

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Vodarstvo in  
komunalno inženirstvo

Kandidat:

**Anton Čotar**

# **Vodna bilanca reke Save - Razvoj algoritma Petton za kalibracijo modela Watbal**

**Diplomska naloga št.: 88**

**Mentor:**  
prof. dr. Mitja Brilly

**Somentor:**  
doc. dr. Mojca Šraj

Ljubljana, 7. 9. 2007

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisan **ANTON ČOTAR** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom: »**ZASNOVA ALGORITMA PETTON ZA AVTOMATSKO KALIBRACIJO MODELA WATBAL**«.

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske separatoteke FGG.

Ljubljana, 23.08.07

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

**UDK:** 556.1(282.243.743Sava)(043.2)

**Avtor:** Anton Čotar

**Mentor:** prof. dr. Mitja Brilly

**Naslov:** Zasnova algoritma Petton za avtomatsko kalibracijo modela Watbal

**Obseg in oprema:** 71 str., 7 pregl., 6 sl., 18 en.

**Ključne besede:** model vodne bilance Watbal, algoritem Petton, kalibracija modela Watbal, povodje reke Save

### **Izvleček**

Diplomska naloga obravnava zasnovo algoritma Petton za avtomatsko kalibracijo modela vodne bilance Watbal. Watbal je bil uporabljen v evropskem UNESCO-vem projektu vodne bilance povodja reke Donave in v projektu vodne bilance povodja reke Save pod imenom Sarib. Najprej je podan splošen opis optimizacijskih metod, nato pa sledi bolj podrobna obravnava modela Watbal. Pri tem se seznanimo z enačbami vodne bilance, ki so vgrajene v model Watbal in simulirajo dinamiko elementov hidrološkega kroga. Podan je opis kalibracije šestih parametrov v Watbalu s pomočjo Excelove Goal-Seek funkcije v kombinaciji z metodo poskusov in napak, ki predstavlja standarden način kalibracije Watbala. Sledi opis algoritma Petton, napisanega v programskem okolju Matlab, ki je bil zasnovan za hitrejšo in učinkovitejšo kalibracijo Watbala in ki bi poiskal optimalne vrednosti parametrov znotraj fizikalno smiselnega parametrskega prostora. Za analizo vodne bilance je bilo izbrano povodje reke Save v Sloveniji, ki smo ga za ta namen razdelili na dvanajst podpovodij. Opisan je postopek pridobivanja in priprave hidroloških in meteoroloških podatkov ter njihova kakovost. Na koncu so podani rezultati kalibracije Watbala za vseh dvanajst podpovodij s pomočjo Pettona in primerjani z rezultati Sariba. Na vseh rezultatih so opravljene osnovne statistične analize odstopanj in napak. Izkaže se, da Petton hitro in učinkovito opravi kalibracijo modela Watbal in je kot tak primeren za nadaljnjo uporabo.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC STRAN INFORMATION**

**UDC:** 556.1(282.243.743Sava)(043.2)  
**Author:** Anton Čotar  
**Supervisor:** prof. dr. Mitja Brilly  
**Title:** **Development of algorithm Petton for automatic calibration of Watbal model**  
**Notes:** 71 p., 7 tab., 6 fig., 18 eq.  
**Key words:** water balance model Watbal, algorithm Petton, calibration of Watbal, Sava river basin

### **Abstract**

The present degree focuses on development of algorithm Petton for automatic calibration of water balance model Watbal. Watbal was used in european UNESCO's project of water balance of the Danube basin and in slovenian project of water balance of the Sava basin under the name Sarib. First there is a general description of optimization methods, then more deeply analysis of Watbal follows. We present Watbal's equations for water balance, which simulate dynamics of elements of hydrological circle. A description of calibration of six Watbal parametres with Excel's Goal-Seek function in combination with method of trials and errors, which is standard way of calibration of Watbal, is given. Then description of algorithm Petton, written in Matlab, which was developed for faster and efficient calibration inside physicaly reasonable parametric space, follows. For water balance analysis slovenian part of Sava river basin was choosen and was divided in twelve subbasins. Description of gathering and preparing of hydrologicay and meteorological data and their quality follows. At the end the results of calibration of Watbal for all twelve subbasins with the help of Petton are given and compared with results of Sarib. On all results basic statistical analysis of deviations and errors are done. It is shown that Petton is quick and effective in calibrating of model Watbal and so it is suitable for further use.

## **ZAHVALA**

## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OPTIMIZACIJSKE METODE IN PROGRAMSKO OKOLJE MATLAB.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1</b>	<b>Modeli in kalibracija.....</b>	<b>2</b>
<b>2.2</b>	<b>Preizkušeni algoritmi.....</b>	<b>4</b>
<b>2.3</b>	<b>Programsko okolje Matlab.....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>WATBAL – MODEL ZA ANALIZO VODNE BILANCE.....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>ALGORITEM PETTON.....</b>	<b>12</b>
<b>4.1</b>	<b>Zagon in rezultati Pettona.....</b>	<b>13</b>
<b>4.2</b>	<b>Algoritem Petton.....</b>	<b>15</b>
<b>4.3</b>	<b>Kritična uporaba Pettona.....</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>POVODJE REKE SAVE.....</b>	<b>17</b>
<b>5.1</b>	<b>Vodotok Sava.....</b>	<b>17</b>
<b>5.2</b>	<b>Delitev povodja Save na podpovodja.....</b>	<b>18</b>
<b>5.3</b>	<b>Meteorološki in hidrološki podatki.....</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>REZULTATI.....</b>	<b>23</b>
<b>6.1</b>	<b>Kakovost podatkov.....</b>	<b>23</b>
<b>6.2</b>	<b>Pričakovane vrednosti parametrov.....</b>	<b>25</b>
<b>6.3</b>	<b>Izračunani parametri.....</b>	<b>26</b>
<b>6.4</b>	<b>Primerjava merjenih in izračunanih mesečnih pretokov</b>	
<b>6.5</b>	<b>Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov</b>	
<b>6.6</b>	<b>Trendi pretokov</b>	
<b>6.7</b>	<b>Analiza ujemanj in napak</b>	

## **6.8 Analiza občutljivosti**

## **7 ZAKLJUČKI**

## **VIRI**

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Pokrovnost in velikost posameznih izbranih podpovodij
Preglednica 2:	Karakteristične nadmorske višine izbranih podpovodij
Preglednica 3:	Pričakovane vrednosti <i>ATSNOW</i> in <i>ATRRAIN</i>
Preglednica 4:	Vrednosti dopoljenih kalibriranih parametrov v primeru petton 1
Preglednica 5:	Vrednosti dopoljenih kalibriranih parametrov v primeru petton 2
Preglednica 6:	Vrednosti parametrov v projektu Sarib
Preglednica 7:	Numerične ocene kvalitete rezultatov



## KAZALO GRAFIKONOV

- Grafikon 1: Delež merjenih podatkov in korelacijski koeficient interpoliranih podatkov o pretokih
- Grafikon 2: Primerjava izračunanih in merjenih mesečnih pretokov za primer Sava Bohinjka za leta 1960 - 2000
- Grafikon 3: Primerjava izračunanih in merjenih mesečnih pretokov za primer Sava Bohinjka za leta 1989 - 1993
- Grafikon 4: Primerjava izračunanih in merjenih mesečnih pretokov za primer Kamniška Bistrica za leta 1960 - 2000
- Grafikon 5: Primerjava izračunanih in merjenih mesečnih pretokov za primer Kamniška Bistrica za leta 1989 - 1993
- Grafikon 6: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Sava Dolinka
- Grafikon 7: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Sava Bohinjka
- Grafikon 8: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Sava-Kranj
- Grafikon 9: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Sora
- Grafikon 10: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Kamniška Bistrica
- Grafikon 11: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Ljubljana
- Grafikon 12: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Sava-Litija
- Grafikon 13: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Savinja-Celje
- Grafikon 14: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Savinja-Veliko Širje

- Grafikon 15: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Sava-Čatež
- Grafikon 16: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Krka-Dvor
- Grafikon 17: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Krka-Podbočje
- Grafikon 18: Relativna odstopanja med merjenimi in izračunanimi povprečnimi mesečnimi pretoki za vsa podpovodja na osnovi algoritma Petton
- Grafikon 19: Relativna odstopanja med merjenimi in izračunanimi povprečnimi mesečnimi pretoki za vsa podpovodja iz projekta Sarib
- Grafikon 20: Relativna odstopanja med merjenimi in izračunanimi povprečnimi mesečnimi pretoki za vsa podpovodja v primeru petton 2
- Grafikon 21: Primerjava povprečnih relativnih odstopanj povprečnih mesečnih pretokov za primer vseh dvanajstih podpovodij in za primer desetih podpovodij brez podpovodja Kamniška Bistrica in Krka-Dvor

## KAZALO SLIK

- Slika 1: Konceptualna shema modela Watbal
- Slika 2: Delovna shema algoritma Petton
- Slika 3: Povodje reke Save na področju stare Jugoslavije
- Slika 4: Izbrana podpovodja reke Save in meteorološke postaje
- Slika 5: Hidrološke postaje pretokov

## **KAZALO PRILOG**

- Priloga A: Algoritem Petton
- Priloga B: Parametrski prostor
- Priloga C: Izračunani parametri z algoritmom Petton za primer petton 1
- Priloga D: Rezultat algoritma Petton
- Priloga E: Model Watbal
- Priloga F: Rezultati – mesečni pretoki
- Priloga G: Dokumentacija modela Watbal

## 1 UVOD

Hidrologija se ukvarja s kroženjem vode v naravi (Maidment, 1992). Je del znanosti, ki preučuje pojavljanje, kroženje in porazdelitev vode na Zemlji, preučuje njene kemijske in fizikalne lastnosti ter njeno povezavo z živo in neživo naravo (Gray, 1970). Sestavni elementi kroženja vode v naravi so precipitacija, taljenje snega, površinski odtok, infiltracija, eksfiltracija, podzemni tok in evapotranspiracija (Ponce, 1989). Preučevanje vodne bilance je zaradi pomembnosti vodnega medija nujno. Na slovenskem ozemlju je bila iz teh motivov opravljena analiza vodne bilance reke Save pod imenom Sarib, ki se je navezovala na evropski projekt analize vodne bilance reke Donave, Basin – Wide Water Balance in the Danube River Basin, pod okriljem UNESCO-vega mednarodnega hidrološkega programa. Za analizo je bil v obeh primerih uporabljen model Watbal (Water Balance Model).

Kalibracija modela Watbal je predstavljala pomemben in dolgotrajen del analiz. Kljub temu pa samem procesu kalibracije vse premalokrat posvečamo pozornost (Dietrich, 2003). To je v hidrologiji poseben in resen problem, saj je kalibracija nemalokrat zelo težavna zaradi kroničnega pomanjkanja meritev. To nas je vodilo k izdelavi algoritma Petton za avtomatsko kalibracijo modela Watbal, ki bi bil sposoben kolikor se da dobro kalibrirati Watbal znotraj fizikalno sprejemljivih meja. To je bil glavni cilj te diplomske naloge. Poleg tega smo tudi statistično analizirali odstopanja simulacij od meritev in opravili primerjavo med rezultati projekta Sarib in novimi rezultati na osnovi uporabe Petton-a.

## 2 OPTIMIZACIJSKE METODE IN PROGRAMSKO OKOLJE MATLAB

### 2.1 Modeli in kalibracija

Model je sistem, matematičen ali fizikalen, ki poskuša simulirati neko realnost in je pri tem bolj ali manj uspešen. Model se razlikuje od teorije ali hipoteze po tem, da ga ob prvem neuspehu ne nujno ovržemo kot nepravilnega. Model ni nepravilen, je le boljša ali slabša aproksimacija realnosti.

Po svojem bistvu modele, ki preučujejo nek sistem, lahko razvrstimo v štiri kategorije (Morton, Suarez, 2003):

- i. Modeli, ki so nekoliko poenostavljene teorije tega sistem.
- ii. Modeli, ki so analogije nekih drugih sistemov, kateri so lahko realni (atom-sončni sistem).
- iii. Modeli, ki povzemajo strukturo podatkov pridobljenih iz tega sistema (posplošitve, statistika).
- iv. Modeli, ki so primeri enostavnih teorij tega sistema.

Vsak model je potrebno kalibrirati, zato da ga lahko uporabimo za analizo konkretnega fizikalnega sistema ali pa nekega specifičnega pojava (Morton, Suarez, 2003). Pregled velike količine literature na temo modeliranja, kamor spada tudi modeliranje hidroloških pojavov, je pokazal, da modelatorji posvečajo svojo pozornost predvsem modeliranju samemu, zelo malo pa procesu kalibracije, ki pa je mnogokrat zelo težavno, dolgotrajno in odgovorno delo (Dietrich, 2003). Uspešna kalibracija modela je zelo pomembna, saj so brez nje smiselne simulacije pojavov nemogoče.

V tej diplomski nalogi izdelan algoritem Petton za namen avtomatske kalibracije modela Watbal izvede numerično optimizacijo. Optimizacija ima v inženirstvu in znanosti nasploh vedno večjo vlogo, zato v nadaljevanju sledi nekaj besed o numerični optimizaciji s pomočjo računalnika.

V osnovnem optimizacijskem problemu imamo funkcijo ene ali več spremenljivk, pri čemer je naš cilj poiskati tiste vrednosti teh spremenljivk, pri katerih zavzame funkcija najmanjšo ali največjo vrednost, torej ekstremno vrednost (Press in sod., 1989). Takšno funkcijo imenujemo kriterijalna ali objektivna funkcija. Poleg same funkcije imamo lahko tudi dodatne pogoje za spremenljivke.

$$\begin{aligned} f(\mathbf{x}^*) &= \text{ekstrem za } \mathbf{x}^* \in \mathbf{R}^n \text{ z omejitvami} \\ \mathbf{g}_i(\mathbf{x}^*) &\leq 0, i \in \mathbf{I} = \{1, \dots, m\} \\ \mathbf{h}_j(\mathbf{x}^*) &= 0, j \in \mathbf{J} = \{1, \dots, r\} \end{aligned} \tag{1}$$

Osnovne ideje pri optimizaciji so (Press in sod., 1989):

- i. Optimizacija naj bo čim hitrejša, čim cenejša in naj zahteva čim manj procesorskega spomina.
- ii. Metoda naj čim manjkrat izračuna vrednost objektivne funkcije.
- iii. Optimalne metode za optimizacijo ni.
- iv. Izognitev lokalnim ekstremom je skoraj nemogoča.

Mnogokrat programerji v želji po divjem programiranju izdelajo preveč kompleksen algoritem. Pravilo, ki ga je potrebno in smiselno upoštevati je tudi, da naj bo algoritem kolikor se da enostaven.

Press in sod. (1989) opozarjajo na to, da je največji problem pri optimizaciji izognitev lokalnim ekstremom. Vse metode lahko končajo v lokalnih ekstremih in tako ne najdejo globalnega. Najbolje se je držati utečenih nasvetov (Press in sod., 1989):

- i. Poišči lokalne ekstreme začenši z različnih začetnih vrednosti in izberi najbolj ekstremne.
- ii. Perturbiraj lokalni ekstrem tako, da se odmakneš za končen korak in pogledaš, če te tvoj algoritem vrne v isti ekstrem.

Osnovne optimizacijske metode so Downhill Simplex Method, Direction Set Methods, Conjugate Gradient Methods, Variable Metrix Methods in Method of Simulated Annealing. Zelo priročna literatura, kjer so na zelo berljiv način opisane vse te metode, je priljubljen priročnik Numerical Recipies avtorjev Pressa in sod. (1989), kjer poleg razumljive razlage vsake od metod najdemo tudi računalniške algoritme zanje. Natančneje pa so metode opisane v Bronštejnem matematičnem priročniku.

V splošnem se navedene metode med seboj ločijo po tem, ali zahtevajo le izračune objektivne funkcije ali pa tudi njenih odvodov. Ločijo se tudi po zahtevnosti procesorskega spomina, ki je pri nekaterih metodah reda  $n$ , kjer je  $n$  število podatkov, pri drugih pa reda  $n^2$  (Press in sod., 1989).

Metode simuliranega ohlajanja (Simulated Annealing) so precej nove in obljublajo uspešno kljubovanje lokalnim ekstremom. Temeljijo na ideji termodinamskega ohlajanja (Press in sod., 1989), kjer poskušajo počasi priti do ekstrema tako kot kapljevina počasi zmrzuje.

## 2.2 Preizkušeni algoritmi

Med izdelovanjem diplomske naloge smo preizkusili več algoritmov, ki smo si jih sami zamislili.

Algoritem 1 – Tu smo poskušali optimizirati tako, da smo v vsaki celici parametrskega prostora izračunali vrednost objektivne funkcije in poiskali najmanjšo med njimi.



Algoritem 2 – Izbrali smo si neko število naključnih začetnih celic in iz njih začeli sprehod do lokalnega minimuma tako, da smo se iz trenutne celice vedno premaknili v tisto izmed sosednjih, v kateri je bila vrednost objektivne funkcije najmanjša. V dveh dimenzijah je ideja analogna polju z vrtačami, na katero na slepo mečemo žogo. Pri vsakem metu se bo žoga skotalila v eno od vrtač. Če bomo dovoljkrat vrgli žogo, bomo imeli veliko možnost, da žoga konča v najgloblji vrtači.

Algoritem 3 – Je izpopolnjen algoritem 2, kjer smo dodali idejo toka vodnih kapljic po vetrobranskem steklu. Če se pot iz neke začetne celice dotakne stare poti, ki pripada neki drugi začetni celici, se nova in stara pot združita in nadaljevanje računa ni potrebno, saj bomo na koncu prišli v že najdeni lokalni minimum. Analogno se poti kapljic na vetrobranskem steklu iz različnih začetkov lahko na svoji poti združijo in končajo na istih koncih.

### **2.3 Programsko okolje Matlab**

Za potrebe diplomske naloge smo uporabljali programsko okolje Matlab. Matlab je interaktivno okolje, ki je primarno namenjeno numeričnim izračunom, predvsem v inženirstvu in naravoslovnih znanostih (Sigmon, 1992). Računanje v Matlabu temelji na matrikah (Zupan, 2005). Matlab je namreč okrajšava za Matrix Laboratory. Diplomsko delo je potekalo v matlabovih m-datotekah (m-file) in v ukaznem oknu (Command Window). Uporabljali smo osnovne aritmetične operatorje, gradili matrike in pisali FOR in IF zanke. Literature o Matlabu je mnogo, za naše potrebe pa je zadostovala Matlabova pomoč (Matlab Help), ki je mnogokrat še najboljša referenca.

### 3 WATBAL – MODEL ZA ANALIZO VODNE BILANCE

V tem poglavju bomo le na kratko opisali model Watbal, njegova dokumentacija je priložena v prilogi G, kjer je podan opis priprave podatkov, zgradbe Watbala skupaj z enačbami in predlagan način kalibracije ter opis optimizacijskih kriterijev.

