

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 Gradbeništvo,  
Hidrotehniška smer

Kandidat:

**Miha Primožič**

# **Umerjanje HBV modela za porečje reke Save v Sloveniji**

**Diplomska naloga št.: 2990**

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

**Somentor:**  
asist. dr. Mira Kobold

Ljubljana, 21. 12. 2007

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani **MIHA PRIMOŽIČ** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom  
**»UMERJANJE HBV MODELA ZA POREČJE REKE SAVE V SLOVENIJI«**.

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL,  
Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 04.12.2007

**BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK****UDK: 519.61/.64:556.16:556.52(282.242.743)(043.2)****Avtor: Miha Primožič****Mentor: prof. dr. Mitja Brilly****Somentor: dr. Mira Kobold****Naslov: Umerjanje HBV modela za porečje reke Save v Sloveniji****Obseg in oprema: 81 str., 11 pregl., 51 sl., 21 en., 2 pril.****Ključne besede: HBV, odtok, porečje Save, modeliranje, padavine, evapotranspiracija****Izvleček**

Diplomsko delo obravnava kalibracijo in verifikacijo HBV modela za porečje reke Save, z dvema različnima časovnima korakoma, dnevom in uro.

Modelirano porečje obsega 10098.49 km<sup>2</sup> in je razdeljeno na 26 podpovodij, velikosti od 0.26 km<sup>2</sup> do 1019.85 km<sup>2</sup>. Vsako podpovodje je nadalje razdeljeno še na elevacijske in vegetacijske cone.

Švedski konceptualni model HBV je na porečju reke Save uporabljen za računanja odtoka s posameznih podpovodij in celotnega porečja ter ostalih hidroloških spremenljivk.

Rezultati umerjanja so za oba modela z različnima časovnima korakoma dan in ura prikazani v obliki hidrogramov, ki so podani za vsako posamezno podpovodje kot tudi za celotno porečje. Podan je prikaz izračunanih in opazovanih pretokov ter statistične primerjave med njimi za obdobje umerjanja modela. Za model z dnevnim časovnim korakom je bilo upoštevano obdobje 1990-1999 za kalibracijo modela in 2000-2006 za verifikacijo. Urni model je bil umerjen na obdobju dveh let 1998 in 1999.

HBV model porečja reke Save z urnim časovnim korakom je bil v okviru te diplomske naloge tudi uporabljen za simulacijo 15 padavinskih scenarijev.

## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC: 519.61/.64:556.16:556.52(282.242.743)(043.2)**

**Author: Miha Primožič**

**Supervisor: prof. dr. Mitja Brilly**

**Co-supervisor: dr. Mira Kobold**

**Title: Calibration of the HBV model for the Sava watershed in Slovenia**

**Notes: 81 p., 11 tab., 51 fig., 21 eq., 2 ann.**

**Key words: HBV, runoff, Sava watershed, modelling, rainfall, evapotranspiration**

### **Abstract**

The present work focuses on the calibration and verification of the HBV model for Sava watershed, with two different time steps, day and one hour.

Modeled watershed covers an area of 10098.49 km<sup>2</sup> and it is divided into 26 subbasins with areas ranging from 0.26 km<sup>2</sup> to 1019.85 km<sup>2</sup>. Each subbasin is then divided into different elevation and vegetation zones.

The Swedish conceptual HBV model on the Sava watershed was used for runoff simulation from subbasins as well for computing other hydrological variables.

The results of calibration of two models for the Sava watershed with daily and hourly time steps are presented in the form of hydrographs for each subbasin as well for the whole watershed. Calculated and observed discharges are presented for all subbasins and the whole watershed, and some statistical analyses for the calibration and verification period are added. The period 1990-1999 was used for the calibration and 2000-2006 for the verification of the daily HBV model. The hourly model was calibrated on the period 1998-1999.

The HBV model for Sava watershed with hourly time step was further used for simulation of 15 different rainfall scenarios.

## ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. M. Brillyju in somentorici dr. M. Kobold. Hvala tudi vsem na ARSO, ki so mi omogočili prijetno delovno vzdušje.

Posebej bi se zahvalil Tomažu Hanžinu, ki mi je skozi vsa leta študija nudil pomoč in Tjaši, ki mi je pomagala vsak dan narediti lepši.

## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Kroženje vode v naravi</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Površinski odtok</b>	<b>2</b>
<b>1.3</b>	<b>Hidrološki modeli</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>MODEL HBV</b>	<b>7</b>
<b>2.1</b>	<b>Splošni opis modela</b>	<b>7</b>
<b>2.2</b>	<b>Struktura modela</b>	<b>8</b>
<b>2.3</b>	<b>Računski postopek za sneg</b>	<b>11</b>
<b>2.4</b>	<b>Računski postopek za tla in oceno evapotranspiracije</b>	<b>12</b>
<b>2.5</b>	<b>Generiranje odtoka in transformacijska funkcija</b>	<b>14</b>
<b>2.6</b>	<b>Vhodni podatki in umerjanje modela</b>	<b>16</b>
<b>2.7</b>	<b>Rezultati modela</b>	<b>18</b>
<b>3</b>	<b>POREČJE SAVE</b>	<b>19</b>
<b>3.1</b>	<b>Geološke in geografske značilnosti</b>	<b>19</b>
<b>3.2</b>	<b>Pretoki in rečni režimi</b>	<b>22</b>
<b>3.3</b>	<b>Padavine</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>IMPLEMENTACIJA MODELA HBV NA POREČJU SAVE</b>	<b>28</b>
<b>4.1</b>	<b>Zgradba HBV modela z dnevnimi podatki</b>	<b>28</b>
<b>4.2</b>	<b>Kalibracija in verifikacija HBV modela z dnevnimi podatki</b>	<b>45</b>
<b>4.3</b>	<b>Prehod na HBV model z urnimi podatki</b>	<b>57</b>
<b>4.4</b>	<b>Kalibracija HBV modela z urnimi podatki</b>	<b>58</b>
<b>5</b>	<b>RAČUN PRETOKOV MAKSIMALNIH PADAVINSKIH SCENARIJEV</b>	<b>64</b>
<b>5.1</b>	<b>Padavine</b>	<b>64</b>
<b>5.2</b>	<b>Pomladanski in jesenski maksimalni padavinski scenarij</b>	<b>65</b>
<b>5.3</b>	<b>Maksimalni padavinski scenarij</b>	<b>65</b>
<b>5.4</b>	<b>Scenarija ujme na območju Z Slovenije</b>	<b>66</b>

