev obnašajo za posamezna obdobja (slike 18-23).



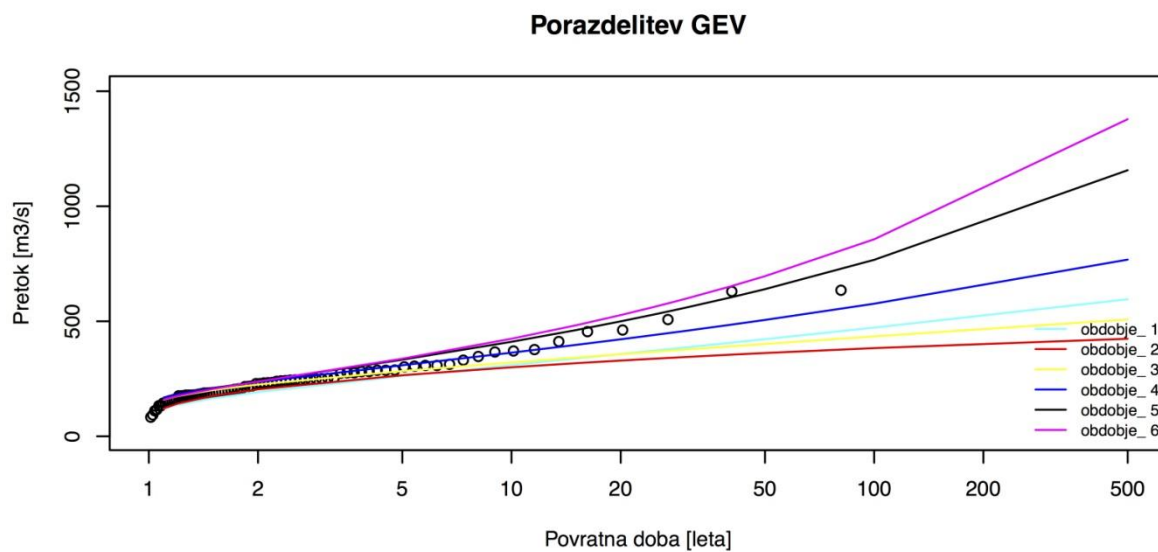
Slika 17: Prikaz rezultatov verjetnostne analize za celotno obdobje meritev



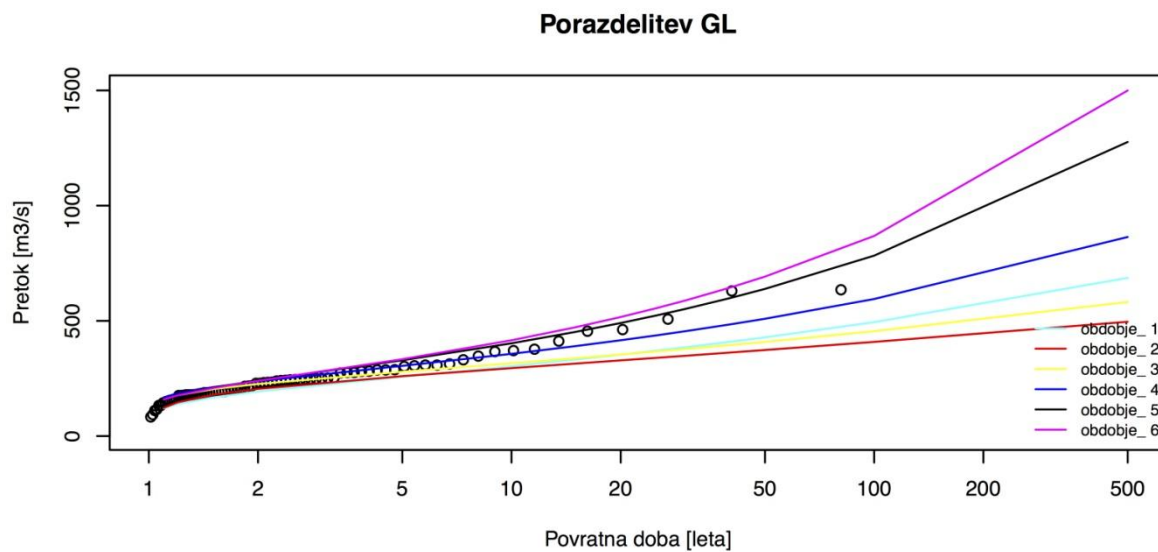
Slika 18: Prikaz rezultatov verjetnostne analize za Gumbelovo porazdelitev za posamezna obdobja



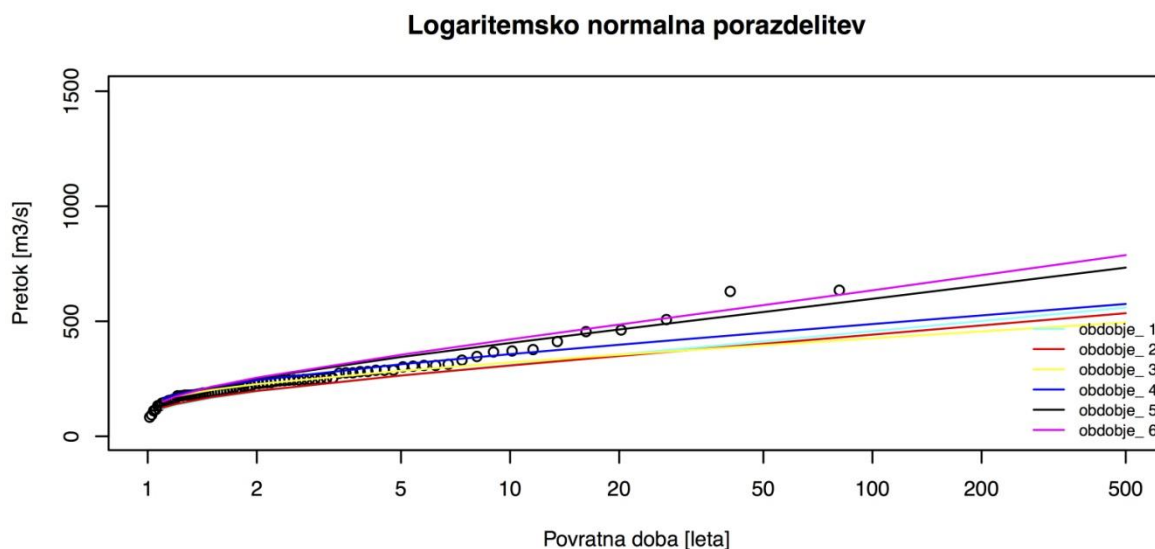
Slika 19: Prikaz rezultatov verjetnostne analize za Pearsonovo III porazdelitev za posamezna obdobja



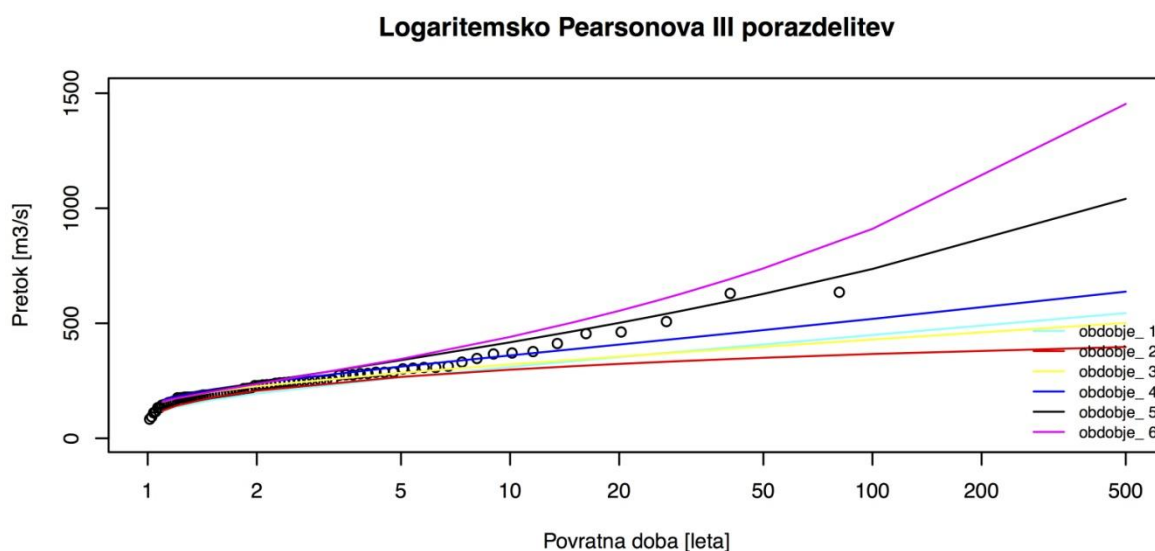
Slika 20: Prikaz rezultatov verjetnostne analize za porazdelitev GEV za posamezna obdobja