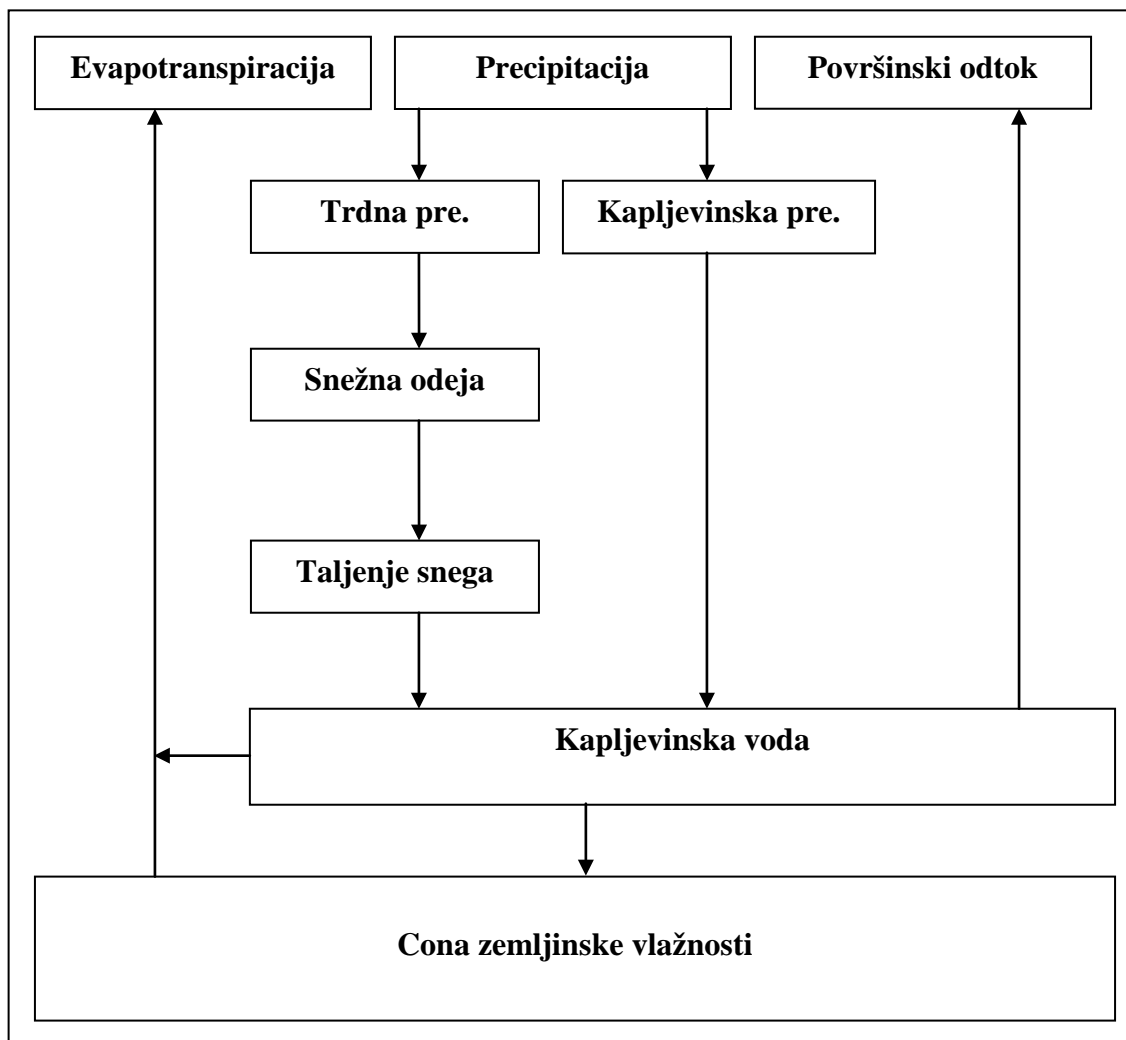
Model Watbal je bil zgrajen na osnovi enačbe vodne bilance (Petrovič). Enačba vodne bilance povezuje precipitacijo, odtok, evapotranspiracijo in ujete zaloge vode. Ko je model Watbal na danem podpodvju kalibriran, je namenjen modeliranju odzivov vodne bilance na podnebne spremembe z vstavljanjem novih padavin in nove potencialne evapotranspiracije (Petrovič).

Enačba vodne bilance je

$$P = Q + E + \Delta S , \quad (2)$$

kjer  $P$  pomeni precipitacija,  $Q$  odtok,  $E$  evapotranspiracija in  $\Delta S$  sprememba zalog vode v podtalju.

Shema modela Watbal je prikazana na sliki 1.



Slika 1: Konceptualna shema modela Watbal

Model Watbal je izdelan v programu Excel. Temelji na mediani nadmorske višine danega podpovodja in nanjo z linearno interpolacijo preračunanih vrednosti vhodnih podatkov. Priporočljivo je, da so na vsakem podpovodju vsaj tri merilne postaje za vse meteorološke podatke. Watbal podaja rezultate v obliki časovnih vrst, ravno tako sprejema vhodne podatke. V obstoječi obliki je sestavljen iz treh excelovih datotek.

V prvi Watbalovi datoteki DUWBdat.xls na osnovi meritev temperature, padavin, vlažnosti in pretokov pripravimo podatke o povprečnih mesečnih pretokih (iz  $m^3/s$  pretvorimo v mm/mesec), celotnih mesečnih padavinah (podano v mm/mesec), povprečnih mesečnih temperaturah ( $^{\circ}C$ ) in povprečnih mesečnih zračnih vlažnostih (%).

V drugi Watbalovi datoteki DUWBPET.xls pripravimo podatke o potencialni evapotranspiraciji (mm/mesec), ki jo izračunamo iz podatkov o temperaturi in zračni vlažnosti iz datoteke DUWBdat.

V tretji Watbalovi datoteki WB-MODEL.xls (priloga E) izvajamo kalibracijo modela Watbal in izračune vodne bilance. Umeriti moramo šest parametrov in sicer:

*WCRIT* – Kritična zemljinska vlažnost. Nad to vrednostjo je dejanska evapotranspiracija enaka potencialni.

*WSFFC* – Ravnotežna količina vodne vlage v zgornjem metru zemljine.

*ATSNOW* – Temperatura, pri kateri so vse padavine na celotnem podpovodju v trdnem agregatnem stanju.

*ATRRAIN* – Temperatura, pri kateri so vse padavine na celotnem podpovodju v kapljevinskem agregatnem stanju.

*MDGFAC* – Mesečni stopinjski faktor. Predstavlja količino stopljenega snega (v ekvivalentu vodnega stolpca) v enem mesecu na eno stopinjo Celzija nad ničlo.

*PRIESK* – Koeficient hitre infiltracije. Pove delež kapljevinskih padavin, ki na začetku meseca poniknejo v zemljino.

Umerjanje modela Watbal poteka ročno s pomočjo Excelovega orodja Goal Seek (Iskanje cilja). Problem, ki se tu pojavi je, da Goal Seek optimizira naenkrat le en parameter, ostale pa med tem pušča pri miru. Tako se zgodi, da ostanejo mnogi podprostori parametrskega prostora neraziskani. Največkrat vsemu temu sledi dolgotrajno in težavno iskanje optimalnih parametrov s strani uporabnika, čemur pa se poskušamo na vsak način izogniti.

Optimizacijski kriteriji so trije in sicer:

*WDELTA<sub>m</sub>* – Povprečna vrednost *WDELTM* skozi celotno časovno vrsto, katera mora biti čim bližje ničli. *WDELTM* je mesečna vrednost (na koncu meseca) variacije vodne količine v podtalju kot rezultat deficita vodne bilance za dani mesec.

*BDELTA* – Končna vrednost vodne bilance, kjer je upoštevana enačba vodne bilance, mora biti čim bližje ničli.

*WDELTA<sub>d</sub>* – Zadnja vrednost *WDELTM* mora biti čim bližje ničli.

Bilančne enačbe v modelu Watbal so naslednje:

Padavine v trdnem agregatnem stanju:

$$solpre_i = \begin{cases} pre_i, & temp_i \leq atsnow \\ pre_i \frac{(temp_i - atsnow)}{(atrain - atsnow)}, & atsnow < temp_i < atrain \\ 0, & temp_i \geq atrain \end{cases} \quad (3)$$

Taljenje snega:

$$\text{smelt}_i = \begin{cases} 0, & \text{wsurf}_{i-1} \leq 0 \text{ or } \text{temp}_i \leq \text{atsnow} \\ \text{mdgfac} \frac{(\text{temp}_i - \text{atsnow})^2}{\text{atrain} - \text{atsnow}}, & \text{atsnow} < \text{temp}_i < \text{atrain and } \text{wsurf}_{i-1} > \text{mdgfac} \frac{(\text{temp}_i - \text{atsnow})^2}{\text{atrain} - \text{atsnow}} \\ \text{mdgfac}(\text{temp}_i - \text{atrain}), & \text{temp}_i \geq \text{atrain and } \text{wsurf}_{i-1} > \text{mdgfac}(\text{temp}_i - \text{atrain}) \\ \text{wsurf}_{i-1}, & \text{atsnow} < \text{temp}_i < \text{atrain and } \text{wsurf}_{i-1} \leq \text{mdgfac} \frac{(\text{temp}_i - \text{atsnow})^2}{\text{atrain} - \text{atsnow}} \\ \text{wsurf}_{i-1}, & \text{atsnow} < \text{temp}_i < \text{atrain and } \text{wsurf}_{i-1} \leq \text{mdgfac}(\text{temp}_i - \text{atrain}) \end{cases} \quad (4)$$

Padavine v kapljevinskem agregatnem stanju in staljen sneg:

$$\text{prel} = \text{pre} + \text{smelt} - \text{solpre} \quad (5)$$

Zemljinska vlažnost na začetku meseca:

$$\text{sm1}_i = \begin{cases} \text{sm2}_{i-1} + \text{prel}_i, & \text{sm2}_{i-1} + \text{prel}_i \leq \text{WSFFC} \\ \text{WSFFC} - (\text{sm2}_{i-1} + \text{prel}_i - \text{WSFFC})\text{PRIESK}, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

Dejanska evapotranspiracija:

$$\text{aet}_i = \begin{cases} \text{pet}_i, & 0,5(\text{sm1}_i + \text{sm1}_i \frac{1 - \text{pet}_i / (2 \cdot \text{WCRIT})}{1 + \text{pet}_i / (2 \cdot \text{WCRIT})}) \geq \text{WCRIT} \\ \text{pet}_i \cdot 0,5(\text{sm1}_i + \text{sm1}_i \frac{1 - \text{pet}_i / (2 \cdot \text{WCRIT})}{1 + \text{pet}_i / (2 \cdot \text{WCRIT})}) \geq \text{WCRIT}, & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

Zemljinska vlažnost na koncu meseca:

$$\text{sm2}_i = \begin{cases} \text{sm1}_i - \text{aet}_i, & \text{sm1}_i - \text{aet}_i \leq \text{WSFFC} \\ \text{WSFFC}, & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

Snežna odeja:

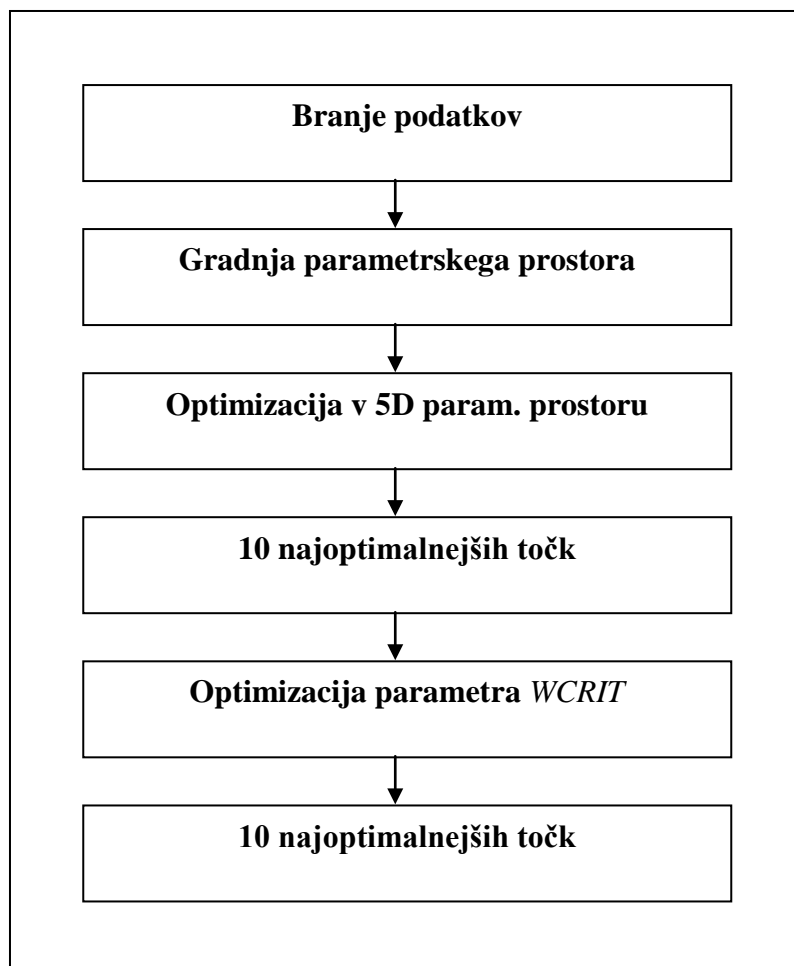
$$wsurf_i = wsurf_{i-1} + solpre_i - smelt_i \quad (9)$$

Odtok:

$$flowm_i = prel_i - aet_i \quad (10)$$

#### 4 ALGORITEM PETTON

V Matlabu smo izdelali algoritem Petton, ki avtomatsko poišče optimalne parametre za kalibracijo modela Watbal. S tem nam ni več potrebno ročno v kombinaciji z orodjem Goal Seek iskati optimalnih parametrov. Programska koda je priložena v prilogi A. Delovna shema algoritma Petton je na sliki 2.



Slika 2: Delovna shema algoritma Petton



#### 4.1 Zagon in rezultati Pettona

Po več preizkušanih algoritmi smo zaradi majhnega števila parametrov (šest), z upoštevanjem fizikalno možnih razponov parametrskega prostora ter z dovolj velikim korakom spreminjanja vrednosti parametrov izbrali algoritem, ki izračuna vrednost objektivne funkcije v vsaki celici parametrskega prostora in med njimi najde tiste celice, kjer je vrednost te funkcije najmanjša. Objektivna funkcija, katere minimum iščemo, je vsota kvadratov odstopanj med merjenimi in izračunanimi pretoki:

$$\sum_{i=1}^n (\mathit{flowm}_i - \mathit{flowc}_i)^2 \quad (11)$$

Algoritem zaženemo v Matlabu z ukazom v Command Window (glej prilogo D):

```
[ming, cas] = petton(std, stu, sts, rtd, rtu, rts, mfd, mfu, mfs, wcd, wcu, wcs, pd, pu, ps)
```

S tem se ne bo še nič zgodilo, saj je potrebno podati še meteorološke in hidrološke podatke o katerih bomo govorili v nadaljevanju.

Vhodne spremenljivke so v okroglem oklepaju.

*std* – Spodnja meja za parameter *ATSNOW*.

*stu* – Zgornja meja za *ATSNOW*.

*sts* – Korak spreminjanja vrednosti za *ATSNOW*.

Analogno se navezuje *rt* na *ATRRAIN*, *mf* na *MDGFAC*, *wc* na *WSFFC* in *pd* na *PRIESK*.

Izhodna spremenljivka *ming* je matrika z desetimi vrsticami in enajstimi stolpci, ki jo Petton vrne kot rezultat. V stolpcih so zapisane vrednosti optimizacijskih kriterijev iz Watbala, vrednosti

parametrov in vrednosti zemljinske vlažnosti *SM2* ter količine snežne odeje *WSURF* na koncu zadnjega meseca v časovni vrsti, oboje v ekvivalentih vodnega stolpca v mm. (Za podrobnejše informacije glej dokumentacijo Watbala v prilogi G) Deset vrstic pa predstavlja te vrednosti v desetih najoptimalnejših celicah parametrskega prostora.

```
ming = [WDELTAMm, BDELTA, WDELTAMd, ATSNOW, ATRAIN, MDGFAC, WSFFC,  
PRIESK, WCRIT, SM2, WSURF]
```

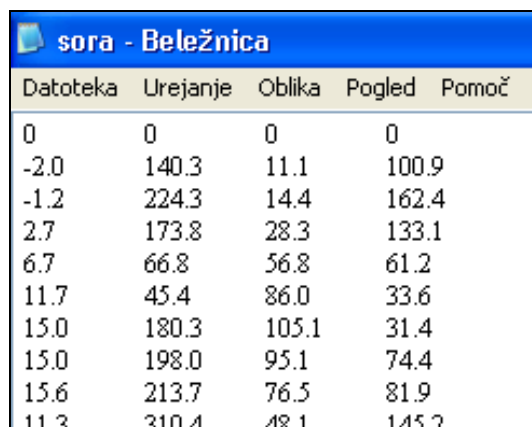
Izhodna spremenljivka *cas* pove, koliko procesorskega časa je algoritem potreboval za svoj izračun.

V obstoječi različici Pettona moramo meteorološke in hidrološke podatke o pretokih, padavinah, temperaturi in potencialni evapotranspiraciji podati v algoritem v m-file. To so isti vhodni podatki kot za model Watbal, le da so v tekstovni obliki. To storimo v 26 vrstici kode tako, da vstavimo ime datoteke, v kateri so zbrani omenjeni podatki. Najlažje je, če je le ta shranjena na istem direktoriju kot algoritem Petton, sicer je potrebno vnesti celotno ime datoteke. V spodaj navedenem primeru so vstavljeni podatki za reko Soro za oba primerja.

```
data = dlmread('sora.txt','');
```

```
data = dlmread('C:\Documents and Settings\Administrator\My Documents\FGG\Diploma  
\Data\sora.txt','');
```

Omenjene vhodne podatke podamo v tekstovni datoteki (Notebook, .txt datoteka), kjer v prvo vrstico zapišemo štiri ničle z vmesnimi presledki, v prvi stolpec pod prvo ničlo časovno serijo temperatur, v drugi stolpec padavine, v tretji potencialno evapotranspiracijo in v četrti pretoke. V primeru spodaj vidimo prvo ničelno vrstico in navedene podatke za Soro za obdobje januar-december 1960, ki so shranjeni v tekstovni datoteki Sora.txt (slika 3).