---

<b>5.5</b>	<b>Padavinski scenariji s predhodnimi padavinami in vmesnimi sušnimi obdobji</b>	<b>67</b>
<b>5.6</b>	<b>Padavinski scenarij po Dingmanu</b>	<b>67</b>
<b>5.7</b>	<b>Padavinski scenarij VNP z redukcijo</b>	<b>68</b>
<b>5.8</b>	<b>Padavinska scenarija kombinacije VNP in snega</b>	<b>68</b>
<b>5.9</b>	<b>Rezultati padavinskih scenarijev in komentar</b>	<b>69</b>
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČKI IN SKLEPI</b>	<b>74</b>
	<b>VIRI</b>	<b>76</b>
	<b>PRILOGE</b>	<b>79</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Razdelitev porečja reke Save na podpovodja in število geografskih con	30
Preglednica 2: Delitev podpovodij na elevacijske cone in njihova pokritost z gozdom	32
Preglednica 3: Izbrana merilna mesta za evapotranspiracijo	35
Preglednica 4: Izbrana merilna mesta za padavine	37
Preglednica 5: Izbrana merilna mesta za temperature	39
Preglednica 6: Seznam vodomernih postaj in podpovodij	40
Preglednica 7: Primerjava vrednosti $R^2$ za obdobje kalibracije in verifikacije modela	46
Preglednica 8: Rezultati kalibracije modela z dnevnimi vrednostmi za izbrana podpovodja za obdobje 1990 – 1999	56
Preglednica 9: Rezultati verifikacije modela z dnevnimi vrednostmi za izbrana podpovodja za obdobje 2000 – 2006	56
Preglednica 10: Rezultati kalibracije modela z urnimi vrednostmi za izbrana podpovodja za obdobje 1998 – 1999	63
Preglednica 11: Začetna višina snežne odeje v padavinskih scenarijih s snegom	69



**KAZALO SLIK**

Slika 1: Kroženje vode v naravi	2
Slika 2: Hidrogram odtoka	3
Slika 3: Komponente hidrološkega modela	5
Slika 4: Uporaba modela HBV po svetu	7
Slika 5: Uvodno okno modela HBV-96	8
Slika 6: Shematični prikaz modela povodja	9
Slika 7: Struktura HBV-96 modela za posamezno podpovodje	10
Slika 8: Postopek za računanje snega	11
Slika 9: Postopek za računanje vlage v tleh	13
Slika 10: Računanje odtoka iz zgornjega rezervoarja	15
Slika 11: Transformacijska funkcija	16
Slika 12: Glavna porečja s površino (F) in gostoto rečne mreže (g)	19
Slika 13: Relief porečja Save	20
Slika 14: Karta hidrogeoloških enot	21
Slika 15: Pokritost z gozdom po CORINE klasifikaciji	22
Slika 16: Shematični prikaz rečnih režimov, ki se pojavljajo na porečju Save	23
Slika 17: Slika navadne padavinske postaje (a) in ombrografa (b)	25
Slika 18: Radarska pokritost Slovenije in porečja reke Save	25
Slika 19: Mreža navadnih padavinskih postaj (ARSO, 2007) z označenim porečjem Save	26
Slika 20: Mreža ombrografov (ARSO, 2007) z označenim porečjem Save	27
Slika 21: Povprečna letna višina padavin za obdobje 1967-1990	27
Slika 22: Porečje reke Save s področjem, ki ni vključeno v model (temno siva barva)	29
Slika 23: Delitev porečja Save na podpovodja	31
Slika 24: Primer vnešenih podatkov o elevacijskih conah v modelu HBV	33
Slika 25: Primer vnosa podatkov o evapotranspiraciji v modelu HBV	34
Slika 26: Izbrana merilna mesta za evapotranspiracijo z izrisanimi Thiessenovimi poligoni	35
Slika 27: Izbrana merilna mesta za padavine z izrisanimi Thiessenovimi poligoni	38
Slika 28: Izbrana merilna mesta za temperature z izrisanimi Thiessenovimi poligoni	40
Slika 29: Izbrane vodomerne postaje	41
Slika 30: Izgled PTQW – key datoteke	42

Slika 31: Izgled PTQW datoteke, potem ko preko ukaza Database/import standard-format uvozimo podatke v model	43
Slika 32: Primer vnosa podatkov o utežeh v modelu HBV	44
Slika 33: Primer treh ASCII datotek za uvoz podatkov v HBV model	44
Slika 34 (a) - (t): Primerjava izračunanih in opazovanih pretokov za obdobje 1998-1999 za posamezna podpovodja (vodomerno postaje) po procesu kalibracije	51
Slika 35: Izmerjeni in izračunani pretoki na iztoku iz podpovodja Gradaščica	52
Slika 36: Karta dela podpovodja Gradaščica z označeno vodomerno postajo Dvor (5500)	53
Slika 37: Izmerjeni in izračunani pretoki na iztoku iz podpovodja Temenica	53
Slika 38: Karta dela porečja Kamniška Bistrica z vodomerno postajo Kamnik I (4400)	54
Slika 39: Primerjava merjenih in izračunanih pretokov (kalibracija – verifikacija)	56
Slika 40: Položaj ombrografov z izrisanimi Thiessenovimi poligoni	57
Slika 41 (a) - (s): Primerjava izračunanih in opazovanih pretokov za obdobje mar.-jun. 1999 za posamezna podpovodja (vodomerno postaje) po procesu kalibracije	62
Slika 42: Primerjava merjenih in izračunanih pretokov modela z urnimi podatki	63
Slika 43: 24-urne VNP	64
Slika 44: Histogram padavin za preračun 24-urnih VNP na urne	65
Slika 45: Potovanje ujme	66
Slika 46: Krivulja redukcije padavin glede na velikost območja (WMO, 1986)	68
Slika 47: Pregled maksimalnih vrednosti pretokov glede na različne scenarije (PMP = VNP)	69
Slika 48: Hidrogrami rezultatov začetnih variant (sezonske, maksimalne, varianta ujme)	70
Slika 49: Hidrogrami rezultatov variant s predhodnimi padavinami (d v legendi pomeni dan)	71
Slika 50: Hidrogrami rezultatov končnih variant s predhodnimi reduciranimi padavinami v kombinaciji s snegom (d v legendi pomeni dan)	72
Slika 51: Taljenje snega v podpovodju Kamniška Bistrica po posameznih elevacijskih conah	73