Slika 21: Prikaz rezultatov verjetnostne analize za porazdelitev GL za posamezna obdobja

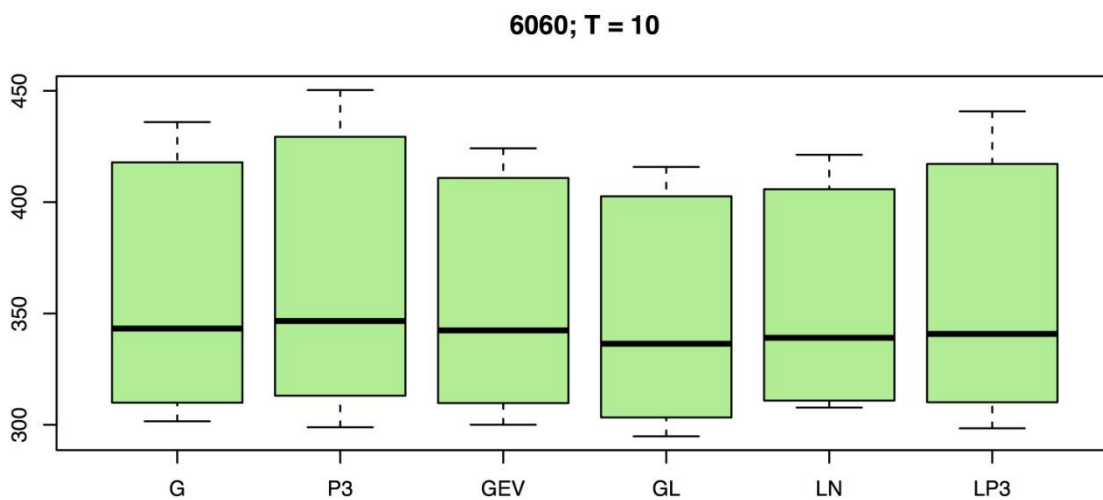


Slika 22: Prikaz rezultatov verjetnostne analize za logaritemsko normalno porazdelitev za posamezna obdobja

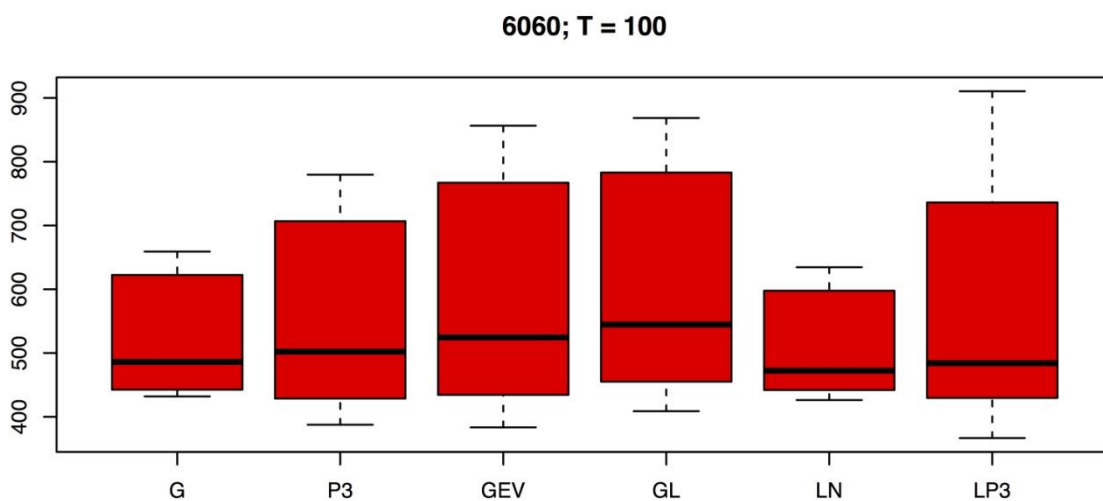


Slika 23: Prikaz rezultatov verjetnostne analize za logaritemsko Pearsonovo III porazdelitev za posamezna obdobja

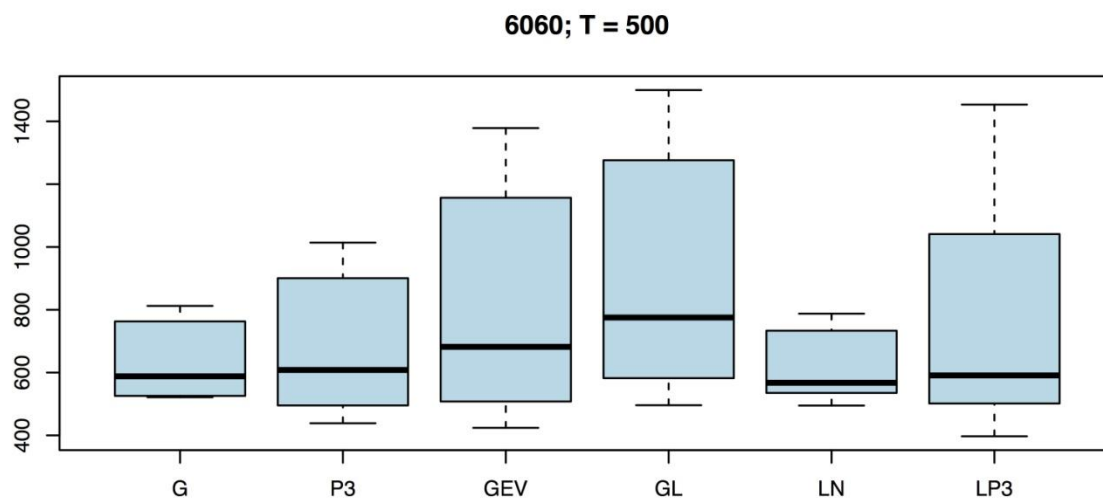
Poleg zgoraj predstavljenih grafov smo za prikaz rezultatov verjetnostnih analiz uporabili še okvire z ročaji (angl. *box plot*) za povratne dobe za posamezne porazdelitve. Okvir z ročaji (Košmelj, 2001) je razdeljen na kvartile in ima pet značilnih točk. Srednja črta okvirja predstavlja srednjo vrednost vzorca, spodnja stranica okvirja predstavlja 25 percentilov, zgornja pa 75 percentilov vzorca, medtem ko sta s črto z ročajem označeni minimalna in maksimalna vrednost vzorca (Brilly in Šraj, 2005).



Slika 24: Rezultati verjetnostnih analiz posameznih obdobj za 10-letno povratno dobo in posamezne porazdelitve



Slika 25: Rezultati verjetnostnih analiz posameznih obdobj za 100-letno povratno dobo in posamezne porazdelitve



Slika 26: Rezultati verjetnostnih analiz posameznih obdobj za 500-letno povratno dobo in posamezne porazdelitve

Rezultat Mann–Kendallove testne statistike »*tau*« je 0,161 in p-vrednost 0,035. Tako lahko za celotno obdobje (1931-2010) s 5 % stopnjo značilnosti trdimo, da imajo maksimalni pretoki statistično značilno naraščajoč trend.