Datoteka	Urejanje	Oblika	Pogled	Pomoč
0	0	0	0	
-2.0	140.3	11.1	100.9	
-1.2	224.3	14.4	162.4	
2.7	173.8	28.3	133.1	
6.7	66.8	56.8	61.2	
11.7	45.4	86.0	33.6	
15.0	180.3	105.1	31.4	
15.0	198.0	95.1	74.4	
15.6	213.7	76.5	81.9	
11.3	310.4	48.1	145.2	

Slika 3: Vhodni podatki za povodje Sora v obliki tekstovne datoteke

## 4.2 Algoritem Petton

Algoritem najprej prebere meteorološke in hidrološke podatke in izračuna zahtevana povprečja, ki se pojavljajo v Watbalovih enačbah. Nato ustvari parametrski prostor kot ga določi uporabnik z vnosom vhodnih spremenljivk. Sledi nastavitev začetnih vrednosti za *SM2* in *WSURF*. Ustvari se tudi matrika *min* v katero bomo shranjevali optimalne celice parametrskega prostora. Nato začne izračun vrednosti objektivne funkcije v vsaki celici parametrskega prostora, kjer vedno jemlje enake vrednosti za *WCRIT* in *WSFFC* in vedno shranjuje tisto celico, v kateri je vrednost kriterijalne funkcije manjša od vnaprej predpisane vrednosti, ki je od prvega koraka dalje kar vrednost predhodne najmanjše vrednosti objektivne funkcije, v prvem koraku pa je vnaprej predpisana s spremenljivko *crit*. Nato v desetih najoptimalnejših celicah matrike *min* ponovi izračun za parameter *WCRIT* na intervalu  $\pm 5$  od izbrane vrednosti *WSFFC*, saj sta *WCRIT* in *WSFFC* realistično dovolj blizu. Končen rezultat, ki ga lahko vidi uporabnik, je v matriki *ming*.

## 4.3 Kritična uporaba algoritma Petton

Morel (2003) pravi, da je posebej v primerih avtomatske kalibracije zelo enostavno priti do solidnih rezultatov, vendar zaradi napačnih vzrokov. Zato je potrebno poznati delovanje

algoritma. Uporabnik Pettona naj se prej v osnovi spozna z njim in z modelom Watbal. S svojim in obstoječim znanjem o hidrologiji, meteorologiji in pedologiji naj poskuša podati čim manjši parametrski prostor, ki je znotraj fizikalno smiselnih meja, saj tako močno pripomore k hitrejšemu poteku algoritma. Optimizirati je vedno potrebno pametno in sistematično ter ne kar tako na pamet. Zato je čas, ki ga vložimo v iskanje čimbolj pravih vrednosti parametrov zelo dobra naložba. Smiselno naj uporabnik poda tudi korake spreminjanja vrednosti parametrov, najbolje tako kot so priporočeni v začetku programske kode (priloga A). Petton kot rezultat vrne matriko desetih najbolj optimalnih celic parametrskega prostora skupaj s prej naštetimi količinami. Uporabnik naj izmed njih po svoji presoji izbere zanj najoptimalnejšo in jo poskusi v Watbalu še dodatno fino kalibrirati.

Na računalniku, ki smo ga uporabljali za izdelavo diplome (HP prenosnik, 1,83 GHz, 0,99 GB Ram-a) je časovna zahtevnost Pettona

$$T = 0,0088n + 12,03 \quad (12)$$

kjer je  $T$  procesorski čas v sekundah in  $n$  število celic v parametrskem prostoru.

## 5 POVODJE REKE SAVE

### 5.1 Vodotok Sava

Sava je največji slovenski vodotok. Izvira v Julijskih Alpah v Gozdu Martuljku kot Sava Dolinka in v Bohinjskem jezeru kot Sava Bohinjka, Slovenijo pa zapusti v Čateških Toplicah, kjer nadaljuje svojo pot na Hrvaško. Sava se v Beogradu priključi največji evropski reki Donavi, katera se zliva v Črno Morje. Povodje Save v Sloveniji obsega 10764 km<sup>2</sup> ozemlja, kar predstavlja 53% ozemlja Slovenije. Na sliki 4 je prikazano celotno povodje reke Save.



Slika 4: Povodje reke Save na področju stare Jugoslavije

## 5.2 Delitev povodja Save v podpovodja

Za namen analize vodne bilance reke Save smo povodje Save razdelili v 12 podpovodij. Izbrana podpovodja so poimenovana po pritokih reke Save in sicer Sava Dolinka, Sava Bohinjka, Sava-Kranj, Sora, Kamniška Bistrica, Ljubljana, Sava-Litija, Savinja-Celje, Savinja-Veliko Širje, Sava-Čatež, Krka-Dvor in Krka-Podbočje. Velikosti in pokrovnosti podpovodij so prikazane v preglednici 1. S sistemom GIS je bila v projektu Sarib določena minimalna in maksimalna nadmorska višina ter mediana nadmorske višine. Rezultati so v preglednici 2.

Preglednica 1: Pokrovnost in velikost posameznih izbranih podpovodij

Ime podpovodja	Procent [%]				Površina [km <sup>2</sup> ]				
	Urbano	Agrik.	Gozd	Voda	Skupaj	Urbano	Agrik.	Gozd	Voda
Sava Dolinka	2,45	9,81	87,62	0,12	501,5	12,29	49,18	439,4	0,62
Sava Bohinjka	0,80	9,04	89,00	1,17	387,1	3,09	34,99	344,5	4,51
Sava - Kranj	4,26	23,03	72,47	0,23	639,9	27,28	147,4	463,7	1,45
Sora	2,43	27,09	70,48	0,00	648,1	15,76	175,6	456,8	0,00
Kamniška Bistrica	6,08	35,38	58,31	0,23	656,7	39,94	232,4	382,9	1,52
Ljubljana	5,12	27,31	66,28	1,28	1885	96,58	514,7	1249	24,17
Sava - Litija	3,10	27,15	68,82	0,93	523,7	16,22	142,2	360,4	4,90
Savinja - Celje	1,20	30,83	67,77	0,20	1106	13,32	340,8	749,1	2,18
Savinja - V. Širje	2,36	48,37	48,89	0,37	659,7	15,60	319,1	322,6	2,46
Sava - Čatež	1,56	43,68	54,05	0,71	757,3	11,81	330,8	409,3	5,41
Krka - Dvor	2,92	30,73	65,99	0,36	1193	34,80	0,00	787,4	4,27
Krka - Podbočje	1,77	38,47	59,32	0,44	1145	20,26	440,3	679	5,00

Kot vidimo iz preglednice 1 sta podpovodji Sava Dolinka in Sava Bohinjka s približno 88% najbolj gozdnati, najbolj urbani sta podpovodji Kamniška Bistrica in Ljubljana s približno 6% in 5%, delež agrikulturnih površin je največji na podpovodjih Savinja-Veliko Širje in Sava-Čatež,

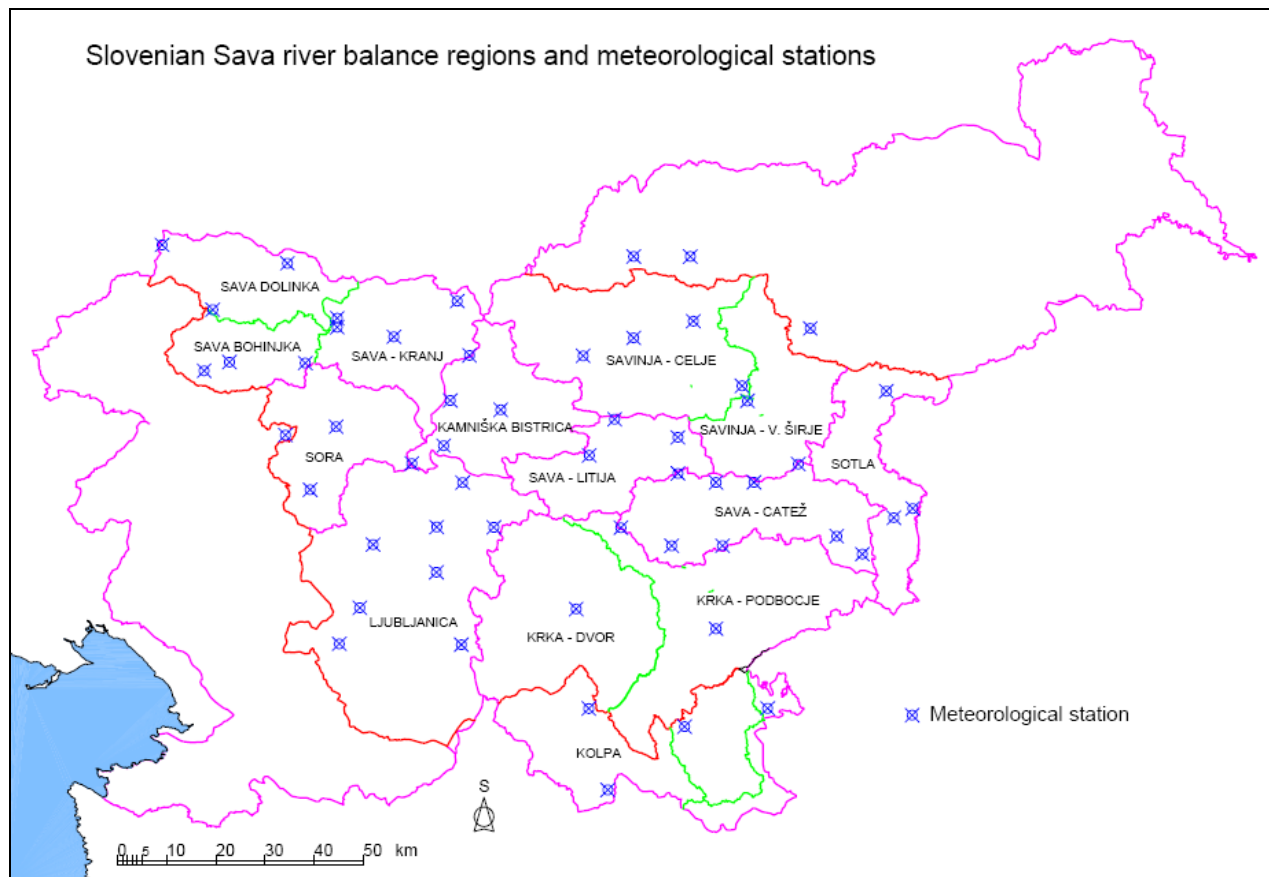
po procentu vodnih površin pa prednjačita podpovodji Ljubljana in Sava Bohinjka. Po površini je največje podpovodje Ljubljana, najmanjše pa Sava Bohinjka.

Preglednica 2: Karakteristične nadmorske višine izbranih podpovodij

Ime podpovodja	min nm.v. [m]	max nm. v. [m]	mediana nm. v. [m]
Sava Dolinka	410	2864	1160
Sava Bohinjka	410	2800	1187
Sava - Kranj	306	2520	700
Sora	311	1674	665
Kamniška Bistrica	266	2558	425
Ljubljana	265	1780	593
Sava - Litija	187	1210	463
Savinja - Celje	230	2440	595
Savinja - V. Širje	187	1455	407
Sava - Čatež	125	1200	353
Krka - Dvor	168	1250	484
Krka - Podbočje	121	1165	311

Najvišjo nadmorsko točko predstavlja Triglav na podpovodju Sava Dolinka, najnižja točka pa se pojavi na podpovodju Krka-Podbočje. Mediana nadmorske višine je najvišja na podpovodjih Sava Bohinjka in Sava Dolinka, kjer sega čez tisoč metrov, na ostalih podpovodjih pa je znatno nižja in precej enakomerno pada od 700 do 300 metrov.

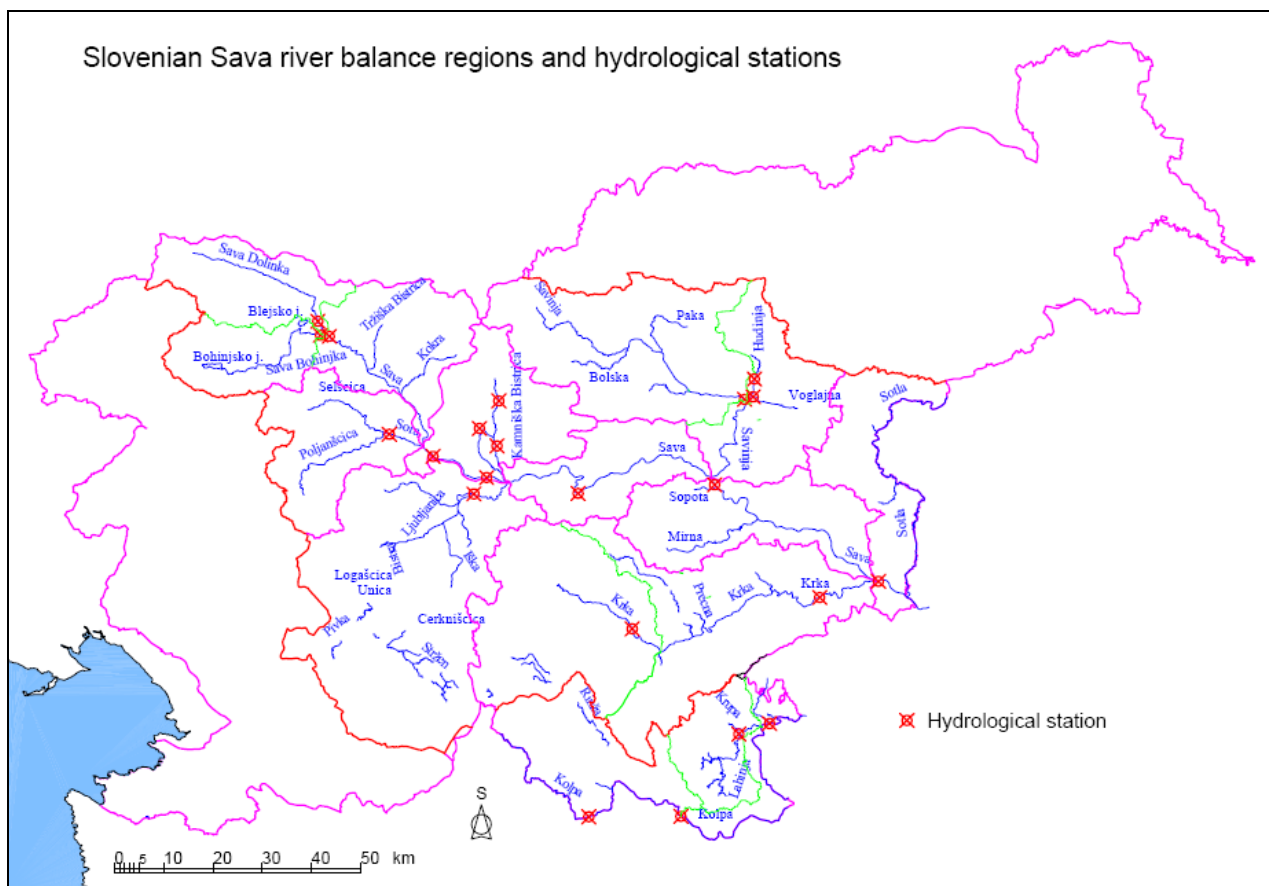
Slikovni prikaz podpovodij skupaj z hidrološkimi in meteorološkimi merilnimi postajami ter pritoki reke Save so na sliki 5 in 6.



Slika 5: Izbrana podpovodja reke Save in meteorološke postaje

Največ meteoroloških merilnih postaj, s katerih smo dobili podatke je postavljenih na podpovodju Sava-Čatež in Ljubljana, najmanj pa na podpovodju Krka-Dvor. Problem meteoroloških podatkov je med drugim ta, da jih pridobivamo na relativno nizkih nadmorskih višinah specifičnega podpovodja, predvsem v goratih in bolj hribovitih predelih Slovenije..





Slika 6: Hidrološke postaje pretokov

Na spodnji sliki so prikazane fotografije nekaterih rek, ki jih je vključevala naša analiza. Zgoraj levo je Sava Dolinka, sledi Sava Bohinjka in Kamniška Bistrica, spodaj pa je levo Krka, sledita pa ji Sora in Savinja.



Slika: Od zgoraj levo proti spodaj desno: Sava Dolinka, Sava Bohinjka, Kamniška Bistrica, Krka, Sora, Savinja. Vir: Internet.

### 5.3 Meteorološki in hidrološki podatki

Za analizo vodne bilance reke Save smo pridobili časovno serijo mesečnih podatkov od leta 1960 do leta 2000. Podatke o pretokih smo dobili s hidroloških postaj, podatke o temperaturah, padavinah in zračnih vlažnostih pa z meteoroloških postaj. Hidrološke postaje s katerih smo dobili podatke o pretokih rek (pritoki reke Save in Sava) niso vedno sovpadali z izhodom dane reke iz podpovodja, zato je bilo potrebno pretoke korigirati. To je bilo narejeno že v projektu Sarib. Merjene podatke smo nato za namen Watbala transformirali s pomočjo statističnih funkcij in dobili vhodne podatke v model Watbal.

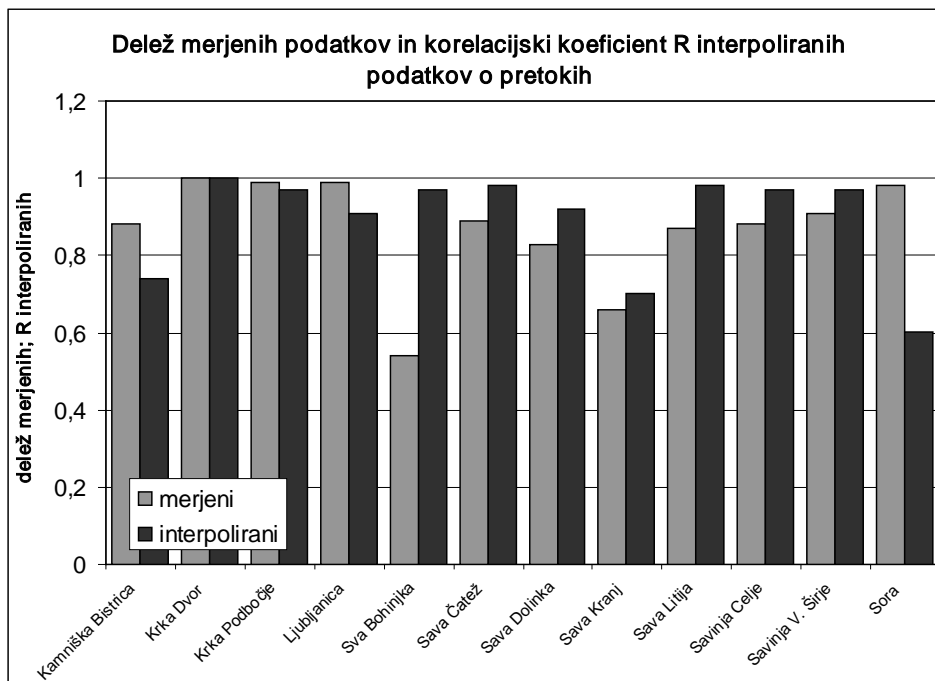
## 6 REZULTATI

S programom Petton smo izračunali optimalne vrednosti parametrov za vseh dvanajst podpovodij reke Save. Naredili smo dvoje izračunov optimalnih vrednosti parametrov in sicer znotraj fizikalno smiselnega parametrskega prostora (petton 1) in znotraj razširjenega parameterskega prostora (petton 2). Drug izračun smo naredili zato, da bomo videli proti kakšnim vrednostim parametrov model Watbal teži. Tako lahko pridobimo pomembne informacije o samem modelu Watbal in o sistemu, ki ga model opisuje. Kot pravita Morton in Suarez je to pomemben del modeliranja (2001). Nato smo s temi parametri v Watbalu izvedli izračune ter dobili simulirane pretoke, ki smo jih primerjali z vhodnimi pretoki in s simuliranimi pretoki iz projekta Sarib, kjer je bila kalibracija modela Watbal narejena ročno s kombinacijo orodja Goal Seek.