## **KAZALO PRILOG**

PRILOGA A : PARAMETRI MODELA HBV-96	79
PRILOGA B: SEZNAM IZHODNIH SPREMENLJIVK MODELA HBV-96	81

## OZNAKE IN OKRAJŠAVE

AMP	avtomatska merilna postaja
ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
SMHI	Švedski meteorološki in hidrološki inštitut
IHMS	integriran hidrološki sistem
<i>ET</i>	evapotranspiracija
EU	Evropska unija
EEA	Evropska okoljska agencija
GIS	geografski informacijski sistem
<i>I</i>	infiltracija
<i>LZ</i>	spodnja cona podzemne vode
<i>P</i>	padavine
<i>p</i>	padavine
<i>P</i>	ombrografske padavine
<i>q</i>	odtok
<i>Q</i>	odtok
<i>Q<sub>izr</sub></i>	izračunani pretok
<i>Q<sub>mer</sub></i>	merjeni pretok
<i>R</i>	koeficient korelacije
<i>R<sup>2</sup></i>	Nash-Sucliffov kriterij
<i>SM</i>	vlaga v tleh
<i>SP</i>	snežna odeja
<i>T</i>	temperatura zraka
<i>t</i>	temperatura zraka
<i>UZ</i>	zgornja cona podzemne vode
<i>V</i>	volumen
<i>V<sub>E</sub></i>	napaka volumna
v.p.	vodomerna postaja
WMO	Svetovna meteorološka organizacija
VNP	verjetno največje padavine
PMP	pomeni isto kot VNP

---

PMF	verjetno največja poplava (probable maximum flood)
e. cona	elevacijska cona
CRS	navadna padavinska postaja (classical raingauge station)
RRS	ombrograf (recording raingauge station)
$SD$	standardna deviacija
$S_0$	padec dna struge
$S_f$	naklon energijske črte
$v$	hitrost
$h$	globina
$g$	težnostni pospešek
m.n.v.	metri nadmorske višine

## **1 UVOD**

### **1.1 Kroženje vode v naravi**

V preteklosti so bile hidrološke raziskave usmerjene predvsem v površinske pojave, saj so človeške dejavnosti (poljedelstvo, promet, izkoriščanje površinskih voda, ipd.) usmerjale hidrološki razvoj le v smeri naštetih potreb. Podzemne vode (očem skrite), so bile zaradi tega še do devetnajstega stoletja velika neznanka. Procesi kroženja vode v naravi so zapleteni, spreminjajoči se, medsebojno prepleteni in se jih zaradi tega ne sme obravnavati ločeno. Danes se tako pri hidroloških raziskavah vsi procesi kroženja vode oziroma deli hidrološkega kroga (slika 1) obravnavajo kot celota.

Voda pokriva 70 odstotkov zemljine površine in se v naravi nahaja v vseh treh agregatnih stanjih. Kroženje vode predstavlja povezavo med temi agregatnimi stanji, pri čemer se voda zadržuje v različnih oblikah:

- zadrževanje vode v atmosferi
- zadrževanje vode v ledu in snegu
- zadrževanje vode v oceanih
- zadrževanje vode pod zemljo

Zvezo med posameznimi oblikami predstavljajo procesi:

- evaporacija (iz vodotokov, iz tal, iz oceanov, med dežjem, transpiracija)
- padavine
- površinski odtok
- infiltracija

Interval zadrževanja vode v posameznih oblikah lahko ponazorimo z zadrževanjem vodne kapljice. Vodna kapljica v povprečju preživi 8 do 10 dni v ozračju, 2 do 4 tedne v tekočih vodah, 1 do 16000 let v ledeniku in par dni do 1000 let pod zemljo (Brilly, 2000). Trenutne količine vode v posameznih stopnjah hidrološkega kroga je zaradi pomanjkljivosti opreme in časovne ter prostorske odvisnosti težje določiti.