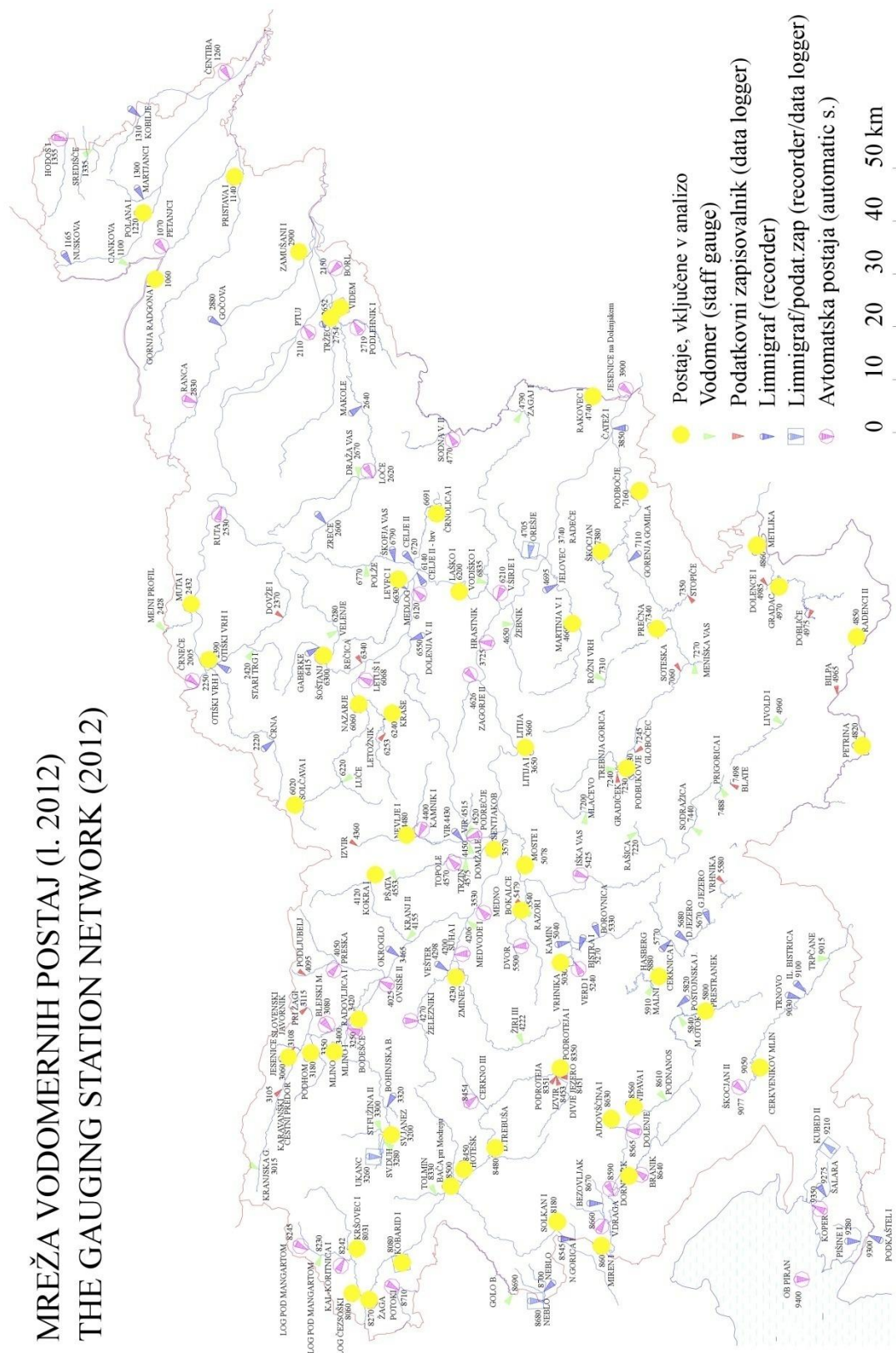
6 VERJETNOSTNA ANALIZA VISOKOVODNIH KONIC NA VODOMERNIH POSTAJAH SLOVENIJE

6.1 Vhodni podatki

Verjetnostne analize visokovodnih konic so bile izvedene na 60 vodomernih postajah Slovenije. Kot merilo za izbiro vodomernih postaj smo izbrali vsaj 50-letni zvezni niz podatkov. Pet vodomernih postaj sicer ima 50-letni ali daljši zvezni niz podatkov, vendar pa nimajo zveznega niza zadnjega obdobja in zato v nalogi niso predstavljene. Tako je na koncu ostalo 55 vodomernih postaj, za katere smo izvedli verjetnostne analize. Obdobje meritev smo na vseh postajah razdelili na 30-letna obdobja s korakom po 10 let, vedno začevši z letnico xyz1. Najkasnejše leto začetka meritev je bilo na vseh izbranih postajah leto 1961 in najkasnejše leto konca meritev leto 2010. Tako smo lahko primerjali projektne pretoke posameznih povratnih dob med obdobji od leta 1961 do 1990 in od 1980 do 2010 med vsemi 55-imi vodomernimi postajami.

Največ vodomernih postaj ima 50-letni zvezni niz podatkov, najdaljši zvezni niz pa ima postaja Litija na reki Savi in sicer od leta 1985, tako smo kot obravnavan niz te postaje vzeli podatke od leta 1901 do 2010 in dobili devet tridesetletnih obdobj.

Na sliki 27 so z rumenim krogom označene vodomerne postaje, ki so bile vključene v analizo.



Slika 27: Mreža vodomernih postaj z označenimi postajami, ki so vključene v analizo

Preglednica 16: Vodomerne postaje, ki so vključene v analizo

ŠIFRA	POSTAJA	VODOTOK	ZALEDJE [km ²]	GKY	GKX	KOTA "0"	ZAČETEK	Obdobje računanja	št. obdobj [30-letna]
1060	Gornja Radgona I	Mura	10197,2	576509	171284	202,338	1946	1951 - 2010	4
1140	Pristava + Pristava I	Ščavnica	272,54	594880	153470	169,768	1954	1961 - 2010	3
1220	Polana + Polana I	Ledava	208,21	587362	171082	191,399	1956	1961 - 2010	3
2250	Otiški Vrh I	Meža	550,89	502357	159305	333,966	1953	1961 - 2010	3
2432	Muta + Muta I	Bistrica	146,55	512910	163144	325,757	1954	1961 - 2010	3
2652	Videm + Videm I	Dravinja	764	569843	136428	209,044	1946	1951 - 2010	4
2754	Tržec + Tržec I	Polskava	188,27	567933	135886	214,315	1953	1961 - 2010	3
2900	Zamušani I	Pesnica	477,8	579855	141640	201,856	1961	1961 - 2010	3
3060	Jesenice	Sava Dolinka	257,56	427697	143744	566,433	1918	1921 - 2010	7
3180	Podhom	Radovna	166,79	430058	139229	566,067	1933	1941 - 2010	5
3200	Sveti Janez	Sava Bohinjka	93,99	414565	126620	524,948	1951	1951 - 2010	4
3400	Mlino I	Jezernica	8,61	431109	135174	467,515	1956	1961 - 2010	3
3420	Radovljica + Radovljica I	Sava	907,97	436120	133220	408,086	1910	1911 - 2010	8
3570	Šentjakob	Sava	2284,8	468075	104515	268,185	1926	1951 - 2010	4
3650	Litija + Litija I	Sava	4821,43	486670	101285	230,444	1895	1901 - 2010	9
4120	Kokra + Kokra I	Kokra	112,34	461770	129206	522,847	1926	1931 - 2010	6
4230	Zminec + Zminec I	Poljanska Sora	305,51	445539	112341	343,313	1954	1961 - 2010	3
4480	Nevlje I	Nevljica	82,03	471438	121041	379,94	1956	1961 - 2010	3
4660	Martinja vas + Martinja vas I	Mirna	164,48	510900	90700	228,92	1954	1961 - 2010	3
4740	Rakovec + Rakovec I	Sotla	559,99	555070	86540	139,21	1926	1951 - 2010	4
4820	Petrina	Kolpa	460	488780	35521	219,683	1952	1961 - 2010	3
4850	Radenci + Radenci I + Radenci II	Kolpa	1191	507555	35610	175,246	1947	1951 - 2010	4
4860	Metlika	Kolpa	2002	525549	54558	127,18	1926	1931 - 2010	6
4970	Gradac	Lahinja	221,32	519295	52380	128,998	1952	1961 - 2010	3
5030	Vrhnika	Ljubljana		446125	91575	284,65	1926	1931 - 2010	6