### 6.1 Kakovost podatkov

Na grafikonu 1 je prikazana kakovost podatkov o pretokih, ki so predstavljali eno od vhodnih spremenljivk v model Watbal. Skoraj za vsako podpovodje so v časovni vrsti podatkov o pretokih manjkala večja obdobja le teh. Razlogi so v zaustavljenih ali še neobstoječih merilnih mestih, nekatera merilna mesta niso avtomatizirana, pa so zato ljudje, ki so minljivi, merili pretoke. Danes teh ljudi ni več, novih kandidatov za opravljanje meritev pa ni. Zgodi pa se tudi, da merilna naprava enostavno preneha delati ali zaradi okoliških vplivov ne meri prav. Žal pa so kvalitetne meritve in podatki eden ključnih elementov uspešnega modeliranja.

Anderson in Bates (2001) trdita, da specifičnih kvalitetnih in kvantitetnih kriterijev za oceno napak meritev in podatkov v hidrologiji še vedno ni. Mi smo za oceno kvalitete merjenih pretokov uporabili kar delež merjenih pretokov v časovni seriji in pa korelacijski koeficient interpoliranih manjkajočih pretokov glede na merjene pretoke.



Grafikon 1: Delež merjenih pretokov in korelacijski koeficient interpoliranih pretokov

Vidimo, da je manjkajoči delež merjenih pretokov na nekaterih podpovodjih znaten, tako je največji na podpovodju Sava Bohinjka, kjer je manjkajočih meritev kar okrog 45%, sledijo Sava-Kranj s približno 35%, Kamniška Bistrica in ostala podpovodja. Manjkajoči pretoki so bili interpolirani na osnovi korelacije med obstoječimi pretoki na dani reki in pretoki neke druge izbrane reke v Excelu z uporabo funkcije CORREL.

Na meteorološke podatke pa je vplival proces interpolacije na mediano nadmorske višine. To smo naredili v Excelu z uporabo funkcije TREND. V primeru priprave podatkov o potencialni evapotranspiraciji je bila ta interpolacija izvedena trikrat.

Vsi omenjeni postopki na merjenih podatkih so seveda pokvarili vhodne podatke, zato ne moremo pričakovati popolne kalibracije modela Watbal. Natančna ocena vpliva je nepraktična,

zgornji grafikon pa je dober pokazatelj kakovosti podatkov o pretokih. Verjetno je kvaliteta meteoroloških podatkov bližje kvaliteti boljših podatkov o pretokih.

## 6.2 Pričakovane vrednosti parametrov

Model Watbal je zgrajen tako, da smemo privzeti nekatere vrednosti parametrov kot bolj fizikalno sprejemljive.

*WCRIT* naj bi bil med 80 mm in 350 mm, kjer vrednost 80 mm predstavlja prevladujoče peščena tla, 350 mm pa težka glinasta tla. V Sloveniji so tla po svoji sestavi nekje vmes, tako da smemo pričakovati vmesne vrednosti. *WSFFC* realistično zavzame podobne vrednosti kot *WCRIT*.

*ATSNOW* naj bi bil okrog pričakovane vrednosti, ki jo izračunamo s pomočjo gradienta temperature v atmosferi in razlik med minimalno nadmorsko višino in mediano nadmorske višine.

$$ATSNOW = (h_{\min} - h_{\text{mediana}}) \cdot 6,5^{\circ}\text{C} / \text{km} \quad (13)$$

*ATRRAIN* je analogen *ATSNOW*, le da računamo z razliko med mediano in maksimalno nadmorsko višino.

$$ATSNOW = (h_{\max} - h_{\text{mediana}}) \cdot 6,5^{\circ}\text{C} / \text{km} \quad (14)$$

*MDGFAC* naj bi bil med 10 mm/mesec in 140 mm/mesec. Za slovenske razmere je ta vrednost realno bližje nižji vrednosti.

*PRIESK* naj bi bil med 0 in 1, kjer 0 ni realistično, saj to pomeni, da ne bi bilo evapotranspiracije.

V nadaljevanju so prikazane pričakovane vrednosti temperaturnih parametrov (preglednica 3).

Preglednica 3: Pričakovane vrednosti *ATSNO* in *ATRAIN*

Podpovodje	<i>ATSNO</i> <i>W</i>	<i>ATRAI</i> <i>N</i>
Sava Dolinka	-4,9	11,1
Sava Bohinjka	-5,1	10,5
Sava - Kranj	-2,6	11,8
Sora	-2,3	6,6
Kamniška Bistrica	-1,0	13,9
Ljubljana	-2,1	7,7
Sava - Litija	-1,8	4,9
Savinja - Celje	-2,4	12,0
Savinja - V. Širje	-1,4	6,8
Sava - Čatež	-1,5	5,5
Krka - Dvor	-2,1	5,0
Krka - Podbočje	-1,2	5,6

### 6.3 Izračunani parametri

V preglednicah 4 in 5 so prikazane izračunane in dopolnjene (glej poglavje »Kritična uporaba algoritma Petton«) optimalne vrednosti parametrov v primeru petton 1 in petton 2. Parametrski prostor, znotraj katerega je Petton iskal optimalne vrednosti parametrov, je za primer petton 1 priložen v prilogi B. V prilogi C so originalni nedopolnjeni rezultati Pettona za primer petton 1. V preglednici 6 so za primerjavo podane vrednosti parametrov iz projekta Sarib.

Preglednica 4: Vrednosti dopoljenih kalibriranih parametrov v primeru petton 1

Podpovodje	<i>WCRIT</i>	<i>WSFFC</i>	<i>ATSNO</i>	<i>ATRAIN</i>	<i>MDGFAC</i>	<i>PRIESK</i>
------------	--------------	--------------	--------------	---------------	---------------	---------------

se nadaljuje

nadaljevanje

Sava Dolinka	105	100	-9	13	120	1
Sava Bohinjka	105	100	-9	11	20	1
Sava – Kranj	105	105	-7	12	120	0,96
Sora	295	300	-6	11	100	0,1
Kamniška Bistrica	296	300	-6	17	100	0,77
Ljubljana	275	280	-6	12	120	0,92
Sava – Litija	189	194	-6	10	10	0,84
Savinja - Celje	165	160	-6	12	34	0,1
Savinja - V. Širje	254	259	-5	12	42	1
Sava – Čatež	98	100	-6	11	100	0,8
Krka – Dvor	295	300	-6	10	67	0,1
Krka - Podbočje	105	100	-6	10	113	1

Preglednica 5: Vrednosti dopoljenih kalibriranih parametrov v primeru petton 2

Podpovodje	<i>WCRIT</i>	<i>WSFFC</i>	<i>ATSNOW</i>	<i>ATRAIN</i>	<i>MDGFAC</i>	<i>PRIESK</i>
Sava Dolinka	36	42	-16	15	10	1
Sava Bohinjka	45	40	-13	11	10	1
Sava – Kranj	135	130	-7	14	110	1
Sora	424	432	-10	19	29	0,01
Kamniška Bistrica	426	432	-16	47	10	0,08
Ljubljana	405	401	-8	19	71	1
Sava – Litija	432	431	-9	19	10	0,98
Savinja – Celje	200	190	-12	21	10	1

se nadaljuje

nadaljevanje

Savinja - V. Širje	405	404	-9	19	10	1
Sava - Čatež	194	190	-5	19	190	1
Krka - Dvor	434	439	-6	19	66	0
Krka - Podbočje	105	100	-11	20	10	1

Preglednica 6: Vrednosti parametrov v projektu Sarib.

Podpovodje	<i>WCRIT</i>	<i>WSFFC</i>	<i>ATSNOW</i>	<i>ATRRAIN</i>	<i>MDGFAC</i>	<i>PRIESK</i>
Sava Dolinka	47,89	47,90	-12,29	6,47	153,87	1
Sava Bohinjka	21,87	21,87	-11,5	8	10	1
Sava - Kranj	80	80	-6,4	12,93	70	1
Sora	350	350	-5,9	12	90	0,09
Kamniška Bistrica	400	400	-10,5	8	1,21	0,09
Ljubljana	25	25	-5,5	2,9	180	0,5
Sava - Litija	112,95	112,95	-6,51	14	20,05	0,59
Savinja - Celje	79,40	79,40	-9,29	11	60,35	0,99
Savinja - V. Širje	80	80	-7,7	13,12	10	0,58
Sava - Čatež	20	19,97	-8,2	11	48,99	0,54
Krka - Dvor	310,93	310,93	-8,5	6	3	0,09
Krka - Podbočje	17,05	17,02	-9,32	7,40	113,31	1

Očitno je, da so vrednosti *WCRIT* in *WSFFC* v primeru Sarib zunaj fizikalno smiselnih meja, v primeru petton 1 pa so ti rezultati zadovoljivi, četudi večinoma silijo k večji ali manjši vrednosti. Tudi temperature, predvsem *ATSNOW*, so v primeru Sarib bolj neustrezni kot v primeru petton 1. Vrednosti parametra *PRIESK* so v primeru petton 1 večinoma večji kot v primeru Sarib.



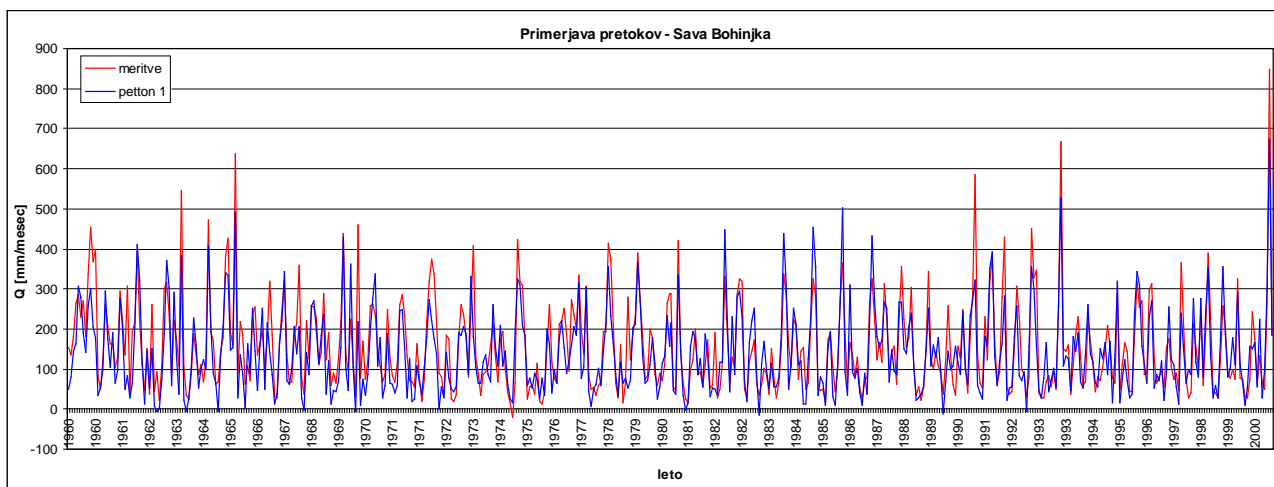
Vrednosti *MDGFAC* so v primeru Sarib večkrat izven predvidenih meja, najbolj odstopata Kamniška Bistrica in Krka-Dvor.

Vrednosti parametrov v primeru petton 2 kažejo na prenizke vrednosti *MDGFAC*, na prevelike vrednosti *WSFFC* in *WCRIT*, razen na podpovodju Sava Bohinjka in Sava Dolinka, ter na prevelike amplitude *ATSNOW* in *ATRRAIN*.

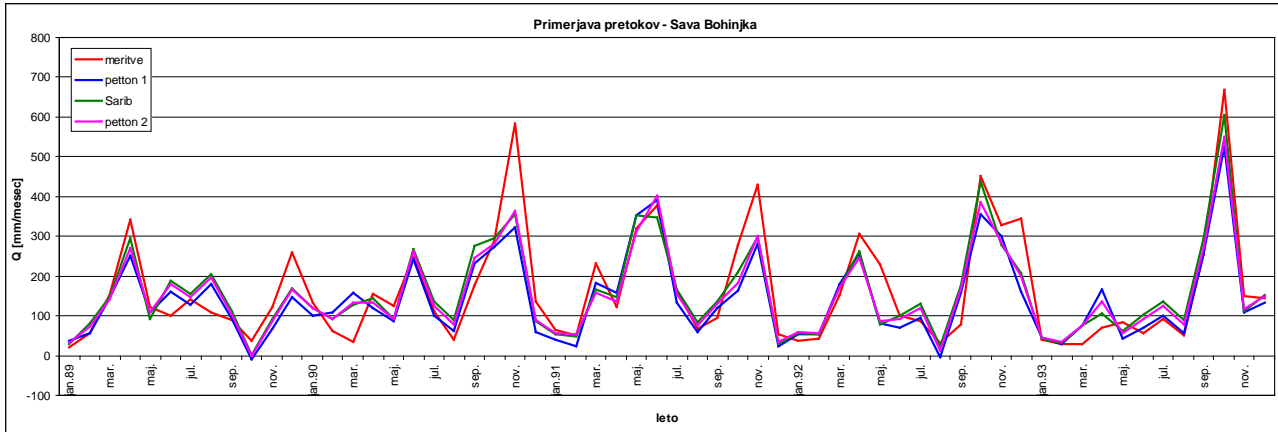
Algoritem Petton je za optimizacijo potreboval okrog 600 sekund za vsako podpovodje v primeru petton 1, medtem ko je bil kalibracijski čas v primeru Sariba precej daljši. V primeru petton 2 je bil čas izračuna okrog ene ure za vsako podpovodje.

#### 6.4 Primerjava merjenih in izračunanih mesečnih pretokov.

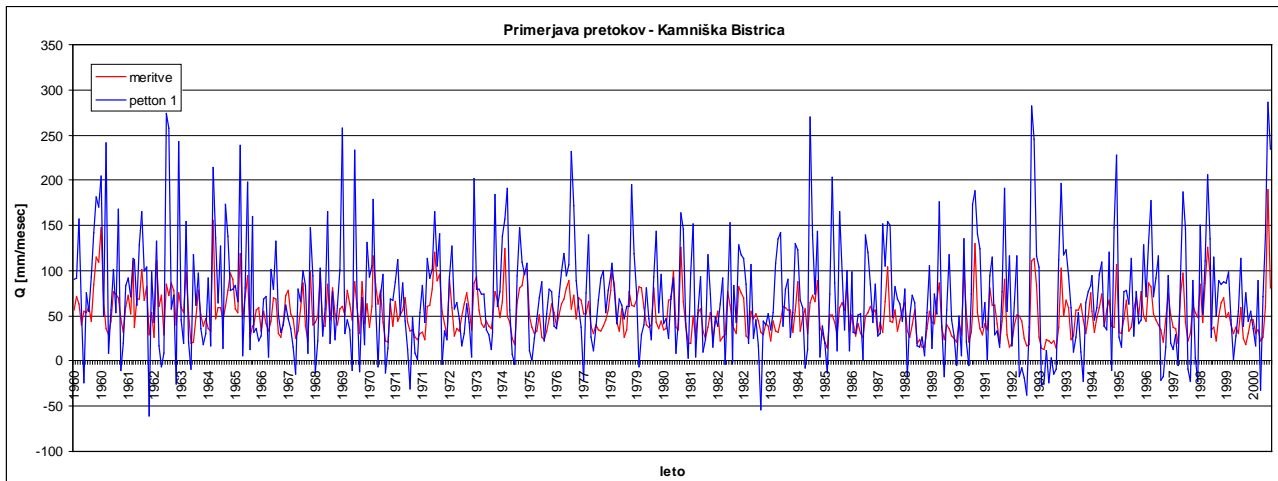
Grafikoni 2-5 prikazujejo vhodne mesečne pretoke (glej poglavje »Kakovost podatkov«) in izračunane pretoke na podlagi rezultatov Pettona za celotno obdobje od leta 1960 do 2000 in povečano za obdobje od 1989 do 1993, kjer je prikazan tudi pretok iz projekta Sarib. Podani sta najboljša (Sava Bohinjka) in najslabša (Kamniška Bistrica) situacija, kjer je kriterij kvalitete korelacijski koeficient med izračunanimi (petton 1) in merjenimi pretoki.. Ostali rezultati so v prilogi E.