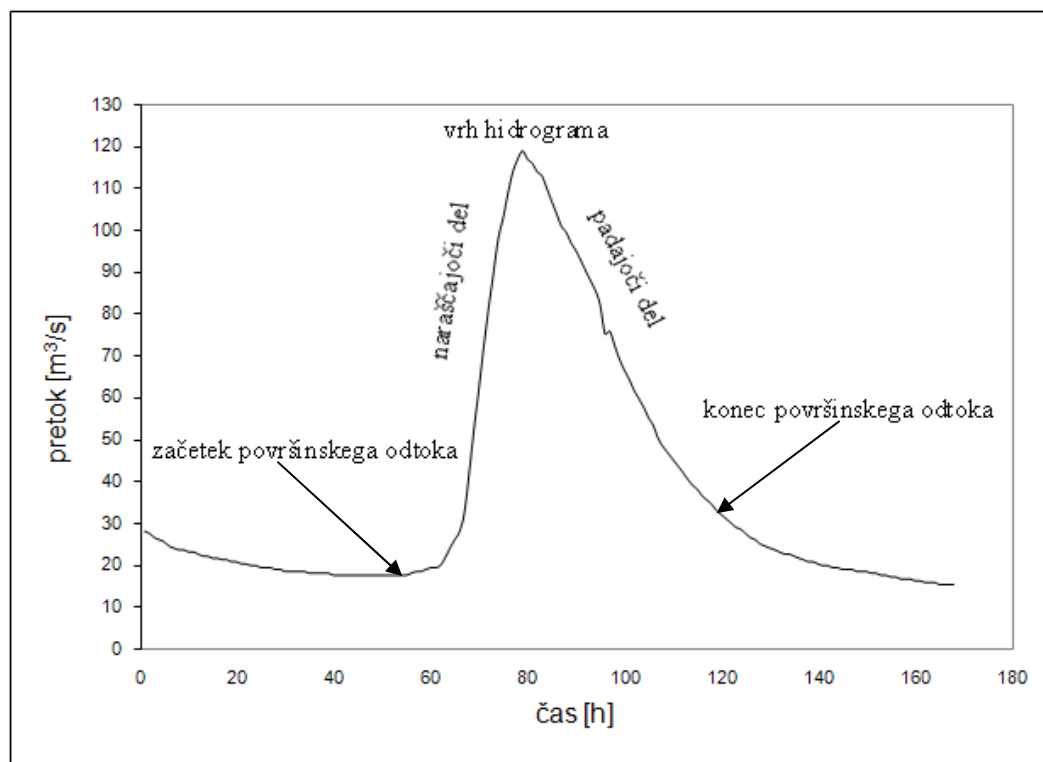


Slika 1: Kroženje vode v naravi. (Ilustracija: Evans, M., USGS, Colorado District; prevod: Brilly, M.)

## 1.2 Površinski odtok

Površinski odtok je pojav, ki se dogaja na površini zemlje in je del hidrološkega kroga (slika 1). Predstavlja del padavin (količino vode), ki se ne zadrži na rastlinah, ne ponikne v zemljo in ne izhlapi ampak površinsko odteče. Kot začetek površinskega odtoka štejemo čas, ko se tla nasičijo z vodo. Tedaj ponikovanje vode v tla ni več mogoče. Zaradi vpliva gravitacije voda odteče proti nižje ležečim delom, običajno proti vodotokom. Poleg padavin na površinski odtok vplivajo še številni drugi dejavniki med katere spadajo: predhodna namočenost, geografsko fizikalne lastnosti povodja, raba tal, poseljenost, ipd.

Kmalu po pojavu večjih padavin začne površinski odtok naraščati, precej hitro doseže maksimum in nato začne postopoma upadati. Pred pojavom padavin je v hidrografski mreži tok vode posledica izcejanja podzemnih voda v povirju (bazni odtok), ki pa postopoma upada v odvisnosti od trajanja suše. Diagram časovnih sprememb pretoka v vodotoku imenujemo hidrogram (slika 2). Kdaj in kako hitro hidrogram doseže maksimum, je odvisno od intenzitete in trajanja padavin, oblike padavin, nagiba in drugih lastnosti prispevne površine.



Slika 2: Hidrogram odtoka.

Odvisnost površinskega odtoka in padavin predstavlja odtočni koeficient, ki je razmerje med količino padle in odtekle vode oz. med efektivnimi in bruto padavinami.

Padavine z manjšo intenzivnostjo in daljšim trajanjem v celoti prestreže vegetacija. Enako se dogaja tudi pri intenzivnih in kratkotrajnih padavinah, take padavine zato nimajo velikega vpliva na površinski odtok. Na zelo prepustnih površinah, kjer padavine skoraj v celoti poniknejo, površinskega odtoka skoraj ni. Poveča se le bazni odtok. Ravno nasprotno se dogaja pri slabše prepustnih površinah (kraška območja), kjer zaradi geoloških razmer vsa padavinska voda ponikne in zaradi tega skoraj ni površinskega odtoka. Prav tako je odtok manjši po dolgotrajni suši in na sušnih območjih, saj se padavine zadržijo v tleh in kasneje izhlapijo.

### 1.3 Hidrološki modeli

Hidrološki modeli so modeli, ki ob upoštevanju komponent hidrološkega kroga in karakteristik povodja omogočajo oceno odtoka s povodja. Opisujejo torej količinski odnos



med padavinami in odtokom. Na voljo je veliko število modelov za simulacijo površinskega odtoka, od preprostih empiričnih metod, ki temeljijo le na odnosu med padavinami in odtokom, do kompleksnih modelov, ki ponazarjajo fizikalne procese kroženja vode v naravi (Singh, 1995; Edijatno et al., 1999; Seibert, 1999; Brilly, 1999; Kobold, 2007).

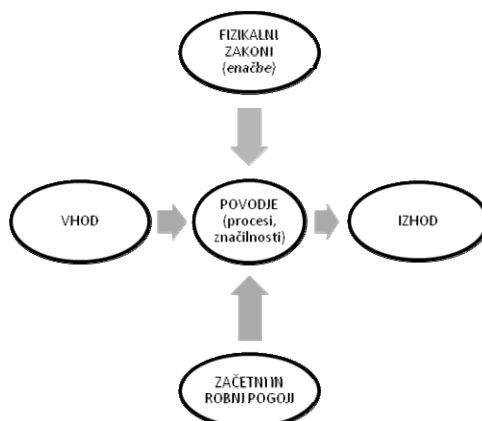
Kljub pestrosti modelov poteka razvoj novih modelov, v zadnjih letih zlasti modelov z distribuiranimi parametri (De Roo et al., 2000). Težnja je, glede na odziv povodja, razviti čimbolj realistični hidrološki model.

Modeli so zasnovani glede na cilj modeliranja, razpoložljivost podatkov, znanja in merila obravnavanega pojava. Razvoj hidroloških modelov je prav tako pogojen s potrebami in zahtevami vodnega gospodarstva.