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 16

5078	Moste + Moste I	Ljubljana	1762,32	465120	101350	281,293	1924	1931 - 2010	6
5540	Razori	Šujica	46,88	456858	100589	298,365	1954	1961 - 2010	3
5800	Prestranek	Pivka		437073	65490	519,852	1954	1961 - 2010	3
5880	Hasberg	Unica		443185	76294	444,98	1926	1931 - 2010	6
6020	Solčava + Solčava I	Savinja	63,7	476784	141780	636,011	1949	1961 - 2010	3
6060	Nazarje	Savinja	457,3	496710	130800	336,97	1926	1931 - 2010	6
6200	Laško + Laško I	Savinja	1663,6	518410	112230	215,025	1907	1951 - 2010	4
6240	Kraše	Dreta	100,84	492677	126735	368,642	1958	1961 - 2010	3
6300	Šoštanj	Paka	131,2	504092	136856	352,983	1920	1951 - 2010	4
6420	Šoštanj	Velunja		505040	136600	361,872	1956	1961 - 2010	3
6630	Levec + Levec I	Ložnica	102,89	517346	122220	240,951	1954	1961 - 2010	3
6691	Črnomica + Črnomica I	Voglajna	54,72	533000	117385	263,07	1959	1961 - 2010	3
7030	Podbukovje	Krka	321,44	483750	81425	259,224	1959	1961 - 2010	3
7160	Podbočje	Krka	2238,12	535726	80170	146,323	1930	1951 - 2010	4
7340	Prečna	Prečna	294,17	508820	74507	163,819	1954	1961 - 2010	3
7380	Škocjan	Radulja	107,96	523015	84856	159,714	1961	1961 - 2010	3
8031	Krašovec + Kršovec I	Soča	158,06	392490	133495	401,541	1945	1951 - 2010	4
8060	Log Čezsoški	Soča	324,74	384435	131180	340,248	1928	1951 - 2010	4
8080	Kobarid I	Soča	437,02	391369	123552	194,859	1941	1951 - 2010	4
8180	Solkan + Solkan I	Soča	1572,8	396180	93920	51,844	1945	1951 - 2010	4
8270	Žaga	Učja	50,21	383125	130645	341,551	1954	1961 - 2010	3
8350	Podroteja + Podroteja I	Idrijca	112,84	425277	94075	327,04	1954	1961 - 2010	3
8450	Hotešk	Idrijca	442,83	407154	110061	160,81	1949	1951 - 2010	4
8480	Dolenja Trebuša	Trebuša	54,7	410105	106265	186,225	1954	1961 - 2010	3
8500	Bača pri Modreju	Bača	142,31	405797	113112	163,825	1948	1951 - 2010	4
8560	Vipava + Vipava I	Vipava	131,9	419730	78080	96,376	1948	1951 - 2010	4
8590	Dornberk	Vipava	468,51	402871	83430	54,298	1954	1961 - 2010	3
8601	Miren + Miren I	Vipava	589,97	392345	84260	35,933	1950	1951 - 2010	4
8630	Ajdovščina I	Hubelj	93,15	415402	83863	107,403	1954	1961 - 2010	3
9050	Cerkvenikov Mlin	Reka	377,89	427181	57164	341,716	1954	1961 - 2010	3

V preglednici 16 so predstavljene vse vodomerne postaje, ki so obravnavane v analizi s pripadajočo velikostjo zaledja, Gauss-Krügerjevimi koordinatami, koto »0« , začetkom opravljanja meritev in našim obravnavanim obdobjem ter številom 30-letnih obdobji.

6.2 Mann-Kendallov statistični test trenda

V sklopu analiz smo najprej ugotavljali prisotnost trenda v podatkih maksimalnih pretokov vseh posameznih vodomernih postaj za celotna obdobja računanja. V preglednici 17 so predstavljeni rezultati Mann-Kendallovega testa. »Tau« predstavlja vrednost testne statistike, p-vrednost pa vrednost, ki pove ali lahko ničelno hipotezo z izbrano stopnjo značilnosti zavrnemo ali je ne moremo. Vrednost izbrane stopnje značilnosti je 0.05. Če je p-vrednost manjša od izbrane stopnje značilnosti (0,05) lahko ničelno hipotezo (H_0), ki trdi, da trend ni prisoten, zavrnemo z izbrano stopnjo značilnosti in sprejmemo alternativno domnevo (H_1) in trdimo, da je trend statistično značilen. Glede na predznak pri testni statistiki pa lahko ugotovimo ali je trend naraščajoč ali padajoč. V primeru, da je p-vrednost večja od izbrane stopnje značilnosti (0,05), pa ničelne hipoteze (H_0) ne moremo zavrniti z izbrano stopnjo značilnosti. To lahko interpretiramo, kot da ni prisotnega statistično značilnega trenda. Trend je sicer lahko prisoten, vendar pa ni statistično značilen. Rečemo lahko, da z izbrano stopnjo značilnosti ne moremo trditi, da je trend statistično značilen (padajoč, naraščajoč).

Preglednica 17: Prikaz rezultatov Mann-Kendallovega testa za obravnavane vodomerne postaje

ŠIFRA	POSTAJA	VODOTOK	tau	P-vrednost	STATISTIČNA ZNAČILNOST
1060	Gornja Radgona I	Mura	0,0469	0,6010	ni statistično značilno naraščajočega trenda
1140	Pristava + Pristava I	Ščavnica	0,1538	0,1177	ni statistično značilno naraščajočega trenda
1220	Polana + Polana I	Ledava	-0,1005	0,3075	ni statistično značilno padajočega trenda
2250	Otiški Vrh I	Meža	-0,1193	0,2251	ni statistično značilno padajočega trenda
2432	Muta + Muta I	Bistrica	-0,1235	0,2095	ni statistično značilno padajočega trenda
2652	Videm + Videm I	Dravinja	0,1545	0,0827	ni statistično značilno naraščajočega trenda
2754	Tržec + Tržec I	Polskava	0,2247	0,0219	statistično značilno naraščajoč trend
2900	Zamušani I	Pesnica	-0,0253	0,8018	ni statistično značilno padajočega trenda
3060	Jesenice	Sava Dolinka	0,1745	0,0151	statistično značilno naraščajoč trend
3180	Podhom	Radovna	-0,0182	0,8274	ni statistično značilno padajočega trenda
3200	Sveti Janez	Sava Bohinjka	0,0622	0,4869	ni statistično značilno naraščajočega trenda
3400	Mlino I	Jezernica	0,1530	0,1197	ni statistično značilno naraščajočega trenda
3420	Radovljica + Radovljica I	Sava	0,1234	0,0697	ni statistično značilno naraščajočega trenda
3570	Šentjakob	Sava	0,1396	0,1166	ni statistično značilno naraščajočega trenda
3650	Litija + Litija I	Sava	-0,0372	0,5663	ni statistično značilno padajočega trenda
4120	Kokra + Kokra I	Kokra	0,1076	0,1602	ni statistično značilno naraščajočega trenda
4230	Zminec + Zminec I	Poljanska Sora	0,0400	0,6880	ni statistično značilno naraščajočega trenda
4480	Nevlje I	Nevljica	0,2547	0,0095	statistično značilno naraščajoč trend

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 17

4660	Martinja vas + Martinja vas I	Mirna	0,0964	0,3277	ni statistično značilno naraščajočega trenda
4740	Rakovec + Rakovec I	Sotla	0,1256	0,1586	ni statistično značilno naraščajočega trenda
4820	Petrina	Kolpa	-0,2475	0,0115	statistično značilno padajoč trend
4850	Radenci + Radenci I + Radenci II	Kolpa	-0,0837	0,3484	ni statistično značilno padajočega trenda
4860	Metlika	Kolpa	0,1827	0,0167	statistično značilno naraščajoč trend
4970	Gradac	Lahinja	-0,0752	0,4465	ni statistično značilno padajočega trenda
5030	Vrhnika	Ljubljana	-0,2618	0,0006	statistično značilno padajoč trend
5078	Moste + Moste I	Ljubljana	0,1200	0,1172	ni statistično značilno naraščajočega trenda
5540	Razori	Šujica	-0,0483	0,6275	ni statistično značilno padajočega trenda
5800	Prestranek	Pivka	-0,1524	0,1216	ni statistično značilno padajočega trenda
5880	Hasberg	Unica	-0,1704	0,0259	statistično značilno padajoč trend
6020	Solčava + Solčava I	Savinja	-0,0115	0,9134	ni statistično značilno padajočega trenda
6060	Nazarje	Savinja	0,1611	0,0351	statistično značilno naraščajoč trend
6200	Laško + Laško I	Savinja	-0,0249	0,7839	ni statistično značilno padajočega trenda
6240	Kraše	Dreta	-0,2522	0,0102	statistično značilno padajoč trend
6300	Šoštanj	Paka	-0,1578	0,0762	ni statistično značilno padajočega trenda
6420	Šoštanj	Velunja	-0,6119	0,0002	statistično značilno padajoč trend
6630	Levec + Levec I	Ložnica	0,0932	0,3445	ni statistično značilno naraščajočega trenda
6691	Črnlolica + Črnlolica I	Voglažna	-0,3312	0,0007	statistično značilno padajoč trend
7030	Podbukovje	Krka	0,0540	0,5865	ni statistično značilno naraščajočega trenda
7160	Podbočje	Krka	-0,0919	0,3043	ni statistično značilno padajočega trenda
7340	Prečna	Prečna	0,1653	0,0941	ni statistično značilno naraščajočega trenda
7380	Škocjan	Radulja	0,3569	0,0003	statistično značilno naraščajoč trend
8031	Krašovec + Kršovec I	Soča	-0,0023	0,9847	ni statistično značilno padajočega trenda
8060	Log Čezsoški	Soča	-0,0701	0,4327	ni statistično značilno padajočega trenda
8080	Kobarid I	Soča	0,1945	0,0287	statistično značilno naraščajoč trend
8180	Solkan + Solkan I	Soča	0,0910	0,3075	ni statistično značilno naraščajočega trenda
8270	Žaga	Učja	-0,0621	0,5304	ni statistično značilno padajočega trenda
8350	Podroteja + Podroteja I	Idrijca	-0,1047	0,2880	ni statistično značilno padajočega trenda
8450	Hotešk	Idrijca	0,0623	0,4869	ni statistično značilno naraščajočega trenda
8480	Dolenja Trebuša	Trebuša	-0,2680	0,0064	statistično značilno padajoč trend
8500	Bača pri Modreju	Bača	0,0226	0,8035	ni statistično značilno naraščajočega trenda
8560	Vipava + Vipava I	Vipava	0,1167	0,1909	ni statistično značilno naraščajočega trenda
8590	Dornberk	Vipava	-0,0417	0,6757	ni statistično značilno padajočega trenda
8601	Miren + Miren I	Vipava	0,0871	0,3291	ni statistično značilno naraščajočega trenda
8630	Ajdovščina I	Hubelj	-0,0785	0,4268	ni statistično značilno padajočega trenda
9050	Cerkvenikov Mlin	Reka	-0,0294	0,7697	ni statistično značilno padajočega trenda