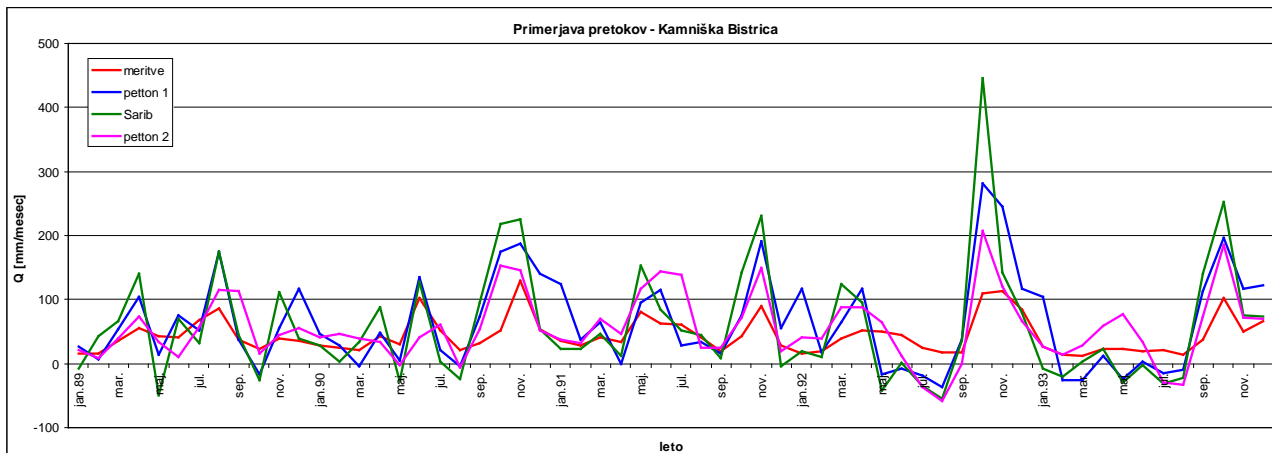
Grafikon 2: Primerjava izračunanih in merjenih mesečnih pretokov za primer Sava Bohinjka za leta 1960 - 2000



Grafikon 3: Primerjava izračunanih in merjenih mesečnih pretokov za primer Sava Bohinjka za leta 1989 - 1993



Grafikon 4: Primerjava izračunanih in merjenih mesečnih pretokov za primer Kamniška Bistrica za leta 1960 - 2000

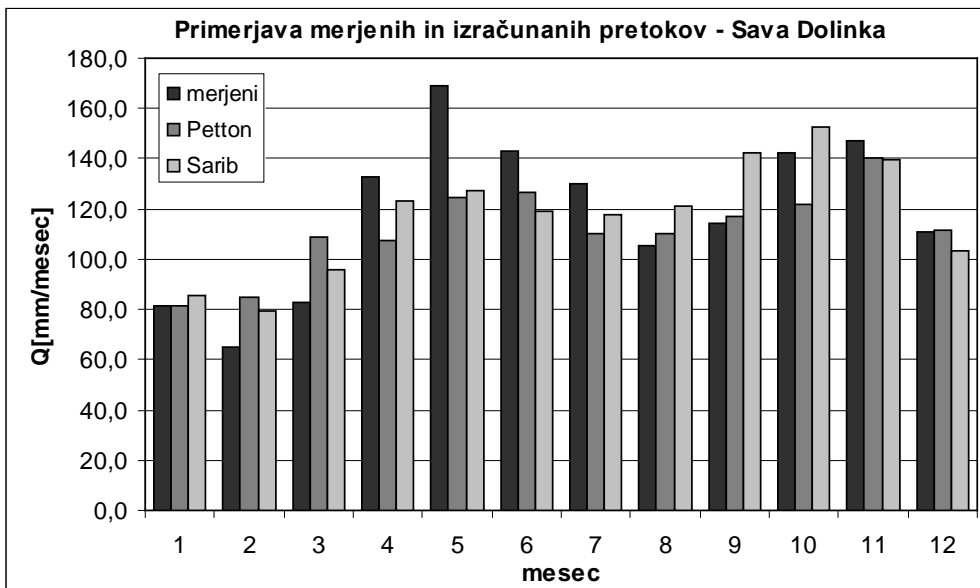


Grafikon 5: Primerjava izračunanih in merjenih mesečnih pretokov za primer Kamniška Bistrica za leta 1989 - 1993

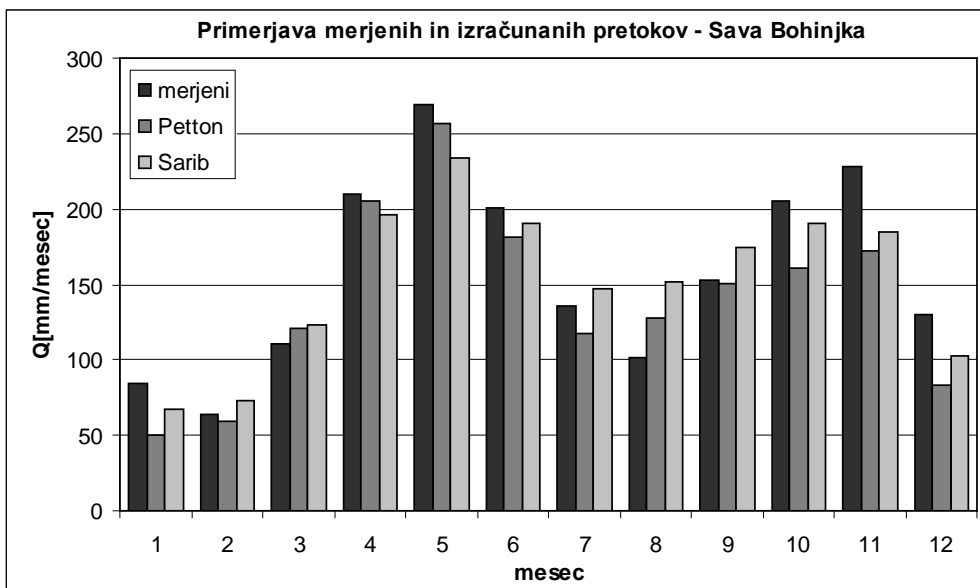
Iz prikazanih rezultatov in ostalih v prilogi F vidimo, da so amplitude pri izračunanih pretokih večje kot pri merjenih. Nekateri izračunani pretoki so celo negativni. To je verjetno posledica tega, da Watbal ne upošteva dinamike podtalnice. Mogoče bi bilo dovolj že vgraditi varnostni *IF stavek*, ki bi preprečeval takšne primere. Oboji izračunani pretoki (Sarib in Petton) so si zelo podobni v bolj uspešnih primerih, kot na primer pri Savi Bohinjki, drugje so odstopanja precejšnja, izraziti pa so podobni trendi.

### 6.5 Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov

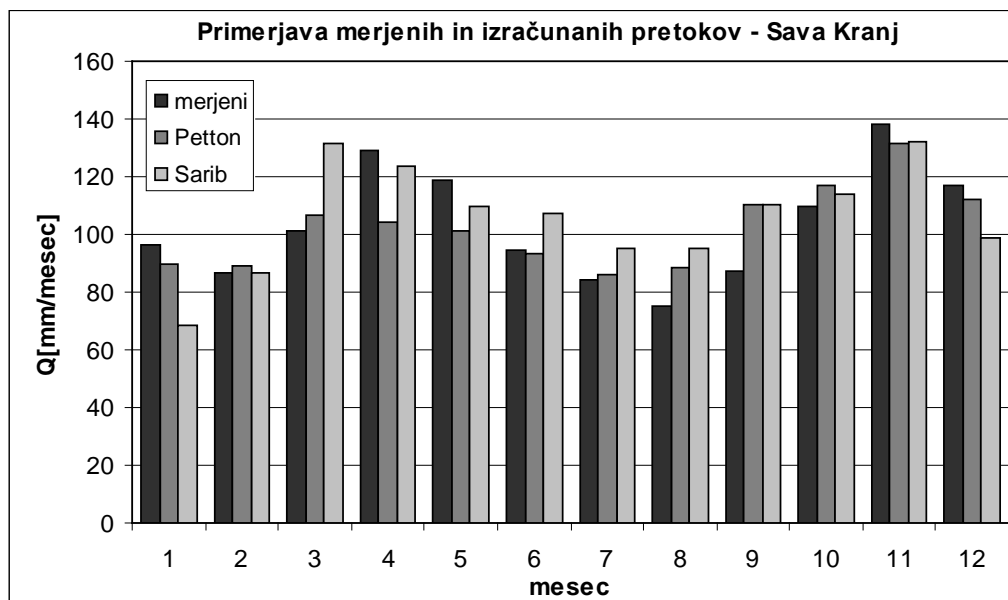
Grafikoni 6-17 prikazujejo povprečne mesečne odtoke od leta 1960 do leta 2000.



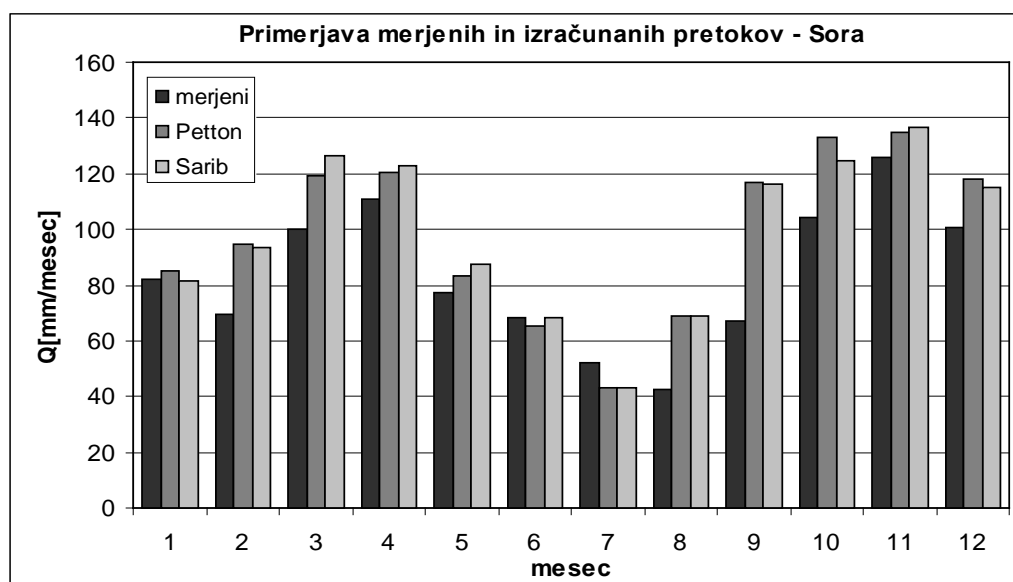
Grafikon 6: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Sava Dolinka



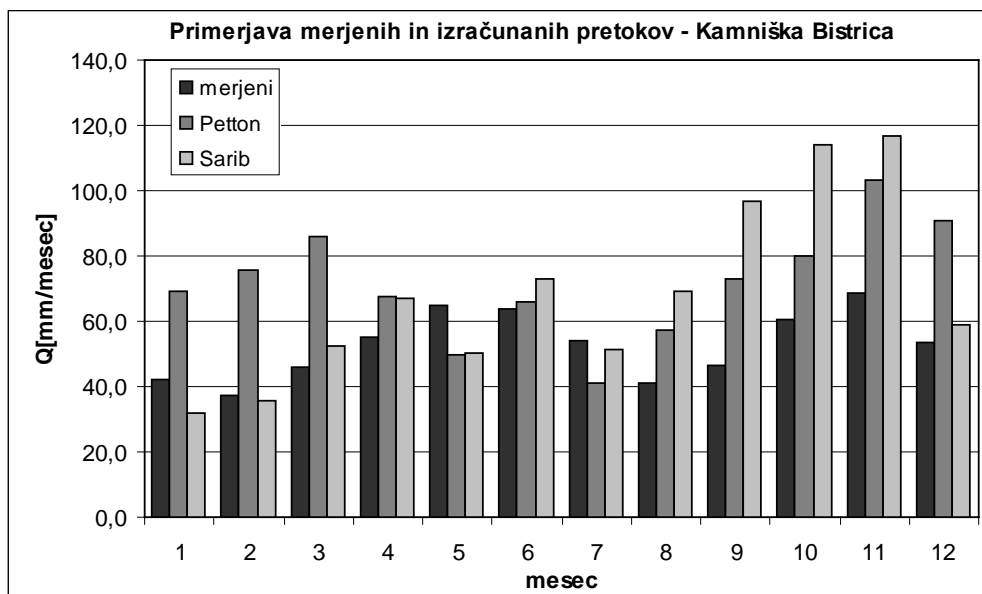
Grafikon 7: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Sava Bohinjka



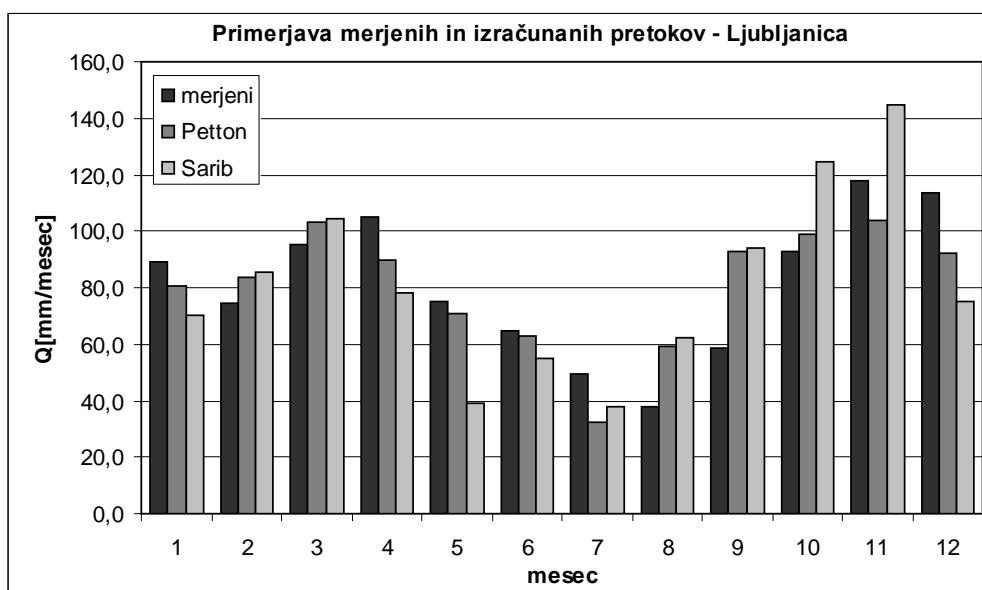
Grafikon 8: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Sava-Kranj



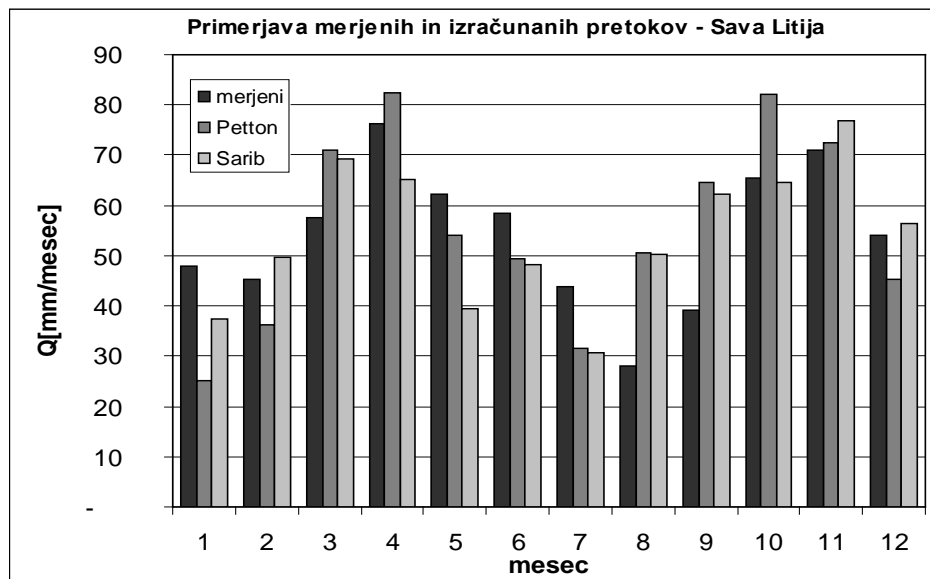
Grafikon 9: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Sora



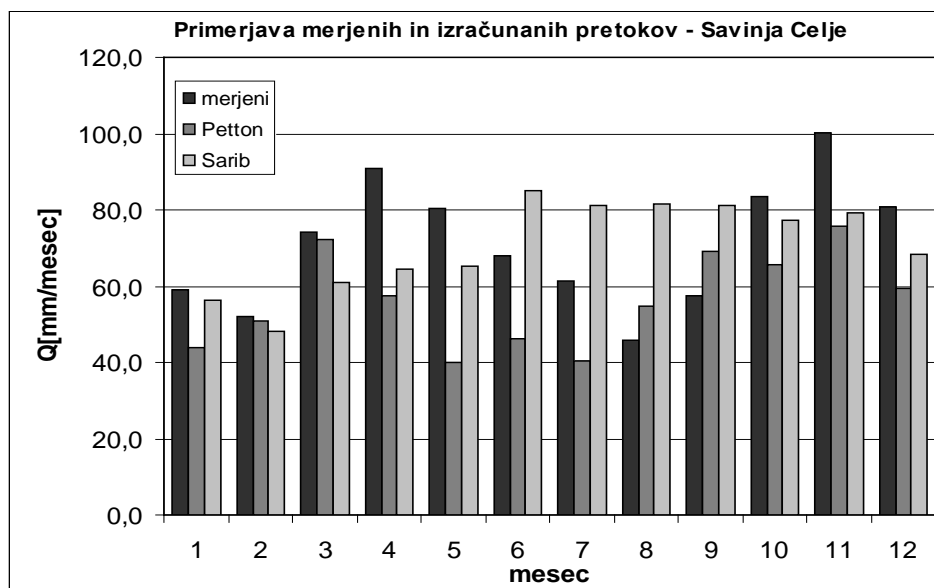
Grafikon 10: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Kamniška Bistrica



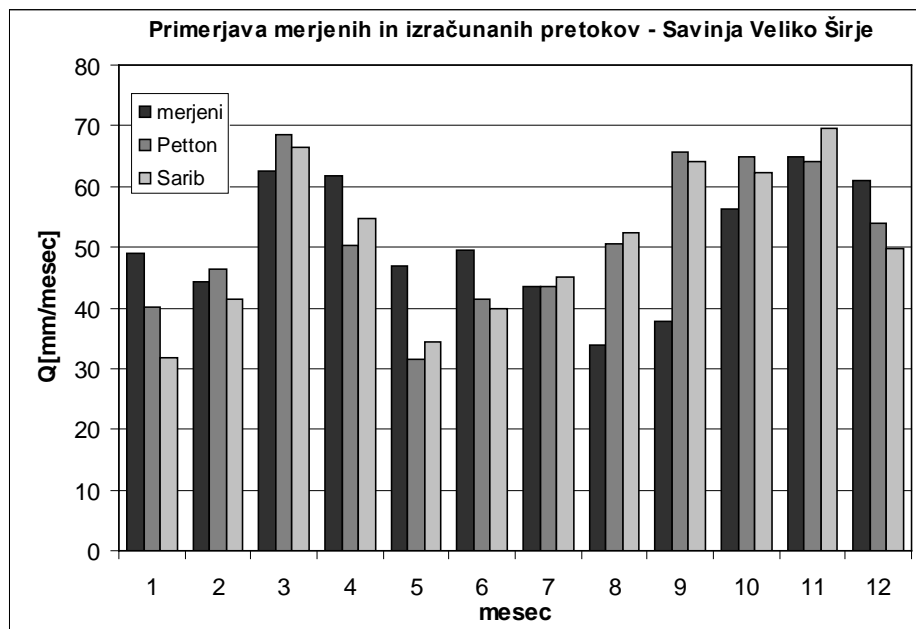
Grafikon 11: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Ljubljana