Večina modelov povodja ima podobno strukturo. Modeli imajo v splošnem, kot je prikazano na sliki 3, pet komponent (Singh, 1995):

- povodje (procesi in značilnosti)
- fizikalni zakoni (opisujejo procese kroženja vode)
- začetni in robni pogoji
- vhodni podatki
- izhod

V hidroloških modelih zajemajo dogajanja na povodju vse tiste hidrološke procese, ki prispevajo k izhodni komponenti sistema - odtoku. V strokovni literaturi najdemo vrsto klasifikacij hidroloških modelov glede na metodo, ki je uporabljena za opis hidroloških procesov, število spremenljivk in parametrov, prostorskega in časovnega merila ter specifičnih pogojev uporabe (Singh, 1995; Edijatno et al., 1999; Rodda in Rodda, 1999; Kokkonen in Jakeman, 2001).



Slika 3: Komponente hidrološkega modela.

Za opis hidroloških procesov se najpogosteje uporabljajo enačbe, ki temeljijo na osnovnih fizikalnih zakonih ali ustreznih empiričnih metodah. Površinski tok vode v vodotoku v splošnem opišemo s kontinuitetno in dinamično enačbo, pri čemer predpostavimo, da je tok v odprtem vodotoku enodimenzijski (Rajar, 1980). Kontinuitetna enačba za enodimenzijski tok, ki obravnava razliko med dotokom in iztokom iz obravnavanega odseka dolžine  $dx$  v časovni enoti brez stranskih dotokov, se glasi:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

kjer je  $A$  prečni prerez in  $Q$  pretok v prerezu. Dinamična enačba ima obliko:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot A \cdot (S_0 - S_f), \quad (2)$$

kjer je  $h$  globina,  $g$  težnostni pospešek,  $S_0$  padec dna struge,  $S_f$  pa naklon energijske črte, ki pomeni izgubo energije zaradi sile trenja, in je enak:

$$S_f = \frac{v^2}{C^2 \cdot R}, \quad (3)$$

kjer je  $v$  hitrost,  $C$  Chezy-ev koeficient in  $R$  hidravlični radij.

Parcialni diferencialni enačbi 1 in 2 predstavljata sistem diferencialnih enačb prvega reda. Ker je naklon energijske črte funkcija odvisnih spremenljivk  $v$  in  $h$ , sistem ni analitično rešljiv (Rajar, 1980). Enačbe so rešljive z numeričnimi metodami in jih z nadaljnimi aproksimacijami poenostavimo. V modelih z distribuiranimi ali prostorsko razporejenimi parametri, ki običajno temeljijo na fizikalnih zakonih, je vsak korak v transformaciji vode v povodju opisan s parcialnimi diferencialnimi enačbami. Zmogljivost računalnikov, GIS tehnologija in metode daljinskega zaznavanja danes omogočajo razvoj teh modelov. V modelih z združenimi parametri (konceptualni modeli) je povodje vzeto kot osnovna enota, za katero se obravnavajo vse vhodne in izhodne komponente. V večini teh modelov so nekateri procesi opisani z diferencialnimi enačbami, ki temeljijo na preprostih hidravličnih zakonih, drugi procesi pa so izraženi z empiričnimi algebrainimi enačbami.

Modeli padavine - odtok zahtevajo tudi interakcijo površinskih in podpovršinskih procesov. Za opis podpovršinskega toka se običajno uporablja Darcy-ev zakon za enodimenzijski tok, ki predpostavlja linearno zvezo med hitrostjo toka in hidravličnim gradientom:

$$q = -K \cdot \frac{\partial H}{\partial x}, \quad (4)$$

kjer je  $q$  hitrost toka,  $K$  hidravlična prevodnost,  $H$  hidravlična višina in  $x$  razdalja v smeri toka.

Komponenta podpovršinskega toka v hidroloških modelih nadzoruje vlažnost zemljine. Poleg tega model povodja zahteva za simulacijo procesa odtoka tudi komponente za prestrežanje padavin, evapotranspiracijo in taljenja snega.

## 2 MODEL HBV-96

### 2.1 Splošni opis modela

HBV model je konceptualni model za kontinuirano računanje odtoka in je namenjen hidrološkemu napovedovanju. Razvit je bil v sedemdesetih letih na Švedskem meteorološkem in hidrološkem inštitutu (SMHI), ime pa je dobil po oddelku za vodno bilanco oddelka za hidrologijo (**H**ydrologiska **B**yrans **V**attenbalansavdelning). Ideja je bila izdelati model z optimalno zapletenostjo v povezavi z operativnimi zahtevami in razpoložljivimi podatki. Svojo prvo uporabo je model doživel leta 1975 na Švedskem (modeliran S del Švedske). Tedaj je bil model prvič testiran za operativno napovedovanje pretokov. Že istega je bil nato uporabljen tudi na Norveškem. Danes je imliciran v več kot 40 državah po vsem svetu (slika 4), uporablja pa se za računanje pretokov rek, napovedovanje poplav, za potrebe hidroelektrarn, namakanja, varnosti jezov in končno tudi za spremljanje podnebnih sprememb. Razširjenost modela HBV po svetu dokazuje praktično uporabnost modela v različnih pogojih oziroma podnebnih razmerah.



Slika 4: Uporaba modela HBV po svetu.

Zaradi številnih institucij, ki so bile udeležene pri razvoju, danes obstajajo mnoge različice tega modela. Zadnja verzija modela HBV je model HBV-96 (slika 5), ki je integriran v hidrološki sistem IHMS (**I**ntegrated **H**ydrological **M**odelling **S**ystem) (Lindström et al., 1997).

Model HBV-96 temelji na enačbi:

$$P - E - Q = \frac{d}{dt} [SP + SM + UZ + LZ + lakes], \quad (5)$$

kjer so  $P$  padavine,  $ET$  evapotranspiracija,  $Q$  odtok,  $SP$  snežna odeja,  $SM$  vlaga v tleh,  $UZ$  zaloga vode v zgornjem rezervoarju,  $LZ$  zaloga vode v spodnjem rezervoarju in  $lakes$  prostornina jezera.