Največ postaj ima trend, ki ni statistično značilno padajoč (21 vodomernih postaj), sledijo postaje, ki nimajo statistično značilno naraščajočega trenda (20 vodomernih postaj), potem pa postaje, ki imajo

statistično značilno naraščajoč (7 vodomernih postaj) in statistično značilno padajoč trend (7 vodomernih postaj). Iz slike 28 je razvidno, kje se nahajajo posamezne postaje z določenimi trendi. Iz razporeditve postaj je razvidno, da v Sloveniji so vodomerne postaje z določenimi trendi razporejene precej naključno.



Slika 28: Prikaz rezultatov Mann-Kendallovega testa trendov

6.3 Rezultati verjetnostnih analiz visokovodnih konic za posamezna 30-letna obdobja na vodomernih postajah Slovenije

V preglednici 18 so predstavljeni projektni pretoki obravnavanih vodomernih postaj 10-, 100- in 500-letnih povratnih dob (T10, T100 in T500) za obdobji med leti 1961 - 1990 in 1981 - 2010 in porazdelitev, ki se najbolj prilega podatkom posamezne postaje. Izbrana je bila tako, da smo najprej ugotovili, katera porazdelitev se najbolj prilega posameznemu 30-letnemu obdobju. Za porazdelitev, ki se najbolj prilega celotnemu obdobju podatkov pa smo izbrali tisto, ki se največkrat pojavi pri obravnavanih 30-letnih obdobjih.

Preglednica 18: Rezultati verjetnostne analize obravnavanih vodomernih postaj za določene povratne dobe

ŠIFRA	POSTAJA	VODOTOK	T10		T100		T500		IZBRANA PORAZDELITEV
			[1961 - 1990]	[1981 - 2010]	[1961 - 1990]	[1981 - 2010]	[1961 - 1990]	[1981 - 2010]	
1060	Gornja Radgona I	Mura	1135,1	1081,6	1497,0	1425,3	1673,7	1604,9	LP3
1140	Pristava + Pristava I	Ščavnica	39,9	54,3	52,2	64,6	58,8	67,2	LP3
1220	Polana + Polana I	Ledava	60,0	54,7	100,2	79,4	128,2	90,8	LP3
2250	Otiški Vrh I	Meža	261,2	222,0	450,9	374,8	617,0	509,4	LP3
2432	Muta + Muta I	Bistrica	34,8	30,5	60,8	49,2	83,6	63,5	LP3
2652	Videm + Videm I	Dravinja	227,3	228,7	352,9	352,9	445,2	443,8	LN
2754	Tržec + Tržec I	Polskava	53,2	57,9	97,9	65,8	135,6	67,6	LP3
2900	Zamušani I	Pesnica	116,8	112,7	186,5	139,4	237,3	148,0	LP3
3060	Jesenice	Sava Dolinka	142,2	135,4	289,5	245,8	441,7	347,5	LP3
3180	Podhom	Radovna	101,2	91,4	130,5	119,3	147,6	136,4	P3
3200	Sveti Janez	Sava Bohinjka	170,3	142,3	271,4	197,6	351,7	233,9	LP3
3400	Mlino I	Jezernica	3,3	3,1	5,6	5,3	7,3	7,2	LP3
3420	Radovljica + Radovljica I	Sava	655,3	602,6	985,8	842,1	1235,1	1003,1	LP3
3570	Šentjakob	Sava	1255,7	1258,1	1538,3	1690,3	1660,7	1950,1	GEV
3650	Litija + Litija I	Sava	1842,5	1871,8	2394,4	2985,8	2705,7	3917,7	LP3
4120	Kokra + Kokra I	Kokra	154,5	140,5	193,0	197,7	209,1	232,5	LP3
4230	Zminec + Zminec I	Poljanska Sora	237,9	241,7	346,2	335,6	435,7	412,4	GL
4480	Nevlje I	Nevljica	43,1	57,5	74,6	82,8	106,6	99,2	LP3

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 18

4660	Martinja vas + Martinja vas I	Mirna	57,1	56,2	88,2	83,2	118,2	109,2	GL
4740	Rakovec + Rakovec I	Sotla	218,9	227,5	359,0	332,3	470,9	390,1	LP3
4820	Petrina	Kolpa	621,6	498,4	767,8	529,0	839,1	535,4	GEV
4850	Radenci + Radenci I + Radenci II	Kolpa	914,3	813,1	1102,9	867,7	1208,9	883,1	P3
4860	Metlika	Kolpa	1034,2	979,2	1248,2	1015,2	1360,7	1020,4	GEV
4970	Gradac	Lahinja	85,3	73,7	112,3	81,5	132,4	85,2	GL
5030	Vrhnika	Ljubljana	96,4	106,7	98,9	124,3	100,0	138,4	GL
5078	Moste + Moste I	Ljubljana	312,1	310,7	334,3	369,2	341,6	404,8	GEV
5540	Razori	Šujica	24,5	25,9	34,2	40,8	42,8	55,4	GL
5800	Prestranek	Pivka	20,7	26,2	28,9	88,0	35,1	215,4	LP3
5880	Hasberg	Unica	85,9	81,4	104,2	103,4	121,0	125,4	GL
6020	Solčava + Solčava I	Savinja	66,1	72,2	111,5	125,5	147,0	168,2	LN
6060	Nazarje	Savinja	356,9	415,8	594,9	868,5	864,0	1499,7	GL
6200	Laško + Laško I	Savinja	1042,4	1054,1	1509,8	1843,0	1830,2	2560,7	LP3
6240	Kraše	Dreta	185,4	192,9	261,8	332,7	316,9	447,9	LP3
6300	Šoštanj	Paka	84,0	71,9	159,9	112,1	246,8	144,0	GEV
6420	Šoštanj	Velunja	22,2	8,3	33,2	15,0	40,0	19,6	P3
6630	Levec + Levec I	Ložnica	75,9	89,4	86,9	105,7	89,9	110,3	LP3
6691	Črnomla + Črnomla I	Voglajna	55,4	40,3	118,6	123,6	177,1	223,2	LN
7030	Podbukovje	Krka	68,1	76,0	86,6	107,9	101,0	134,8	GL
7160	Podbočje	Krka	365,3	371,2	407,4	407,5	425,2	419,0	GEV
7340	Prečna	Prečna	19,9	24,6	21,1	40,0	21,5	57,1	GEV
7380	Škocjan	Radulja	31,0	42,6	39,2	65,1	44,4	85,6	GL
8031	Krašovec + Kršovec I	Soča	211,4	193,5	326,3	243,2	429,6	274,1	GL
8060	Log Čezsoški	Soča	448,3	424,0	576,9	553,1	657,3	639,8	GL
8080	Kobarid I	Soča	545,8	623,6	729,0	798,9	877,1	917,4	GL
8180	Solkan + Solkan I	Soča	1992,2	2000,8	2417,2	2530,5	2592,0	2771,9	GEV
8270	Žaga	Učja	169,6	172,5	245,9	261,5	297,6	327,7	LP3
8350	Podroteja + Podroteja I	Idrijca	274,5	286,9	350,7	407,8	394,2	483,9	P3
8450	Hotešk	Idrijca	733,9	733,1	976,0	1085,8	1134,6	1336,1	LN
8480	Dolenja Trebuša	Trebuša	71,9	59,1	136,0	88,0	206,2	108,8	LP3
8500	Bača pri Modreju	Bača	208,4	226,7	238,8	321,6	248,4	375,7	LP3
8560	Vipava + Vipava I	Vipava	64,1	69,5	81,7	96,6	96,8	122,3	GL