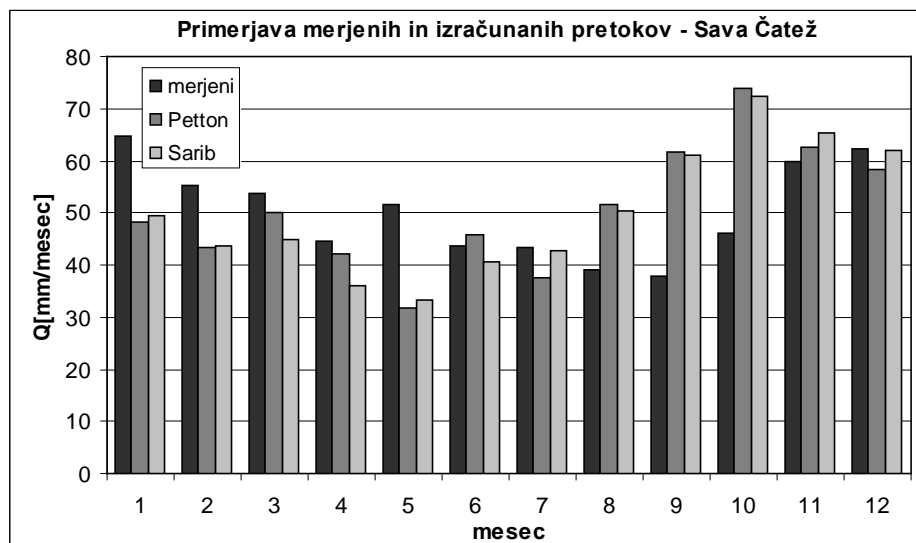
Grafikon 12: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Sava-Litija



Grafikon 13: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Savinja-Celje

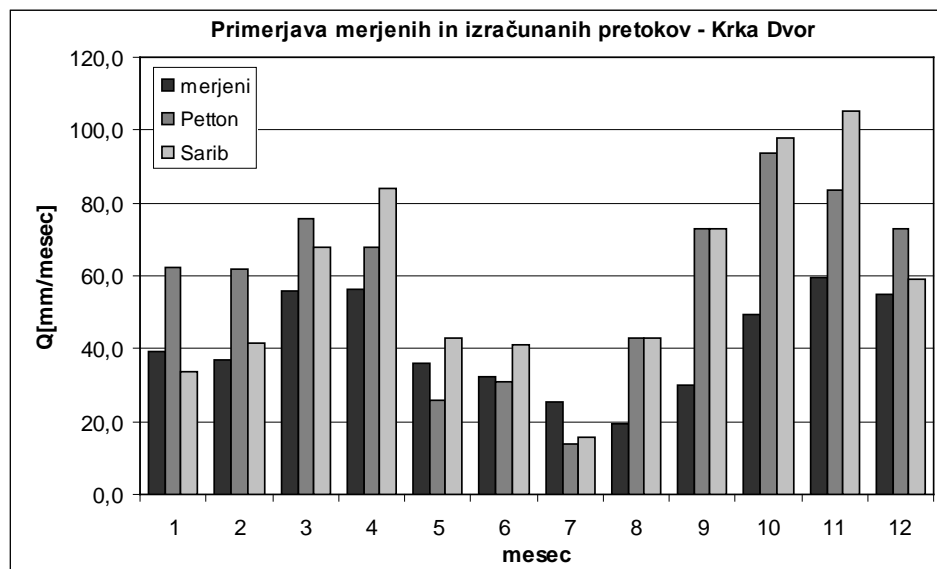


Grafikon 14: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Savinja-Veliko Širje

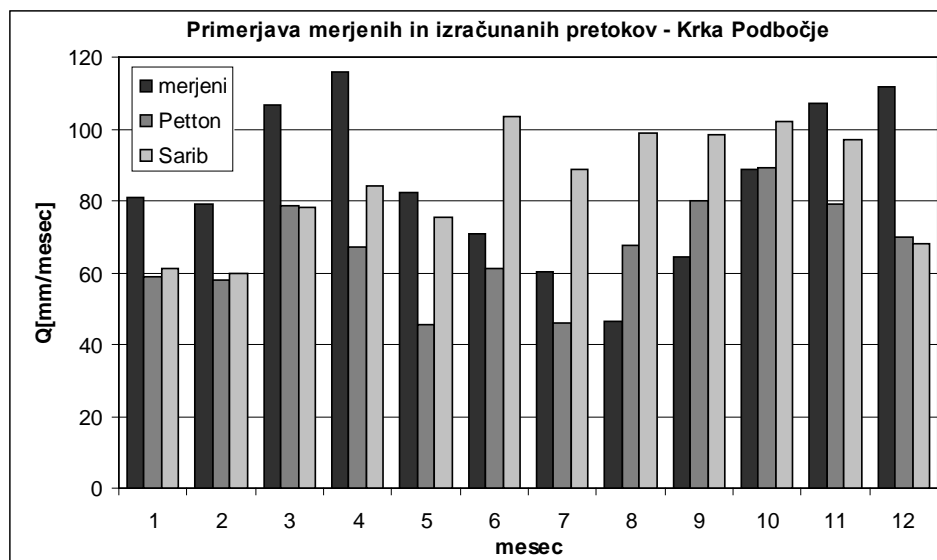


Grafikon 15: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Sava-Čatež





Grafikon 16: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Krka-Dvor

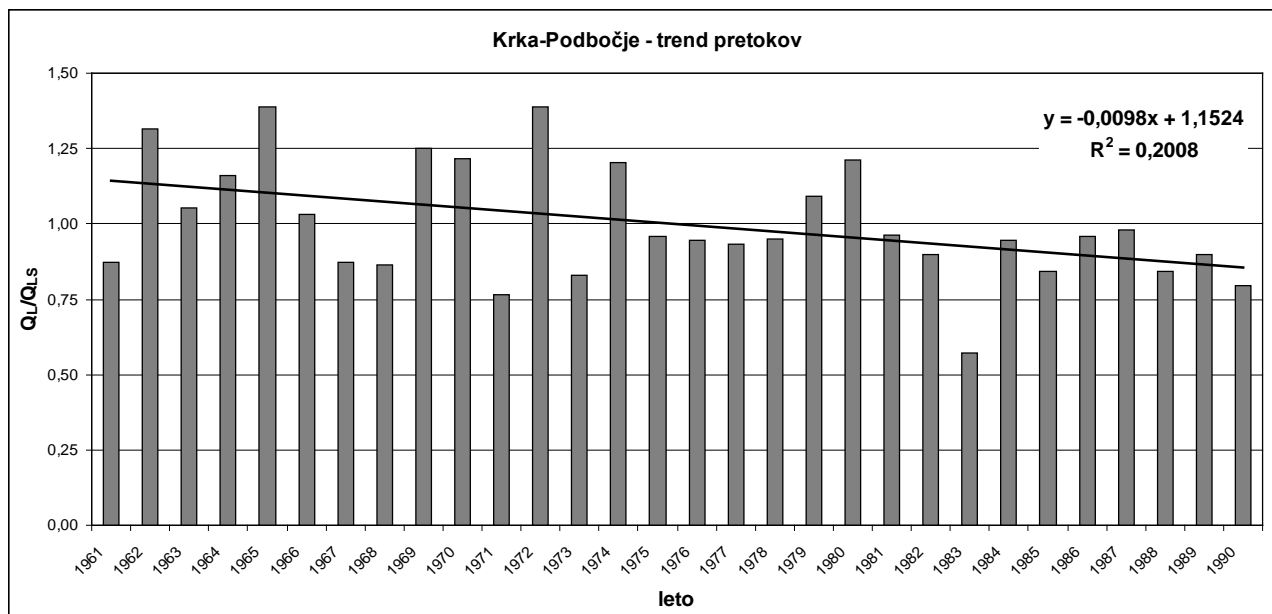


Grafikon 17: Primerjava merjenih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za podpovodje Krka-Podbočje

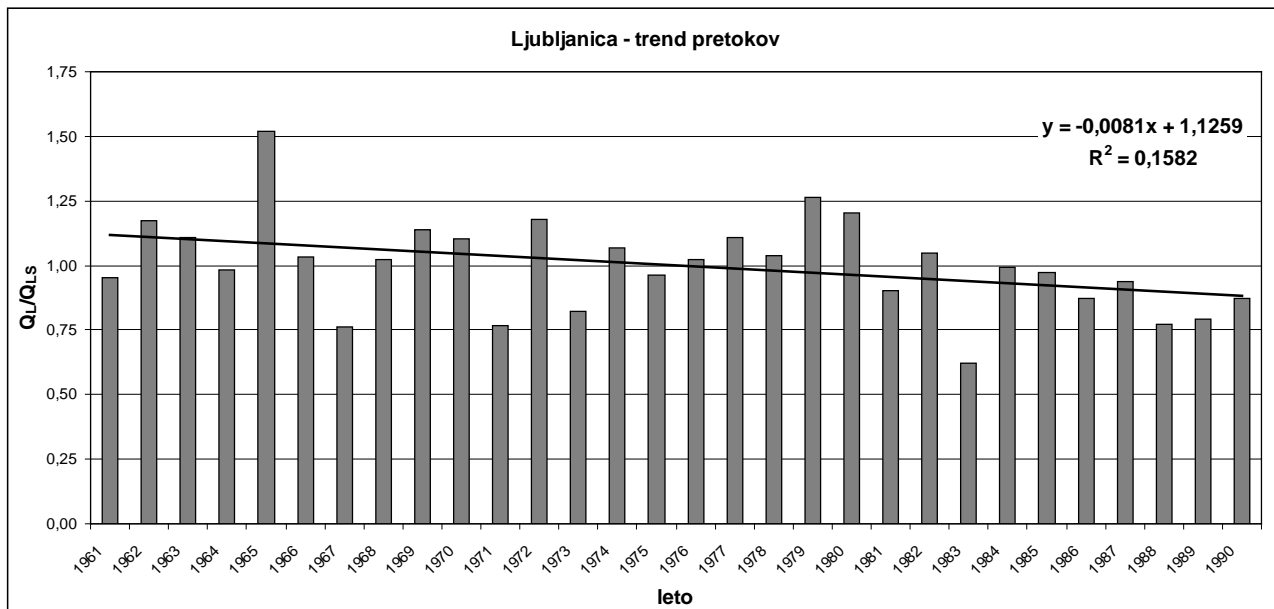
Zgornji grafikoni prikazujejo, da so odstopanja med merjenimi in izračunanimi (Sarib, Petton) pretoki kar precejšnja. Na oko so v nekaterih primerih boljši rezultati Pettona, v nekaterih pa rezultati Sariba. Najslabša ujemanja so v primeru Kamniška Bistrica, Krka-Dvor in Krka-Podbočje. Za natančnejšo oceno pa kasneje sledi nekaj numeričnih ocen.

## 6.6 Trendi pretokov

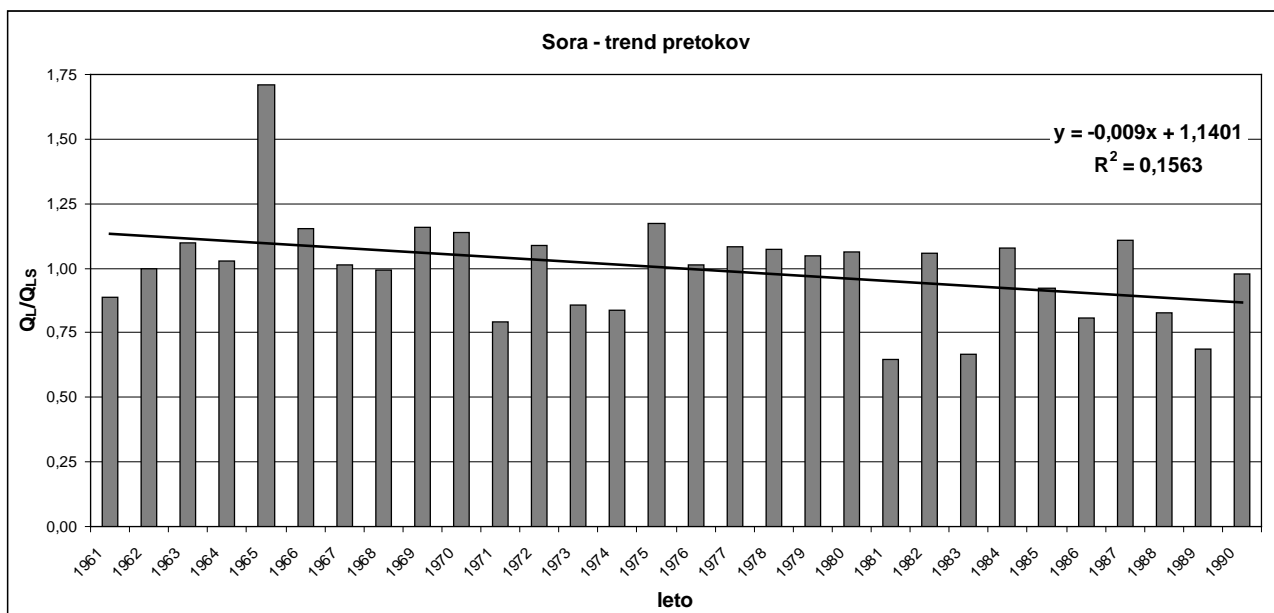
Analizirali smo trend pretokov na primerih Krka-Podbočje, Ljubljana in Sora. Iz vhodnih mesečnih pretokov med leti 1961 in 1990 smo izdelali brezdimenzijske diagrame letnih pretokov tako, da smo letne pretoke, ki smo jih dobili s seštetjem mesečnih pretokov, delili s povprečjem letnih pretokov v izbranih tridesetih letih (grafikoni 18, 19 in 20). Povprečje letnih pretokov na grafikonih prikazuje vodoravna črta pri vrednosti 1.



Grafikon 18: Brezdimenzijski diagram 30-letnih pretokov za primer Krka-Podbočje



Grafikon 19: Brezdimenzijski diagram 30-letnih pretokov za primer Ljubljana



Grafikon 20: Brezdimenzijski diagram 30-letnih pretokov za primer Sora

Vidimo, da trend letnih pretokov na omenjenih treh rekah pada pod svoje 30-letno povprečje.

### 6.7 Analiza ujemanj in napak

V preglednici 7 so podani naslednji koeficienti, ki povezujejo izračunane in merjene povprečne mesečne pretoke:

R – koeficient korelacije (Excelova funkcija CORREL)

d – indeks ujemanja

S – koren vsote kvadratov odstopanj

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (flowc_i - flowm_i)}{\sum_{i=1}^n (|flowc_i^*| - |flowm_i^*|)} \quad (15)$$

$$flowm_i^* = flowm_i - \overline{flowm} \quad (16)$$

$$flowc_i^* = flowc_i - \overline{flowm}$$

$$S = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n (flowm_i - flowc_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

Preglednica 7: Numerične ocene kvalitete rezultatov

	petton 1			Sarib			petton 2		
Podpovodje	R	d	S	R	d	S	R	d	S
Sava Dolinka	0,83	0,80	20	0,78	0,85	19	0,92	0,95	12

se nadaljuje

nadaljevanje

Sava Bohinjka	0,92	0,94	29	0,91	0,94	26	0,93	0,94	26
Sava - Kranj	0,75	0,84	12	0,59	0,76	17	0,79	0,86	11
Sora	0,86	0,85	21	0,85	0,85	21	0,96	0,90	17
Kamniška Bistrica	0,11	0,37	26	0,54	0,49	28	0,87	0,66	18
Ljubljana	0,76	0,86	16	0,60	0,76	26	0,90	0,94	11
Sava - Litija	0,61	0,75	15	0,48	0,70	14	0,82	0,90	9
Savinja - Celje	0,41	0,55	21	0,06	0,46	19	0,46	0,65	16
Savinja - V. Širje	0,37	0,62	12	0,38	0,62	12	0,65	0,78	9
Sava - Čatež	0,06	0,43	13	0,13	0,46	14	0,50	0,69	10
Krka - Dvor	0,72	0,65	24	0,72	0,62	26	0,87	0,71	20
Krka - Podbočje	0,34	0,51	27	-0,31	0,18	30	0,52	0,57	26

Korelacijski koeficient R govori o stohastični odvisnosti med dvema naboroma podatkov, po domače bi lahko rekli, da govori o podobnosti oblike krivulj dveh spremenljivk.

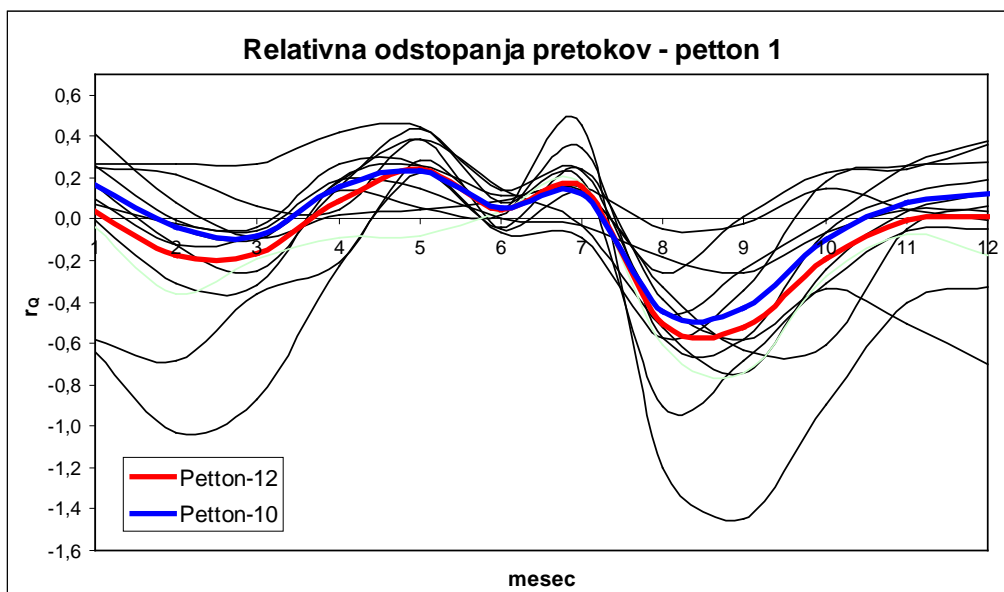
Koeficient S predstavlja koren povprečnega kvadrata odstopanj med dvema naboroma spremenljivk. Govori o tem, za koliko se v povprečju razlikujejo posamezne meritve in izračuni, ne glede na to ali so eni večji ali manjši od drugih.

Korelacijski koeficient je v primeru petton 1 precej boljši ali primerljiv z rezultati Sarib, razen v primeru Kamniška Bistrica in Sava Čatež, kjer je petton 1 precej slabši od Sariba. Rezultati v primeru petton 1 so po vseh kriterijih znatno boljši od rezultatov Sarib v primeru Sava-Kranj in Ljubljana, po korelacijskem koeficientu pa so znatno boljši Sava-Kranj, Ljubljana, Sava-Litija, Savinja-Celje in Krka-Podbočje. Slab korelacijski koeficient pa imajo Krka-Podbočje, Sava-Čatež, Savinja-Celje, Savinja-Veliko Širje in Kamniška Bistrica. V primeru Krka-Podbočje je za primer Sarib korelacijski koeficient celo negativen, v primeru petton 1 pa pozitiven.