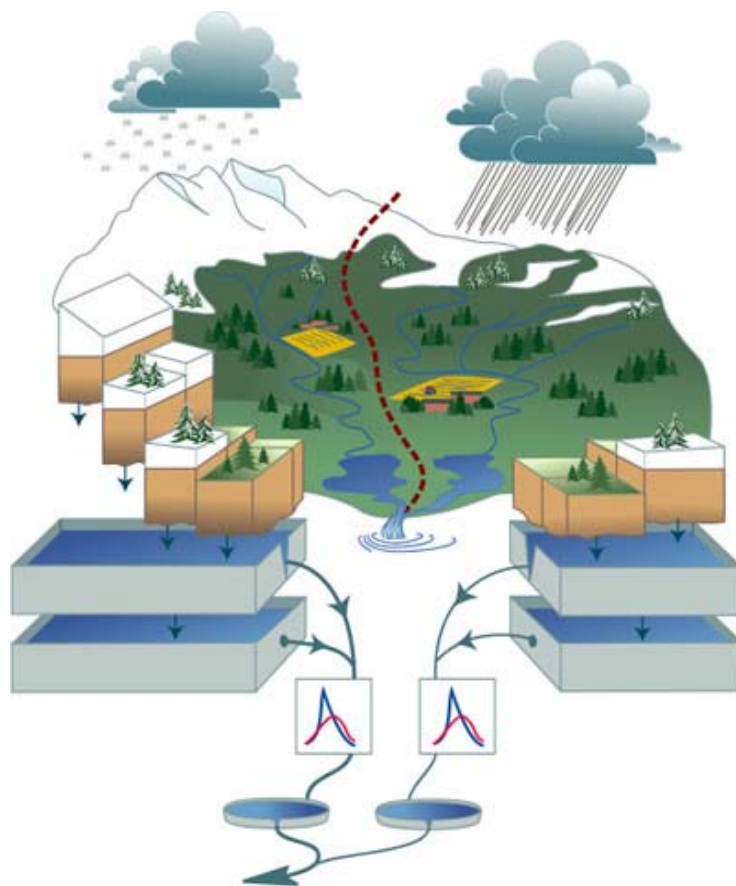
Vhodni podatki so običajno dnevne vrednosti padavin in temperatur ter mesečne ocene evapotranspiracije.



Slika 5: Uvodno okno modela HBV-96.

## 2.2 Struktura modela

Model HBV-96 opišemo kot distribuiran konceptualni model (Bergström, 2002), ker omogoča delitev povodja na posamezne manjše enote – podpovodja. Vsako podpovodje lahko nadalje delimo še po nadmorski višini na elevacijske cone, te pa še naprej na gozdna in negozdna območja. Delitev na vegetacijske cone se upošteva pri postopkih za računanje snega in vlage v tleh. Na sliki 6 je prikazana delitev podpovodja na elevacijske in vegetacijske cone.

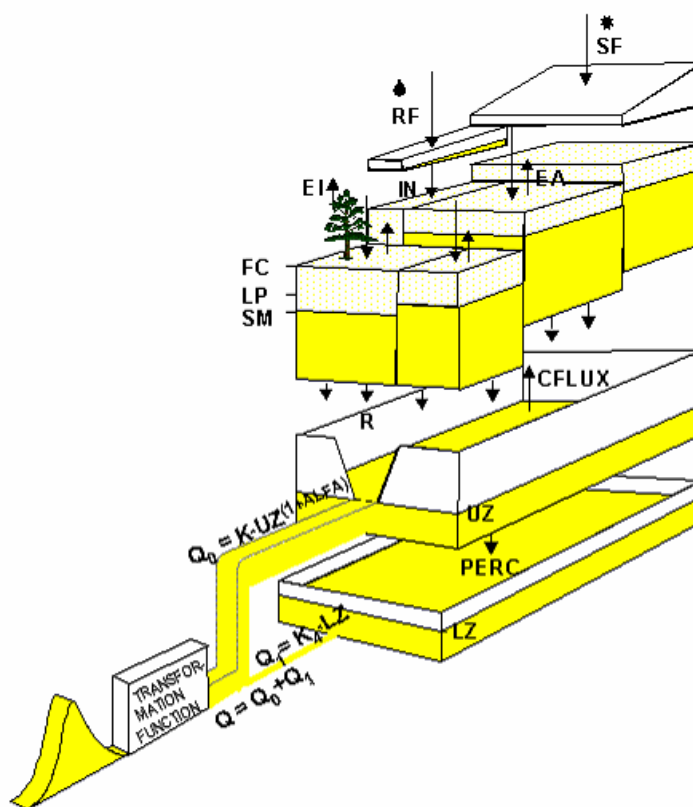


Slika 6: Shematični prikaz modela povodja.

Sistem IHMS ne omogoča postavitve modela iz podatkov GIS, kot nekateri drugi hidrološki modeli. Tako je geografske podatke povodja in podpovodij potrebno pripraviti iz ustreznih kart ali geografskih informacijskih sistemov. K podatkom, ki jih je potrebno pripraviti spadajo nadmorske višine in površine elevacijskih con, površine podpovodij in pokritost z gozdom. Model je dobro zasnovati tako, da so podpovodja čim bolj homogena. Poleg geografskih podatkov, je potrebno pripraviti tudi podatke za umerjanje modela. Med te spadajo podatki o padavinah, temperaturi zraka, potencialni evapotranspiraciji in pretokih. Našteti vhodni podatki morajo imeti isti časovni korak, razen evapotranspiracije, ki se običajno podaja v obliki srednjih mesečnih vrednosti. V modelu HBV je običajen časovni korak en dan, a avtorji (Bergström, 1995; IHMS, 1999) navajajo da je mogoč tudi krajši korak, ki pa ne sme biti krajši od ene ure.