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 18

8590	Dornberk	Vipava	220,1	233,8	290,0	319,4	338,0	378,1	G
8601	Miren + Miren I	Vipava	317,1	334,1	393,6	436,8	435,4	499,2	GEV
8630	Ajdovščina I	Hubelj	45,0	44,0	58,9	57,9	68,0	66,9	LN
9050	Cerkvenikov Mlin	Reka	266,3	259,0	329,3	314,8	356,6	337,4	GEV

Vidimo lahko, da so za posamezne vodomerne postaje kot najbolj primerne izbrane zelo različne porazdelitve, tudi če postaje pripadajo istemu vodotoku. Še najboljše ujemanje je opazno v Pomurju in Podravju, kjer večini postaj najbolj ustreza logaritemsko Pearsonova III porazdelitev. Maksimalnim pretokom se najpogosteje prilega logaritemsko Pearsonovo 3 porazdelitev (22 vodomernih postaj), sledi porazdelitev GL (13 vodomernih postaj), porazdelitev GEV (10 vodomernih postaj), logaritemsko normalna (5 vodomernih postaj), Pearsonova 3 porazdelitev (4 vodomerne postaje), najbolj redko pa Gumbelova porazdelitev (1 vodomerna postaja).

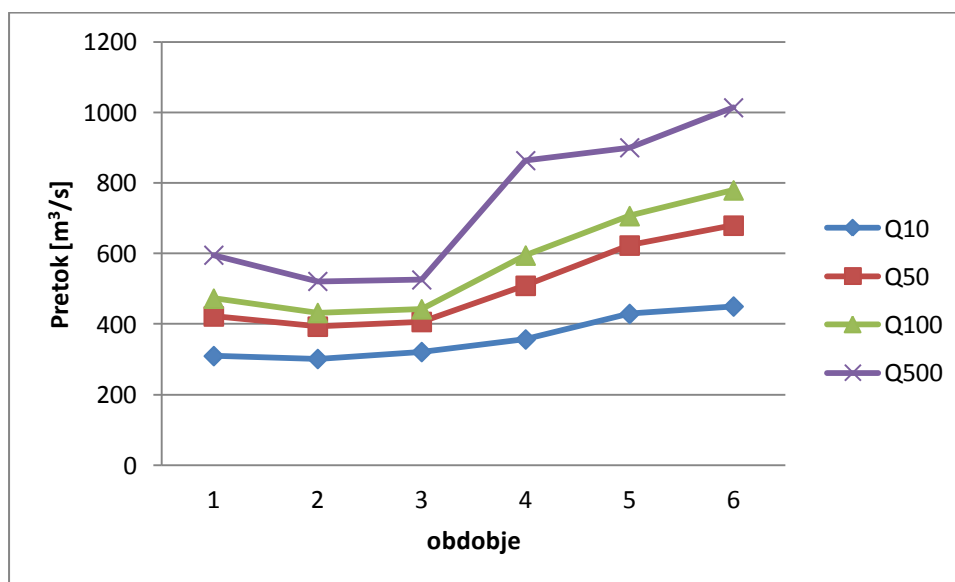
7 ANALIZA IN PRIMERJAVA REZULTATOV

7.1 Analiza in primerjava rezultatov verjetnostnih analiz za vodomerno postajo Nazarje na reki Savinji

Preglednica 19: Primerjava projektni pretoki izbranih povratnih dob vseh 30-letnih obdobj vodomerne postaje Nazarje na reki Savinji

	1931-1960	1941-1970	1951-1980	1961-1990	1971-2000	1981-2010
Q10	309,7	301,6	321,3	356,9	429,4	450,3
Q50	422,2	393,2	406,5	509,0	623,3	679,6
Q100	472,5	432,0	442,5	594,9	706,7	779,7
Q500	595,8	521,5	525,7	864,0	900,5	1013,9
PORAZDELITEV	GEV	GL	G	GL	P3	P3

V preglednici 19 so predstavljeni ocenjeni projektni pretoki izbranih povratnih dob posameznih 30-letnih obdobj vodomerne postaje Nazarje. Vidimo, da posamezni projektni pretoki od leta 1951 naprej rastejo, medtem, ko so do leta 1951 rahlo padali, kar je razvidno tudi iz krivulj na sliki 29. V preglednici je predstavljena tudi najustreznejša porazdelitev posameznega obdobja. Glede na to, da sta dve porazdelitvi zastopani po dvakrat smo upoštevali drugi kriterij, ki upošteva najboljšo porazdelitev celotnega obdobja. Test je pokazal, kot najustreznejšo porazdelitev GL.



Slika 29: Prikaz spreminjanja projektnih pretokov izbranih povratnih dob skozi 30-letna obdobja meritev

7.2 Analiza in primerjava rezultatov verjetnostnih analiz za vodomerne postaje Slovenije

Preglednica 20 prikazuje kako in za koliko se posamezni projektni pretoki izbranih povratnih dob razlikujejo med obdobji 1961-1991 in 1981-2010. Pri 22 vodomernih postajah projektni pretoki padajo in pri 22 vodomernih postajah rastejo, medtem ko pri 11 vodomernih postajah rastejo ali padajo in obratno. Primer tega je Dravinja na vodomerni postaji Videm, kjer pri povratni dobi T10 projektni pretok med obravnavanima obdobjema raste, pri povratnih dobah T100 in T500 pa pada.

Preglednica 20: Analiza trendov projektnih pretokov izbranih povratnih dob obravnavanih vodomernih postaj