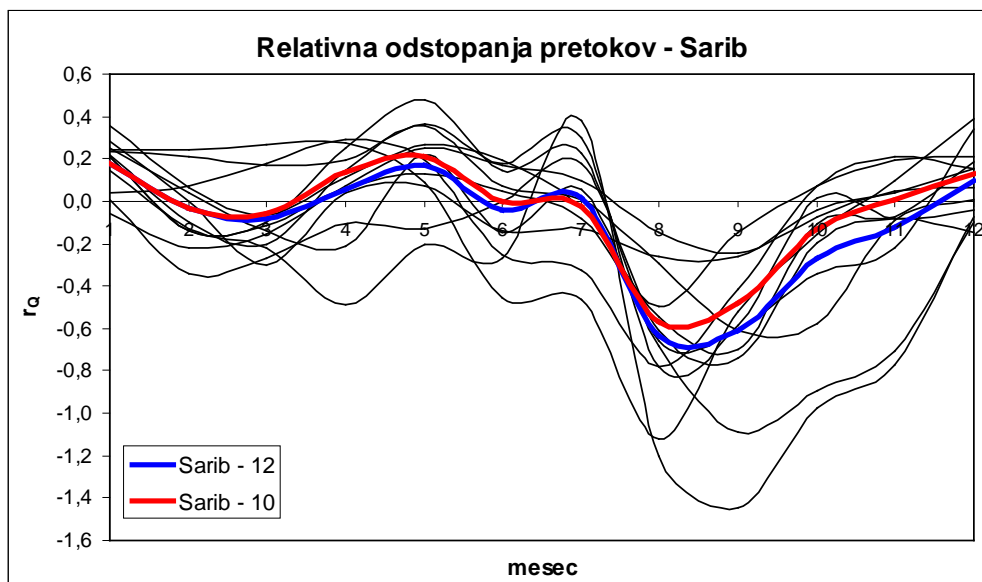
V primeru petton 2 so vsi koeficienti boljši od primerov petton 1 in Sarib, najmanjše razlike so v primeru Sava Bohinjka in Sava Dolinka. Najslabši rezultati, čeprav boljši od ostalih dveh primerov, so v primeru Savinja-Celje, Krka-Podbočje in Sava-Čatež.

Na grafikonih 21-23 so prikazana relativna odstopanja vhodnih in izračunanih povprečnih mesečnih pretokov za vseh dvanajst podpovodij za primer petton 1, Sarib in petton 2. Z modro barvo je prikazano njihovo povprečje, z rdečo pa povprečje brez upoštevanja Kamniške Bistrice in Krke Dvor, saj le ti predstavljata največja odstopanja in zaradi majhnega števila podatkov močno vplivata na povprečje. Povprečno odstopanje modre črte v primeru petton 1 je -8%, rdeče pa -1%, v primeru Sarib rdeča odstopa v povprečju -11%, modra pa 5%, v primeru petton 2 pa rdeča odstopa 4%, modra pa manj kot en procent.

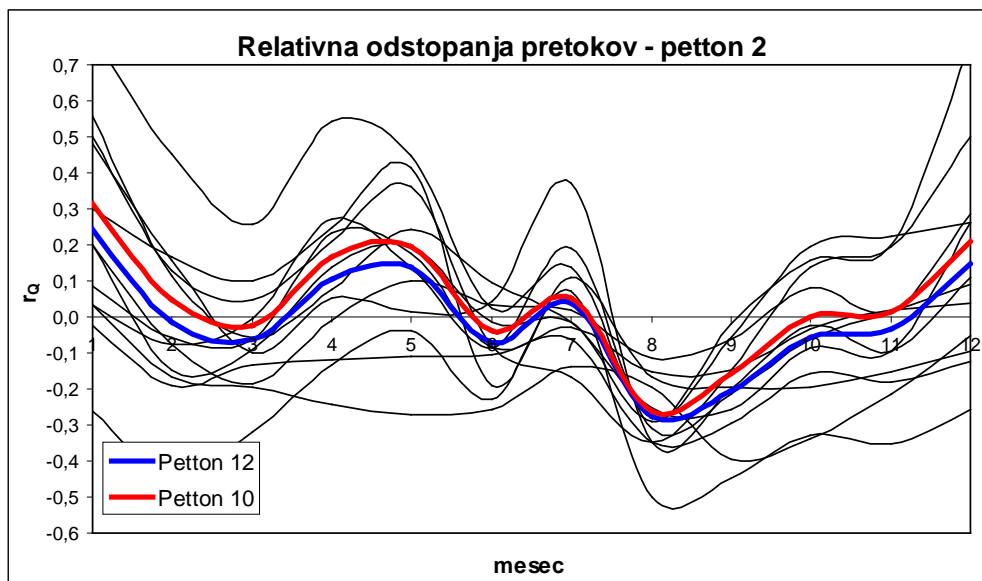
$$r_Q = \frac{\text{flowm} - \text{flowc}}{\text{flowm}} \quad (18)$$



Grafikon 21: Relativna odstopanja med merjenimi in izračunanimi povprečnimi mesečnimi pretoki za vsa podpovodja v primeru petton 1

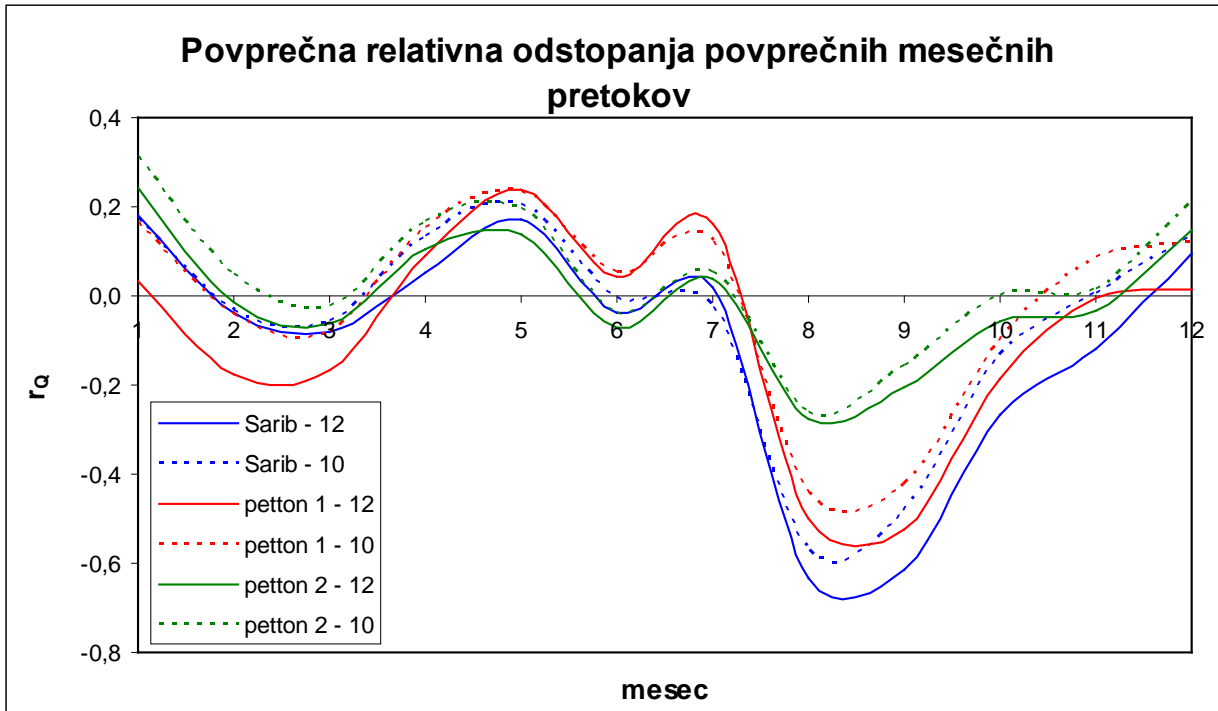


Grafikon 22: Relativna odstopanja med merjenimi in izračunanimi povprečnimi mesečnimi pretoki za vsa podpovodja iz projekta Sarib.



Grafikon 23: Relativna odstopanja med merjenimi in izračunanimi povprečnimi mesečnimi pretoki za vsa podpovodja v primeru petton 2.

Na grafikonih 24 so prikazana vsa povprečja za vse tri primere.



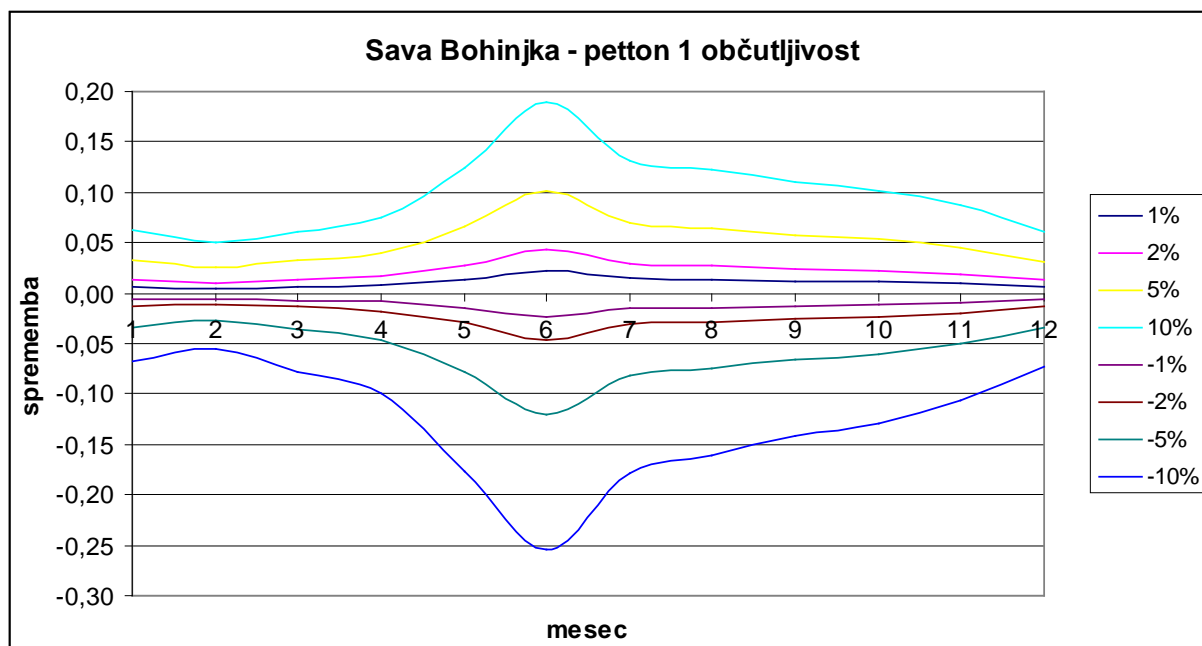
Grafikon 24: Primerjava povprečnih relativnih odstopanj povprečnih mesečnih pretokov za primer vseh dvanajstih podpovodij in za primer desetih podpovodij brez podpovodja Kamniška Bistrica in Krka-Dvor.

Na gornjih grafikonih je jasno poudarjeno odstopanje v jesenskem obdobju. Tu daje Watbal za uporabljene vrednosti parametrov prevelike pretoke. Značilna sta tudi meseca maj in julij. Zanesljivo lahko sklepamo, da daje Watbal premajhne odtoke maja, julija in decembra, prevelike odtoke pa februarja, marca, avgusta, septembra in novembra. Kljub temu, da smo v primeru petton 2 vzeli za optimizacijo precej široko parametrsko območje, ki je posegalo izven fizikalno smiselnih meja, je še vedno opazen trend odstopanj, ki je po obliki soroden ostalima dvema primeroma, le da je bolj pohleven.

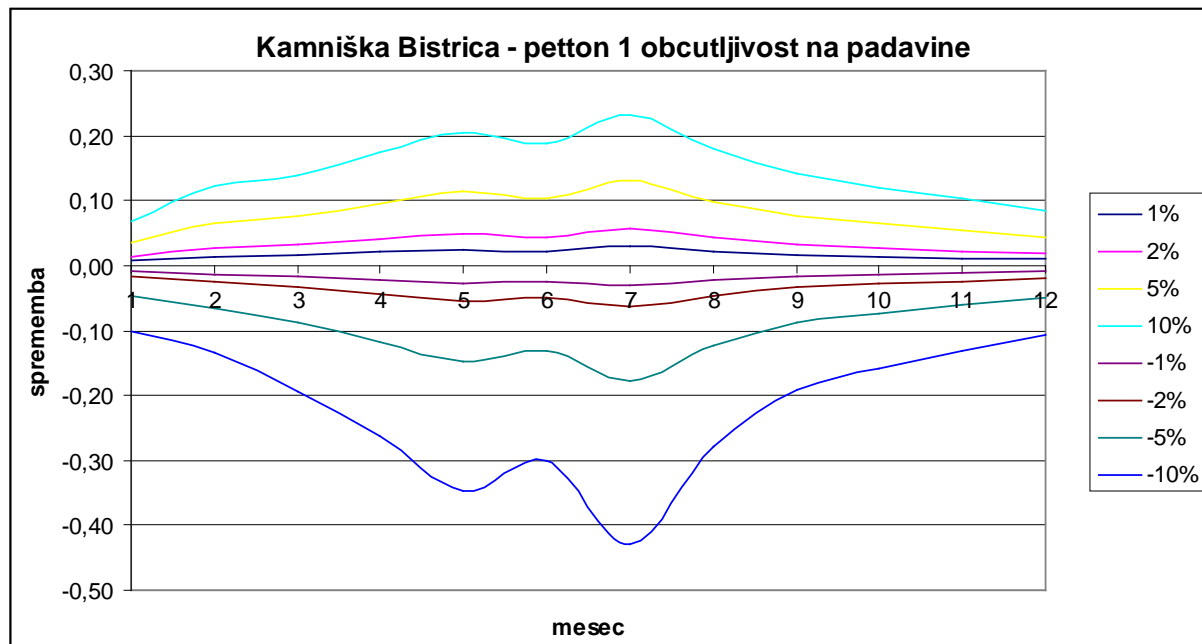


## 6.8 Analiza občutljivosti

Za primera Sava Bohinjka in Kamniška Bistrica, ki predstavljata najboljši in najslabši rezultat, smo opravili tudi občutljivostno analizo pretokov, ki predstavljajo rezultat, na spremembo padavin. Tako smo vhodne padavine v model Watbal povečali in pomanjšali za 1, 2, 5 in 10 procentov. Izkazalo se je, da so spremembe v izračunanem pretoku relativno večje kot pa spremembe v vhodnih padavinah. Značilno je tudi to, da so bolj občutljivi na spremembe poletni meseci. Primer Kamniška Bistrica je pokazal večjo občutljivost na zmanjšanje padavin. Rezultati so prikazani spodaj (grafikona 25 in 26).



Grafikon 25: Sprememba izhodnega pretoka na spremembo vhodnih padavin za primer Sava Bohinjka.



Grafikon 26: Sprememba izhodnega pretoka na spremembo vhodnih padavin za primer Sava Bohinjka.

## 7 ZAKLJUČKI

Algoritem Petton smo uspešno uporabili za avtomatsko kalibracijo modela Watbal. Izračun optimalnih parametrov je bil tako mnogo hitrejši kot v primeru poskusov in napak v kombinaciji z Excelovo Goal Seek funkcijo. Watbalovi rezultati so v primeru novih parametrov boljši kot v projektu Sarib, kjer je bil uporabljen že omenjen način kalibracije. V kakovost algoritma lahko zaupamo predvsem zato, ker izračuna vrednost objektivne funkcije v vsaki celici vnaprej izbranega parametrskega prostora. Pri analizi odstopanj vhodnih in izračunanih pretokov se je jasno pokazala anomalija v mesecu maju, juliju in jesenskem obdobju. Sklepamo lahko, da bi bilo potrebno enačbe v Watbalu spremeniti, predvsem bi bilo potrebno pod drobnogled vzeti evapotranspiracijo in pa možnost vključitve podtalnice. Pri občutljivostni analizi, ki smo jo opravili le na najboljšem in najslabšem rezultatu (Sava Bohinjka, Kamniška Bistrica), kjer smo ugotavljali odziv izračunanih pretokov na spremembo vhodnih padavin, smo ugotovili, da so odzivi pretokov relativno večji od sprememb padavin, najbolj pa so občutljivi poletni meseci. Če povzamemo, lahko rečemo, da je algoritem Petton hitro in zelo uspešno opravil svoje delo, glede modela Watbal pa bi bilo smiselno preučiti možnost vključitve podtalnice.

## VIRI

Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. 1989. Numerical Recipes – The Art of Scientific Computing, 5th edition. Cambridge, New York, Port Chester, Melbourne, Sydney, Cambridge University Press: str. 274-334.

Kuščer, I., Kodre, A. 1993. Matematika v fiziki in tehniki. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo: str. 267-310.

Anderson, M. G., Bates, P. D. 2001. Hydrological Science: Model Credibility and Scientific Integrity. V: Anderson, M. G., Bates, P. D. Model Validation – Perspectives in Hydrological Science, 2nd edition. Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, John Wiley & Sons: str. 11-22.

Morton, A., Suarez, M. 2001. Kinds of Models. V: Anderson, M. G., Bates, P. D. Model Validation – Perspectives in Hydrological Science, 2nd edition. Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, John Wiley & Sons: str. 11-22.

Dietrich, C. R. 2001. On Simulation, Calibration and Ill-conditioning with Application to Environmental System Modelling. V: Anderson, M. G., Bates, P. D. Model Validation – Perspectives in Hydrological Science, 2nd edition. Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, John Wiley & Sons: str. 77-116.

Morel, H. J. S. 2001. Groundwater. V: Anderson, M. G., Bates, P. D. Model Validation – Perspectives in Hydrological Science, 2nd edition. Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, John Wiley & Sons: str. 293-324.

Gray, M. D. 1973. Introduction to Hydrology. V: Gray, M. D. Handbook of the Principles of Hydrology, 2nd edition. New York, Water Information Center: str. 1.1-1.5

Maidment, D. R. 1993. Hydrology. V: Maidment, D. R. Handbook of Hydrology. New York, San Francisco, Washington D. C., Auckland, Bogota, Caracas, Lisbon, London, Madrid, Mexico City, Milan, Montreal, New Delhi, San Juan, Singapore, Sydney, Tokyo, Toronto, McGRAW-HILL: str. 1.1-1.15.

Ponce, V. M. 1989. Engineering Hydrology, Principles and Practices. New Jersey, Upper Saddle River, Prentice-Hall: str. 1-94.

Petrovič, P., Nachtnebel, H. P., Zimmerman, L. in sod. 2004. Basin – Wide Water Balance in the Danube River Basin. December 2004. Budimpesta. 140 str.