Za računanje ploskovnih padavin in sprememb temperature zraka z nadmorsko višino, sta v modelu uporabljeni metoda uteži in metoda višinskih gradientov.

Na sliki 7 je prikazana struktura modela za posamezno podpovodje z osnovnimi računskimi postopki (Bergström, 1995; IHMS, 1999).



<i>P</i>	padavine	<i>LP</i>	meja potencialne evapotranspiracije
<i>T</i>	temperature	<i>BETA</i>	parameter tal
<i>SF</i>	sneg	<i>R</i>	napajanje
<i>RF</i>	dež	<i>CFLUX</i>	kapilarni transport
<i>Z</i>	nadmorske višina	<i>UZ</i>	zaloga vode v zgornjem rezervoarju
<i>PCALTL</i>	prag za korekcijo po nadmorski višini	<i>LZ</i>	zaloga vode v spodnjem rezervoarju
<i>TTI</i>	prag temperaturnega intervala	<i>PERC</i>	pronicanje
<i>IN</i>	infiltracija	<i>K, KA</i>	recesijska parametra
<i>EP</i>	potencialna evapotranspiracija	<i>ALFA</i>	recesijski parameter
<i>EA</i>	dejanska evapotranspiracija	<i>Q0, Q1</i>	komponenti odtoka
<i>EI</i>	evapotranspiracija prestreženih padavin	<i>HQ</i>	parameter visokega odtoka
<i>SM</i>	vлага v tleh	<i>KHQ</i>	upadanje pri <i>HQ</i>
<i>FC</i>	največja zaloga vlage v tleh	<i>HQUZ</i>	nivo <i>UZ</i> pri <i>HQ</i>

Slika 7: Struktura HBV-96 modela za posamezno podpovodje (vir: IHMS, 1999).

Model HBV-96 je sestavljen iz postopka za računanje akumulacije snega in taljenja, postopka za računanje vlage v tleh in transformacijske funkcije preko katere se izračuna hidrogram. Model omogoča tako kalibracijo, kot tudi izdelavo napovedi za vsako podpovodje posebej. Za skupno povodje se prispevki s posameznih podpovodij seštevajo.

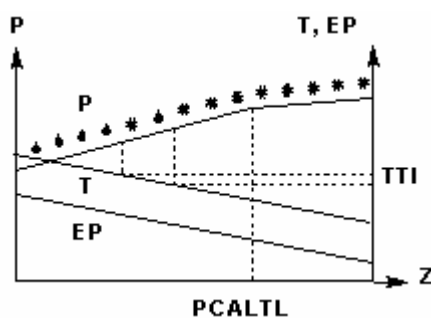
### 2.3 Računski postopek za sneg

V grobem je ideja postopka za računanje snega taka, da se pod določeno temperaturo zraka padavine akumulirajo v obliki snega. Ko temperatura zraka zraste nad to mejo, se sneg tali. Model pri računanju upošteva le padavine in temperaturo zraka, pri čemer se upošteva spreminjanje temperature z nadmorsko višino. Temperatura zraka je glede na nadmorsko višino korigirana s faktorjem  $TCALT$ . Temperaturni prag ( $TT$ ) je običajno okrog  $0^{\circ}\text{C}$  in določi kdaj pride do taljenja snega. Pri računanju snega se upošteva enostavno razmerje stopinja/dan. Taljenje snega po metodi stopinja/dan se opiše z enačbo:

$$\text{Taljenje snega} = CFMAX \cdot (T - TT), \quad (6)$$

kjer je  $T$  temperatura elevacijske cone,  $CFMAX$  faktor taljenja snega in  $TT$  temperaturna meja, ko pride do taljenja snega. Računanje snega poteka posebej za vsako elevacijsko in vegetacijsko cono.

Če se namesto parametra  $TT$  uporabi parameter  $TTI$  se temperaturni prag raztegne v interval. Znotraj tega intervala se predpostavi, da so padavine mešanica snega in dežja. Količina snega se zmanjšuje linearno (slika 8), 100% na začetku intervala do 0% na koncu intervala.



Slika 8: Postopek za računanje snega.



Za snežno odejo je predpostavljeno, da zadržuje tekočo vodo, dokler količina vode ne preseže določene frakcije snega, ki je podana s parametrom *WHC* (vsebnost vode v snegu). Ko temperature zraka pade pod temperaturo praga *TT*, voda postopoma zmrzuje po enačbi:

$$\text{Zmrzovanje tekoče vode} = CFR \cdot CFMAX \cdot (TT - T), \quad (7)$$

kjer je *CFR* factor zmrzovanja.

Podobno kot taljenje snega model računa tudi taljenje ledenika, le da je faktor taljenja drugačen:

$$\text{Taljenje ledu} = GMELT \cdot (T - TT), \quad (8)$$

kjer je *GMELT* faktor taljenja ledu.

V primeru, da je v elevacijski coni sneg, se taljenje ledu ne bo začelo. V posamezni coni lahko razporeditev snežnih padavin določimo s pomočjo parametra *SCLASS*, ki posamezno cono razdeli na število območij z različno akumulacijo snežnih padavin.

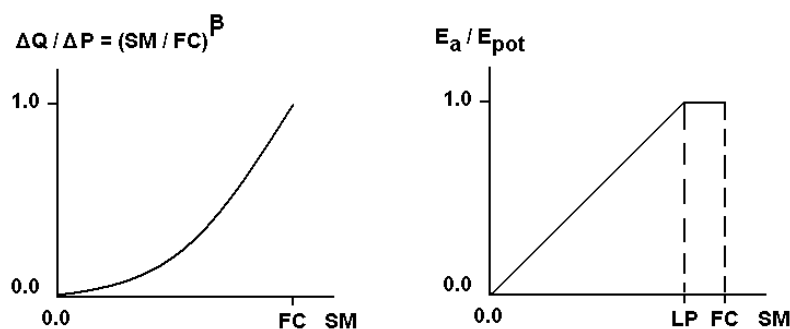
## 2.4 Računski postopek za tla in oceno evapotranspiracije

Postopek temelji na treh parametrih: *BETA*, *LP* in *FC* (slika 9).