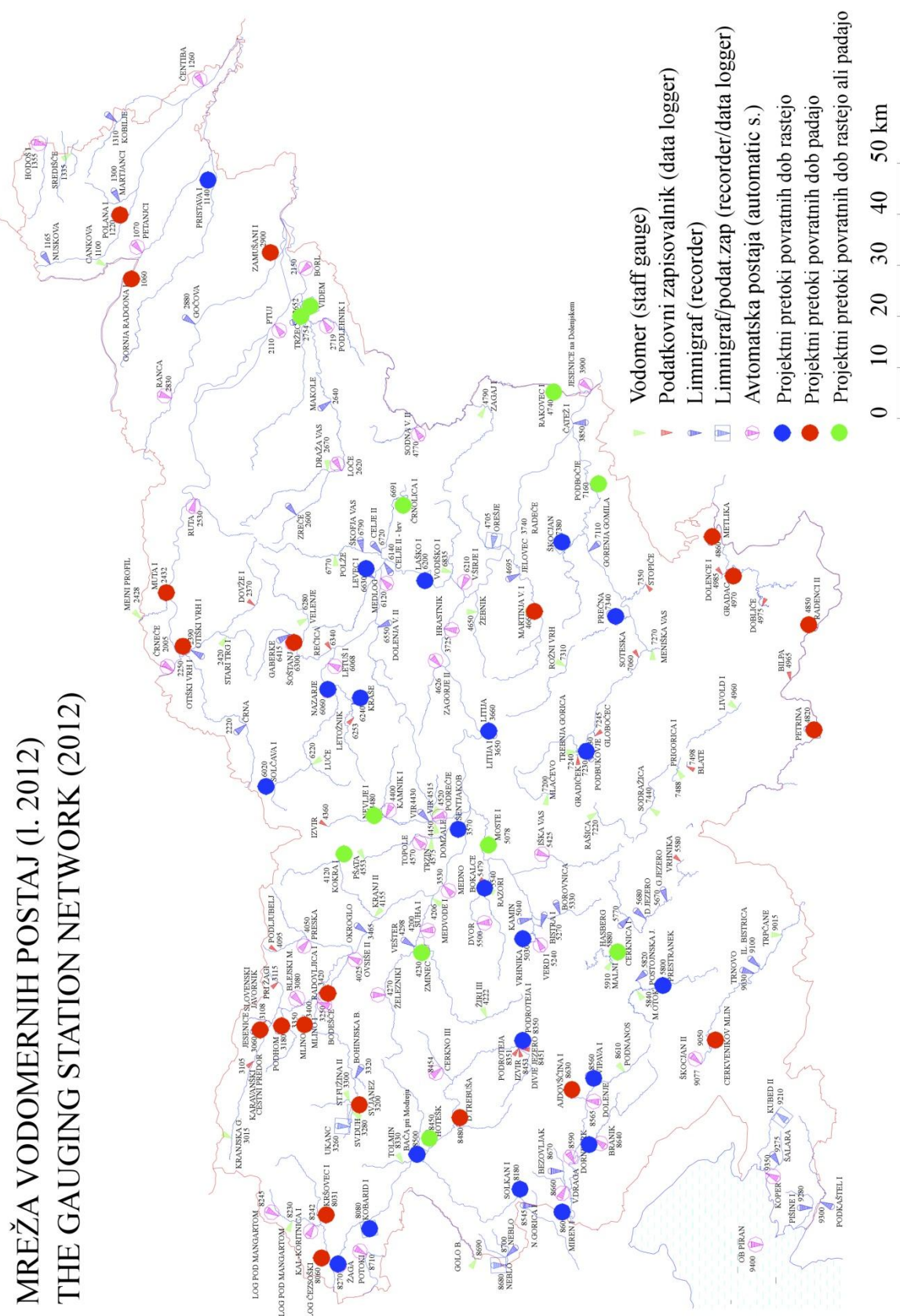
ŠIFRA	POSTAJA	VODOTOK	T10[%]	T100[%]	T500[%]	STANJE
1060	Gornja Radgona I	Mura	-4,71	-4,79	-4,113	pada
1140	Pristava + Pristava I	Ščavnica	35,98	23,70	14,330	raste
1220	Polana + Polana I	Ledava	-8,85	-20,76	-29,123	pada
2250	Otiški Vrh I	Meža	-14,99	-16,89	-17,436	pada
2432	Muta + Muta I	Bistrica	-12,27	-19,06	-24,054	pada
2652	Videm + Videm I	Dravinja	0,58	-0,01	-0,320	raste, pada, pada
2754	Tržec + Tržec I	Polskava	8,84	-32,79	-50,163	raste, pada, pada
2900	Zamušani I	Pesnica	-3,48	-25,23	-37,632	pada
3060	Jesenice	Sava Dolinka	-4,85	-15,10	-21,337	pada
3180	Podhom	Radovna	-9,67	-8,54	-7,591	pada
3200	Sveti Janez	Sava Bohinjka	-16,44	-27,18	-33,486	pada
3400	Mlino I	Jezernica	-7,41	-5,34	-1,311	pada
3420	Radovljica + Radovljica I	Sava	-8,04	-14,57	-18,783	pada
3570	Šentjakob	Sava	0,19	9,88	17,422	raste
3650	Litija + Litija I	Sava	1,59	24,70	44,794	raste
4120	Kokra + Kokra I	Kokra	-9,05	2,42	11,178	pada, raste, raste
4230	Zminec + Zminec I	Poljanska Sora	1,59	-3,06	-5,330	raste, pada, pada
4480	Nevlje I	Nevljica	33,26	10,94	-6,970	raste, raste, pada
4660	Martinja vas + Martinja vas I	Mirna	-1,59	-5,64	-7,665	pada
4740	Rakovec + Rakovec I	Sotla	3,93	-7,44	-17,166	raste, pada, pada
4820	Petrina	Kolpa	-19,82	-31,10	-99,936	pada
4850	Radenci + Radenci I + Radenci II	Kolpa	-11,07	-21,33	-26,951	pada
4860	Metlika	Kolpa	-5,32	-18,66	-25,006	pada
4970	Gradac	Lahinja	-13,59	-27,45	-35,663	pada
5030	Vrhnika	Ljubljana	10,69	25,71	38,311	raste
5078	Moste + Moste I	Ljubljana	-0,44	10,45	18,516	pada, raste, raste
5540	Razori	Šujica	5,80	19,28	29,460	raste
5800	Prestranek	Pivka	26,32	204,50	513,348	raste

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 20

5880	Hasberg	Unica	-5,26	-0,78	3,615	pada, pada, raste
6020	Solčava + Solčava I	Savinja	9,25	12,59	14,403	raste
6060	Nazarje	Savinja	16,51	46,00	73,581	raste
6200	Laško + Laško I	Savinja	1,13	22,07	39,911	raste
6240	Kraše	Dreta	4,05	27,10	41,329	raste
6300	Šoštanj	Paka	-14,44	-29,91	-41,661	pada
6420	Šoštanj	Velunja	-62,38	-54,87	-51,156	pada
6630	Levec + Levec I	Ložnica	17,80	21,61	22,667	raste
6691	Črnlolica + Črnlolica I	Vogljajna	-27,26	4,22	26,025	pada, raste, raste
7030	Podbukovje	Krka	11,72	24,51	33,489	raste
7160	Podbočje	Krka	1,61	0,02	-1,456	raste. raste, pada
7340	Prečna	Prečna	23,68	89,28	165,685	raste
7380	Škocjan	Radulja	37,38	66,09	92,919	raste
8031	Krašovec + Kršovec I	Soča	-8,44	-25,48	-36,202	pada
8060	Log Čezsoški	Soča	-5,42	-4,14	-2,667	pada
8080	Kobarid I	Soča	14,25	9,58	4,590	raste
8180	Solkan + Solkan I	Soča	0,43	4,69	6,941	raste
8270	Žaga	Učja	1,68	6,33	10,127	raste
8350	Podroteja + Podroteja I	Idrijca	4,50	16,30	22,766	raste
8450	Hotešk	Idrijca	-0,11	11,25	17,765	pada, raste, raste
8480	Dolenja Trebuša	Trebuša	-17,76	-35,31	-47,227	pada
8500	Bača pri Modreju	Bača	8,81	34,68	51,239	raste
8560	Vipava + Vipava I	Vipava	8,36	18,25	26,266	raste
8590	Dornberk	Vipava	6,23	10,11	11,847	raste
8601	Miren + Miren I	Vipava	5,35	10,99	14,663	raste
8630	Ajdovščina I	Hubelj	-2,29	-1,80	-1,548	pada
9050	Cerkvenikov Mlin	Reka	-2,76	-4,40	-5,393	pada

Na sliki 30 je prikazana prostorska razporeditev vodomernih postaj z rastočimi, padajočimi ter rastočimi in padajočimi projektnimi pretoki. Vodomernih postaj z rastočimi projektnimi pretoki je 22, s padajočimi projektnimi pretoki 22 in z neznačilnim trendom 11. Vodomerne postaje s padajočimi, rastočimi in s padajočimi in rastočimi projektnimi pretoki so v Sloveniji razporejene precej naključno. Težko bi zarisali območja, kjer se nahajajo vodomerne postaje z naraščajočimi ali padajočimi projektnimi pretoki. Zelo na grobo pa bi vseeno lahko rekli, da se vodomerne postaje, kjer projektni pretoki padajo nahajajo pretežno na severu in jugu države, medtem ko se vodomerne postaje, kjer projektni pretoki rastejo, nahajajo pretežno v osrednjem pasu Slovenije, od vzhoda do zahoda.



Slika 30: Prikaz trendov projektnih pretokov izbranih povratnih dob obravnavanih vodomernih postaj

8 ZAKLJUČKI

Poplave so naraven in zelo dinamičen pojav, povzročena škoda pa je posledica človeške dejavnosti. Varovanje človeških življenj in zmanjšanje gospodarske škode sta cilja zaščite pred poplavami. S pasivnimi ukrepi za zaščito pred poplavami varujemo pred posledicami, z aktivnimi pa vplivamo na obliko in naravo pojava (zmanjšanje trajanja in velikosti) (Brilly et al., 1999). Kvalitetno in zanesljivo izvedene analize so potrebne za izvajanje učinkovitih vodarskih ukrepov in so pomembne za projektiranje, efektivno planiranje in tudi za obratovanje hidrotehničnih objektov (Bezak, 2012).

Tako lahko z verjetnostnimi analizami visokovodnih konic določimo ogroženost človeških dejavnosti. Verjetnostne analize so osnova tudi za analizo nevarnosti in analizo ranljivosti, slednjo določa cena škode na človeških dejavnostih in lahko opredelimo pojem ogroženosti (Bezak, 2012).