Petrovič, P. Water Balance Model and Tuning Parameters. 22nd Conference of Danube Countries on Hydrological Forecasting and...

Petrovič, P., Badurova, K. 2004. GIS Technology Use in Basin-Wide Water Balance Estimation of the Danube River Basin. Conference: The Danube and Europe – Integrated Space Applications in the Danube Basin, 23-25 june 2004. Mamaia, Romania: 8 str.

## PRILOGA A: ALGORITEM PETTON

```
function [ming,cas] = petton(std,stu,sts,rtd,rtu,rts,mfd,mfu,mfs,wcd,wcu,wcs,pd,pu,ps)

%PETTON      Program for automatic optimization of Watbal model (water
%balance model).
%PETTON(std,stu,sts,rtd,rtu,rts,mfd,mfu,mfs,wcd,wcu,wcs,pd,pu,ps) finds optimal
%parameters by the least squares method.
%std and stu: atsnow lower and upper value.
%rtd in rtu: atrain lower and upper value.
%mfd and mfu: mdgfac lower and upper value.
%wcd and wcu: wsffc lower and upper value.
%pd and pu: priesk lower and upper value.
%sts: atsnow step, recommended value 1.
%rts: atrain step, recommended value 1.
%mfs: mdgfac step, recommended value 10.
%wcs: wsffc step, recommended value 10.
%ps: priesk step, recommended value 0.1.

%See also Help\Toolboxes\Optimization

%Read data from txt file. You must put it in handy.

sprintf('Hello user.\n')
sprintf('I am reading data.')
data = dlmread('sora.txt','');

numa = size(data);
num = numa(1);

%Average of precipitation and measured flow.
mpre = 12*mean(data(2:end,2));
mflowm = 12*mean(data(2:end,4));

%Monthly averages of measured flow.
flowm1 = mean(data(2:12:end,4));
flowm2 = mean(data(3:12:end,4));
flowm3 = mean(data(4:12:end,4));
flowm4 = mean(data(5:12:end,4));
flowm5 = mean(data(6:12:end,4));
flowm6 = mean(data(7:12:end,4));
flowm7 = mean(data(8:12:end,4));
flowm8 = mean(data(9:12:end,4));
flowm9 = mean(data(10:12:end,4));
flowm10 = mean(data(11:12:end,4));
flowm11 = mean(data(12:12:end,4));
flowm12 = mean(data(13:12:end,4));
flowm = [flowm1, flowm2, flowm3, flowm4, flowm5, flowm6, flowm7, flowm8, flowm9, flowm10,
flowm11, flowm12];

%Parameteric space.
atsnow = std:sts:stu;
atrain = rtd:rts:rtu;
mdgfac = mfd:mfs:mfu;
wsffc = wcd:wcs:wcu;
priesk = pd:ps:pu;

%Needed quantities and their initial values.
c = 150;
b = 150;
min = [];
crit = 1e20;

%Time counter.
```



```
        sm1 = s - (s - awsffc) * apriesk;
    end

    %WSURF
    wsurf = wsurf - n;

    p = 1 - data(i,3) / (2 * wcrit); %Preevaluation
    r = 1 + data(i,3) / (2 * wcrit); %Preevaluation

    %AET
    if 0.5*(sm1 + sm1 * p / r) > wcrit
        aet = [aet;data(i,3)];
    else
        aet = [aet;data(i,3) * 0.5 * (sm1 + sm1 * p / r) / wcrit];
    end

    u = sm1 - aet(i); %Preevaluation

    %SM2
    if u < awsffc
        sm2 = u;
    else
        sm2 = awsffc;
    end

    %WDELTM
    wdeltm = [wdeltm; wdeltm(i - 1) + prel(i) - aet(i) - data(i,4)];

end

%Minimum criteria
mw = abs(mean(wdeltm(2:end)));
ew = abs(wdeltm(end));
bd = abs(mpre - 12*mean(aet(2:end)) - mflowm - sm2 + c - wsurf + b);

%Monthly averages of computed flow.
flowc1 = mean(prel(2:12:end))-mean(aet(2:12:end));
flowc2 = mean(prel(3:12:end))-mean(aet(3:12:end));
flowc3 = mean(prel(4:12:end))-mean(aet(4:12:end));
flowc4 = mean(prel(5:12:end))-mean(aet(5:12:end));
flowc5 = mean(prel(6:12:end))-mean(aet(6:12:end));
flowc6 = mean(prel(7:12:end))-mean(aet(7:12:end));
flowc7 = mean(prel(8:12:end))-mean(aet(8:12:end));
flowc8 = mean(prel(9:12:end))-mean(aet(9:12:end));
flowc9 = mean(prel(10:12:end))-mean(aet(10:12:end));
flowc10 = mean(prel(11:12:end))-mean(aet(11:12:end));
flowc11 = mean(prel(12:12:end))-mean(aet(12:12:end));
flowc12 = mean(prel(13:12:end))-mean(aet(13:12:end));
flowc = [flowc1, flowc2, flowc3, flowc4, flowc5, flowc6, flowc7, flowc8,
flowc9, flowc10, flowc11, flowc12];

%Checking minimum and building table of minimums.
if sqrt(sum((flowm-flowc).^2)) < crit
    crit = sqrt(sum((flowm-flowc).^2));
    min = [min;mw,bd,ew,
aatsnow,aatrain,amdgifac,awsffc,apriesk,wcrit,sm2,wsurf];
    c = sm2;
    b = wsurf;
end
end
end
end
end
end

%Evaluation of criterial function through parameter wcrit, which differes
%from wsffc by most +-5.
```



```
fprintf('I am starting evaluation through parameter wcrit.')
ming = [];

vela = size(min);
vel = vela(1);

%Taking the best max minimums from previous minimization.

if vel < 10
    max = vel;
else
    max = 10;
end

for k = 1:max

    if k == 5
        fprintf('The end is coming.')
    end

    %Needed quantities and their initial values.
    crit = 1e20;
    minm = [];

    %Choosing the best parameters values from the previous minimization.
    bmdgfac = min(end-max+k,6);
    batsnow = min(end-max+k,4);
    batrain = min(end-max+k,5);
    bwsffc = min(end-max+k,7);
    bpriesk = min(end-max+k,8);
    c = min(end-max+k,10);
    b = min(end-max+k,11);

    wcrit = bwsffc-5:1:bwsffc+5;

    t = min(end-max+k,5) - min(end-max+k,4); %Preevaluation

    %Evaluation of criterial function through parameter wcrit.
    for j = 1:11

        %Starting values of variables which builds tables.
        wdeltm = 0;
        aet = 0;
        sm2 = c;
        wsurf = b;
        bwcrit = wcrit(j);

        %Evaluation of criterial function in parametric point.
        for i = 2:num

            m = bmdgfac * (data(i,1) - batsnow); %Predracun

            %SOLPRE
            if data(i,1) < batsnow
                solpre = data(i,2);
            elseif data(i,1) > batrain
                solpre = 0;
            else
                solpre = data(i,2) * (batrain - data(i,1))/t;
            end

            %SNMELT

            if wsurf < 0 || wsurf == 0 || data(i,1) < batsnow
                snmelt = 0;
            elseif data(i,1) > batrain
```

```
        if m > wsurf
            smelt = wsurf;
        else
            smelt = m;
        end
    else
        if m^2/(bmdgfac*t) > wsurf
            smelt = wsurf;
        else
            smelt = m^2/(bmdgfac*t);
        end
    end

n = smelt - solpre; %Preevaluation

%PREL
prel = [prel;data(i,2) + n];

s = sm2 + prel(i); %Preevaluation

%SM1
if s < bwsffc
    sm1 = s;
else
    sm1 = s - (s - bwsffc) * bpriesk;
end

%WSURF
wsurf = wsurf - n;

p = 1 - data(i,3) / (2 * bwcrit); %Preevaluation
r = 1 + data(i,3) / (2 * bwcrit); %Preevaluation

%AET
if 0.5*(sm1 + sm1 * p / r) > bwcrit
    aet = [aet;data(i,3)];
else
    aet = [aet;data(i,3) * 0.5 * (sm1 + sm1 * p / r) / bwcrit];
end

u = sm1 - aet(i); %Preevaluation

%SM2
if u < bwsffc
    sm2 = u;
else
    sm2 = bwsffc;
end

%WDELTM
wdelmtm = [wdelmtm; wdelmtm(i - 1) + prel(i) - aet(i) - data(i,4)];

end

%Checking minimum and building table of minimums.
mw = abs(mean(wdelmtm(2:end)));
ew = abs(wdelmtm(end));
bd = abs(mpre - 12*mean(aet(2:end)) - mflowm - sm2 + c - wsurf + b);

%Monthly averages of computed flow.
flowc1 = mean(prel(2:12:end))-mean(aet(2:12:end));
flowc2 = mean(prel(3:12:end))-mean(aet(3:12:end));
flowc3 = mean(prel(4:12:end))-mean(aet(4:12:end));
flowc4 = mean(prel(5:12:end))-mean(aet(5:12:end));
flowc5 = mean(prel(6:12:end))-mean(aet(6:12:end));
flowc6 = mean(prel(7:12:end))-mean(aet(7:12:end));
flowc7 = mean(prel(8:12:end))-mean(aet(8:12:end));
```

```
flowc8 = mean(prel(9:12:end))-mean(aet(9:12:end));
flowc9 = mean(prel(10:12:end))-mean(aet(10:12:end));
flowc10 = mean(prel(11:12:end))-mean(aet(11:12:end));
flowc11 = mean(prel(12:12:end))-mean(aet(12:12:end));
flowc12 = mean(prel(13:12:end))-mean(aet(13:12:end));
flowc = [flowc1, flowc2, flowc3, flowc4, flowc5, flowc6, flowc7, flowc8, flowc9, flowc10,
flowc11, flowc12];

%Checking minimum and builing table of minimums.
if sqrt(sum((flowm-flowc).^2)) < crit
    crit = sqrt(sum((flowm-flowc).^2));
    minm = [minm;mw,bd,ew,batsnow,batrain,bmdgfac,bwsffc,bpriesk,wcrit(j),sm2,wsurf];
    c = sm2;
    b = wsurf;
end
end
%ming gives 10 best parametric vectors, which give the optimized
%results for computed flow by the least squares method.
ming = [ming;minm(end,:)];
end
sprintf('The best results I could find are:')
%Needed time estimation.
cas = cputime - cas;
```

## PRILOGA B: PARAMETRSKI PROSTOR

Podpovodje	WSFFC		ATSNOW		ATRRAIN		MDGFAC		PRIESK	
Sava Dolinka	100	300	-19	-5	11	17	20	120	0,1	1
Sava Bohinjka	100	300	-9	-5	10	14	20	120	0,1	1
Sava - Kranj	100	300	-7	-3	12	16	20	120	0,1	1
Sora	100	300	-7	-2	7	12	10	100	0,1	1
Kamniška Bistrica	100	300	-6	-1	13	17	20	120	0,1	1
Ljubljana	100	300	-6	-2	8	12	20	120	0,1	1
Sava - Litija	100	300	-6	-2	5	10	10	100	0,1	1
Savinja - Celje	100	300	-7	-2	12	17	10	100	0,1	1
Savinja - V. Širje	100	300	-5	-1	7	12	10	100	0,1	1
Sava - Čatež	100	300	-6	-1	6	11	10	100	0,1	1
Krka - Dvor	100	300	-7	-2	5	10	10	100	0,1	1
Krka - Podbočje	100	300	-6	-1	6	10	20	120	0,1	1

### **PRILOGA C: IZRAČUNANI PARAMETRI Z ALGORITMOM PETTON**

Podpovodje	WCRT	WSFFC	ATSNOW	ATRAIN	MDGFAC	PRIESK
Sava Dolinka	105	100	-9	13	120	1
Sava Bohinjka	105	100	-9	11	20	1
Sava – Kranj	105	100	-7	12	120	1
Sora	295	300	-7	12	65	0,1
Kamniška Bistrica	296	300	-6	17	100	0,7
Ljubljana	275	280	-6	12	120	0,9
Sava – Litija	190	195	-6	10	10	0,8
Savinja – Celje	165	160	-7	12	35	1
Savinja - V. Širje	255	260	-5	12	40	1
Sava – Čatež	98	100	-6	10	120	0,8
Krka - Dvor	295	300	-6	10	70	0,1
Krka - Podbočje	105	100	-6	10	110	1

## PRILOGA D: REZULTAT ALGORITMA PETTON

```

MATLAB 7.3.0 (R2006b)
File Edit Debug Desktop Window Help
Current Directory: C:\Program Files\MATLAB\R2006b\work\Calibration

>> [ming,cas] = petton(-6,-2,1,7,11,1,20,120,10,100,300,10,0,1,1,0,1)

ans =

Hello user.

ans =

I am reading data.

ans =

I am starting evaluation through parametric space.

ans =

I am starting evaluation through parameter writ.

ans =

The end is coming

ans =

The best results I could find are:

ming =
    
```

```

MATLAB 7.3.0 (R2006b)
File Edit Debug Desktop Window Help
Current Directory: C:\Program Files\MATLAB\R2006b\work\Calibration

I am starting evaluation through parameter writ.

ans =

The end is coming

ans =

The best results I could find are:

ming =

1.0e+003 *

    4.3460    0.1853    7.5607   -0.0060    0.0110    0.0900    0.3000    0.0001    0.3050    0.3000    0.0920
    4.3625    0.1862    7.6059   -0.0060    0.0110    0.1000    0.2200    0.0001    0.2250    0.2200    0.0920
    4.3307    0.1844    7.5328   -0.0060    0.0110    0.1000    0.2300    0.0001    0.2250    0.2300    0.0920
    4.3293    0.1843    7.5294   -0.0060    0.0110    0.1000    0.2400    0.0001    0.2350    0.2400    0.0920
    4.3281    0.1843    7.5262   -0.0060    0.0110    0.1000    0.2500    0.0001    0.2450    0.2500    0.0920
    4.3269    0.1842    7.5232   -0.0060    0.0110    0.1000    0.2600    0.0001    0.2550    0.2600    0.0920
    4.3258    0.1841    7.5205   -0.0060    0.0110    0.1000    0.2700    0.0001    0.2650    0.2700    0.0920
    4.3248    0.1841    7.5178   -0.0060    0.0110    0.1000    0.2800    0.0001    0.2750    0.2800    0.0920
    4.3238    0.1840    7.5154   -0.0060    0.0110    0.1000    0.2900    0.0001    0.2850    0.2900    0.0920
    4.3229    0.1839    7.5131   -0.0060    0.0110    0.1000    0.3000    0.0001    0.2950    0.3000    0.0920

cas =

534.4844

>>
    
```

## PRILOGA E: MODEL WATBAL

Microsoft Excel - sora

Datoteka Urejanje Pogled Vstavljanje Oblika Orodja Grafikon Okno Pomoc

Vnesite vprašanje

Področje grafi...

SORA 1960-2000														
VARIABLES - STARTING DATA			SM			WDELTM			WDMmean			WSURF		
START			300,00			0			4369,81			92,00		
END			300,00			7541,5						91,50		
OPTIMISATION PARAMETERS														
WCRT			WSFPC			ATSNOW			ATRAIN			ATMIX		
295			300			-6,0			11,0			17		
1												0,1000		
kriteria														
H522			I527			H504			a,b			b,c		
4369,81			184,4			7541,52			19129245,8			1E+09		
WDELTMm			BDELTA			WDELTMd			a,c			a,c		
mean			abs.mon.er			abs.W dev.								
Hmin 311														
Hmax 1674														
Hmean 665														
ATSNOW -2,301														
ATRAIN 6,5585														
MES TEMP PRE PET AET SMI SM2 WDELTM SOLPRE SNMELT WSURF PREL PRSM TIME FLOWMM														
12 3,4 205,9 10,5 10,3 524,2 300,0 7541,5 91,5 134,8 91,5 249,1 412,1 492 124,449														
2000														
MONTH TEMP PRE PET AET SMI SM2 WDELTM SOLPRE SNMELT WSURF PREL PRSM FLOWMM														
simulated Q [%]														
1 -1,40 107,49 12,82 12,82 388,36 299,43 4287,52 79,79 70,47 114,34 98,17 343,89 241,00 82,03														
2 0,19 102,84 20,42 20,40 403,28 298,31 4312,66 67,17 79,66 101,85 115,33 350,79 242,00 69,79														
3 3,45 125,14 40,25 40,11 441,94 296,99 4332,13 57,37 91,82 67,39 159,40 369,46 243,00 99,81														
4 7,47 149,31 64,49 64,49 463,78 298,89 4341,65 31,91 67,59 31,91 184,99 381,34 244,00 110,98														
5 12,24 145,85 92,02 92,02 456,94 296,64 4348,01 2,27 31,91 2,27 175,49 376,79 245,00 77,12														
6 15,43 171,19 108,13 107,93 453,10 292,88 4345,31 0,00 2,27 0,00 173,46 372,99 246,00 68,23														
7 17,55 152,88 110,00 109,75 431,19 285,09 4336,16 0,00 0,00 0,00 152,88 358,14 247,00 52,29														
8 17,24 160,37 92,39 91,39 430,89 285,76 4362,31 0,00 0,00 0,00 160,37 358,33 248,00 42,82														
9 13,66 176,45 39,70 39,62 445,93 296,18 4412,24 0,06 0,00 0,06 176,39 371,05 249,00 66,84														
10 9,00 194,52 37,73 37,41 449,89 293,53 4441,28 24,15 0,06 24,15 170,44 371,71 250,00 103,98														
11 3,71 222,92 20,26 20,26 434,01 299,14 4450,31 91,70 24,15 91,70 155,36 366,57 251,00 126,08														
12 -0,25 144,06 12,48 12,48 416,91 300,00 4468,13 93,62 80,32 105,00 130,76 358,45 252,00 100,43														
MEAN or TOTAL 8,2 1853,0 670,7 668,7 1853,0 1000,4 1184,34 1184,35 75,26														
MAXIMUM 22,20 606,43 132,21 132,21 395,75 509,85 529,43 397,71														
MEAN 8,19 154,42 55,89 55,72 4369,81 37,35 154,42 364,96 83,37														
MINIMUM -7,17 -0,48 4,58 4,58 0,00 0,00 240,06 13,02														
WCRT 295 WSFPC 300,0 WSTAR 300,0														
WSURF 92 WSURF2 91,5 W2 300,0														
WDELTM WDELTM2 7541,5														
ATSNOW -6 ATRAIN 11,0 MDGFAC 100,0 PRIESKO 0,1														
Average monthly temperature														
Average monthly precipitation and a														

Comparison of simulated and observed runoff

NUM

start Diploma - Microsoft... WB-info-v3aa - Mc... MATLAB 7.3.0 (R2... Rezultati pretokov sora model Windows Media Pla... 18:25

## PRILOGA F: REZULTATI – MESEČNI RPETOKI