V diplomski nalogi je verjetnostna analiza narejena s podatki izmerjenih pretokov 55 vodomernih postaj Slovenije, ki imajo vsaj 50-letni zvezni niz podatkov zadnjega obdobja (do leta 2010). Vzorce smo oblikovali po metodi letnih maksimumov. Za ocenjevanje parametrov porazdelitve pa smo izbrali metodo momentov L. Metoda momentov L se je pri analizah drugih avtorjev izkazala za najbolj učinkovito (Bezak, 2012; Hosking in Wallis, 1997; Sankarasubramanian in Srinivasan, 1999).

Izvedba Mann-Kendallovega testa na nizih maksimalnih pretokov je pokazala, da ima večina vodomernih postaj statistično neznačilen padajoč ali naraščajoč trend. Iz prostorske razporeditve postaj pa ni razvidnega nekega tipičnega vzorca pojavljanja posameznega trenda, zato lahko rečemo, da so v Sloveniji vodomerne postaje z določenimi trendi razporejene precej naključno.

Pri verjetnostnih analizah smo ugotovili, da se podatkom celotnega računskega obdobja obravnavanih postaj najbolj in najpogosteje prilega logaritemsko Pearsonova 3 porazdelitev (22 vodomernih postaj), najbolj redko pa Gumbelova porazdelitev (1 vodomerna postaja). Za izbiro porazdelitve, ki se najbolj prilega podatkov smo uporabili teste RMSE, MAE, MSE in korelacijski koeficient r .

Primerjava projektnih pretokov izbranih povratnih dob med obdobjema 1961 in 1990 in 1981 in 2010 je pokazala, da se projektni pretoki izbranih povratnih dob na 22 postajah povečujejo, na 22 postajah zmanjšujejo in na 11 postajah nihajo (rastejo in padajo). Nekega točno določenega vzorca razporeditve postaj s posameznimi trendi sicer nismo mogli določiti, vendar v grobem lahko ocenimo, da se postaje, kjer projektni pretoki padajo, nahajajo pretežno na severu in jugu države, medtem ko se vodomerne postaje, kjer projektni pretoki rastejo, nahajajo pretežno v osrednjem pasu Slovenije, od vzhoda do zahoda.

Če bi želeli bolj zanesljive zaključke o vplivu podnebne spremenljivosti na projektne pretoke, bi bilo priporočljivo podobne analize izvesti še z metodo vrednosti konic nad izbrano mejno vrednostjo –

pragom ali POT metoda (angl. *peaks over threshold method*). Vsekakor pa lahko na podlagi naših rezultatov ugotovimo, da je na skoraj polovici obravnavanih vodomernih postaj zaznan naraščajoč trend projektnih pretokov in da je zato v smislu varnosti zelo pomembno, katero obdobje meritev vzamemo za osnovo verjetnostnih analiz. Na osnovi izvedenih analiz v nalogi ugotavljamo, da bi bilo v praksi za oceno projektnih pretokov na postajah z naraščajočim trendom, namesto celotnega obdobja meritev priporočljiveje jemati zadnje 30-letno obdobje meritev, saj lahko v nasprotnem primeru projektne pretoke določene povratne dobe precej podcenimo.

VIRI

Agencija RS za okolje, 2012. Karta vodomernih postaj z imeni in šiframi. <http://www.arso.gov.si/vode/podatki/arhiv/karta2.wmf> (Pridobljeno 28. 5. 2014.)

Agencija RS za okolje, 2014. Mesečni in letni pretoki vodomernih postaj. Ljubljana. http://www.arso.gov.si/vode/podatki/arhiv/hidroloski_arhiv.html (Pridobljeno 15. 4. 2014.)

Beguería, S. 2005. Uncertainties in partial duration series modelling of extremes related to the choice of the threshold value. *Journal of Hydrology* 303, 1-4: 215-230.

Bezak, N. 2012. Analiza visokovodnih konic z metodo vrednosti nad izbranim pragom in z metodo letnih maksimumov. Diplomsko naloga, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba N. Bezak): 106 str.

Bezak, N. 2013. Uvod v R. Navodila za vaje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 23 str.

Brilly, M., Šraj, M. 2005. Osnove hidrologije. Univerzitetni učbenik, 1.izdaja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 309 str.

Brilly, M., Mikoš, M., Šraj, M. 1999. Vodne ujme - varstvo pred poplavami, erozijo in plazovi. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 186 str.

Durkin, M. 2007. The great global warming swindle (film). A Wag TV Production, Velika Britanija.

Đurovič, B. 2012. Določitev in razvrstitev poplavno ogroženih območij v Sloveniji http://www.mko.gov.si/fileadmin/mko.gov.si/pageuploads/podrocja/voda/metodologija_dolocanja_obmocij.pdf (Pridobljeno 28. 4. 2014.)

Frantar, P., Hrvatin, M. 2008. Pretočni režimi. V: Frantar, P. (ur). Vodna bilanca Slovenije 1971-2000 = Water balance of Slovenia 1971-2000. Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana: 43-50.

Gan, T. Y. 1992. Finding trends in air temperature and precipitation for Canada and North-eastern United States. *Proceedings of NHRI Workshop No. 8. National Hydrology Research Institute, Saskatoon, SK*, 57-78.

Geopedia, 2013. <http://www.geopedia.si/> (Pridobljeno 28.5.2014.)

Hirsch, R. M., Slack, J. R. & Smith, R. A. 1982. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resour. Res.* 18, str. 107–121.

Hosking, J. R. M., Wallis, J. R. 1997. Regional frequency analysis: an approach based on L-moments. Cambridge, Cambridge University Press: 224 str.

Jurko, M. 2009. Statistična analiza trendov značilnih pretokov slovenskih rek. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Jurko): 65 str.

Košmelj, K. 2001. Uporabna statistika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta: 249 str.

Kučić, K. 2007. Metoda momentov L pri verjetnostni analizi visokih vod. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba K. Kučić): 85 str.

Kundzewicz, Z. W., Graczyk, D., Maurer, T., Przymusinska, I., Radziejewski, M., Svensson, C., Szwed, M., 2004. Detection of change in world-wide hydrological time series of maximum annual flow. GRDC Report 32. <http://grdc.bafg.de> (Pridobljeno 31. 5. 2014.)

Kundzewicz, Z. W. in Robson, A., 2000. Detecting trends and other changes in hydrological data. World climate programme-Water, WCDMP-45, WMO/TD – št. 1013. Geneva, WMO: 157 str.

Lehman, E.L.; Casella, G. 1998. Theory of Point Estimation (2nd ed.). New York, Springer: 590 str

Maidment, D. 1993. Handbook of hydrology. Austin McGraw-Hill: 1424 str.

McLeod, A.I. 2013. Kendall rank correlation and Mann-Kendall trend test 12: 4-7 <http://cran.r-project.org/web/packages/Kendall/Kendall.pdf> (Pridobljeno 17. 5. 2014.)

Mikoš, M., Kranjc, A., Matičič, B., Müller, J., Rakovec, J., Roš, M., Brilly, M. 2002. Hidrološko izrazje = Terminology in hydrology. *Actahydrotehnica* 20, 32. Ljubljana, str. 103, 105. ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a32_1.pdf (Pridobljeno 13. 5. 2014.)

Robson, A. J., Reed, D. W. 1999. Statistical procedures for flood frequency estimation. Volume 3 of the Flood Estimation Handbook. Center for Ecology & Hydrology: 338 str.

Sankarasubramanian, A., Srinivasan, K. 1999. Investigation and comparison of sampling properties of L-moments and conventional moments. *Journal of Hydrology* 218, 1-2: 13-34.

Swanson, D. A., Tayman, J., Bryan, T. M. 2011. MAPE-R: a rescaled measure of accuracy for cross-sectional subnational population forecasts. *Journal of Population Research* 28, 2-3: 225-243. <http://www.springerlink.com/content/5174672j6091437t/> (Pridobljeno 15. 5. 2014.)

Todorovic, P. 1978. Stochastic models of floods. *Water Resources Research* 14, 2: 345-356.

Turk, G. 2011. Verjetnostni račun in statistika: 246 str. <http://km.fgg.uni-lj.si/PREDMETI/sei/vrs.pdf> (Pridobljeno 13. 5. 2014.)

USWRC, 1981. Guidelines for determining flood flow frequency. United States Water Resources Council, Bulletin 17B, Hydrology Subcommittee. Washington, DC: 185 str. http://water.usgs.gov/osw/bulletin17b/dl_flow.pdf (Pridobljeno 15. 5. 2014.)