*BETA* nadzoruje prirastek k odzivni funkciji ( $\Delta Q/\Delta P$ ) ali povečanje zaloge vlage v tleh ( $I - \Delta Q/\Delta P$ ) za vsak milimeter dežnih padavin ali staljenega snega. Razmerje ( $\Delta Q/\Delta P$ ) se pogosto omenja kot koeficient odtoka,  $\Delta Q$  pa kot efektivne padavine.

*LP* je vrednost vlage v tleh nad katero evapotranspiracija doseže svojo potencialno vrednost.

*FC* pa predstavlja največjo vrednost zaloge vlage v tleh.



Slika 9: Postopek za računanje vlage v tleh.

$$\Delta Q / \Delta P = (SM / FC)^\beta, \quad (9)$$

$SM$  je izračunana zaloga vlage v tleh,  $\beta$  pa empirični koeficient tal.

Razmerje  $E_a/E_{pot}$  je razmerje med dejansko in potencialno evapotranspiracijo.  $LP$  je podan kot del celotne vrednosti  $FC$ . Podane potencialne vrednosti evapotranspiracije se v modelu lahko korigira preko parametrov  $ECORR$ ,  $ECALT$  (podobno kot parameter  $PCALT$ , ki predstavlja višinski korekcijski faktor za padavine, predstavlja  $ECALT$  višinski korekcijski faktor za evapotranspiracijo). Ker je časovni korak HBV modela običajno krajši od časovnega koraka podanih vrednosti evapotranspiracije, se povprečne obdobje vrednosti evapotranspiracije preračunajo na časovni korak modela po enačbi:

$$Evapotranspiracija = E_{pot} \cdot (1 + ETF \cdot (T - T_{norm})), \quad (10)$$

kjer je  $E_{pot}$  standardna vrednost potencialne evapotranspiracije,  $T$  predstavlja dejansko temperaturo zraka,  $T_{norm}$  pa običajno temperaturo za tekoči dan v letu.

Alternativna metoda izračuna potencialne evapotranspiracije, poteka preko parametra  $ATHORN$ , pri čemer se vrednosti evapotranspiracije izračunajo iz temperatur. Izračun poteka po enostavni Thornthwaiteovi enačbi, če je parameter  $ATHORN > 0$ :

$$Evapotranspiracija = ATHORN \cdot T, \quad (11)$$

kjer velja, da je  $Evapotranspiracija = 0$  če je  $T < 0$ .

Testirane so bile še številne druge metode za oceno dnevne evapotranspiracije v modelu, ki pa niso dale bistveno boljših rezultatov (Lindström et al., 1997).

Vrednosti evapotranspiracije je za dneve s padavinami možno tudi reducirati s parametrom  $EPF$ , kjer se vrednosti evapotranspiracije množijo s faktorjem  $e^{-EPF \cdot P}$  in  $P$  predstavlja padavine.

Prispevek k odtoku iz dežja in taljenja snega je majhen, ko so tla suha (vrednosti vlage v zemljini so nizke) in velik, ko so tla namočena. Dejanska evapotranspiracija je odvisna od vlažnosti tal in se zmanjša, ko se tla osušijo.

## 2.5 Generiranje odtoka in transformacijska funkcija

Odtok generira odzivna funkcija, ki transformira presežek vode iz tal v odtok. Pri tem se upošteva vpliv direktnih padavin in evapotranspiracije dela, ki predstavlja jezera, reke in druge mokre površine. Odzivna funkcija je sestavljena iz zgornjega nelinearnega in spodnjega linearnega rezervoarja. Ta dva rezervoarja predstavljata hitro in počasno komponento hidrograma odtoka - direktni in bazni odtok. Potovanje med podpovodji je opisano z Muskingovo metodo ali preprosto s časom zakasnitve. Vsako posamezno podpovodje ima svojo odzivno funkcijo.

Efektivne padavine se dodajo k zalogi vode v zgornjem rezervoarju. Dokler je voda v zgornjem rezervoarju, ta pronica v spodnji rezervoar glede na parameter  $PERC$ . Pri visoki vsebnosti vlage v tleh pronicanje ni dovolj učinkovito, da bi zgornji rezervoar ostajal prazen, zato se iz njega generira odtok, ki predstavlja površinski odtok vode. Zgornji rezervoar tako predstavlja površinski odtok, obratno pa spodnji rezervoar predstavlja zalogo podzemne vode v povodju in prispeva k baznemu odtoku. Pri osnovni verziji HBV modela je imel zgornji rezervoar dva odtoka, ki sta bila predstavljena z dvema recesijskima koeficientoma  $K0$  in  $K1$ , v najnovejši verziji modela HBV (HVB-96) pa recesijske koeficiente nadomesti funkcija. Komponenta odtoka iz zgornjega rezervoarja se računa po enačbi:

$$Q_0 = k \cdot UZ^{(1+ALFA)}, \quad (12)$$

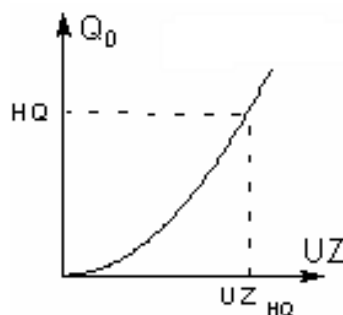
kjer je  $ALFA$  mera za nelinearnost in je običajno reda ena,  $UZ$  pa predstavlja zalogo vode v zgornjem rezervoarju. Funkcija  $ALFA$  se aktivira, če je parameter  $KHQ > 0$ . Program s pomočjo parametrov  $KHQ$ ,  $HQ$  in  $ALFA$  izračuna vrednost  $k$  (slika 10), tako da velja:

$$HQ = KHQ \cdot UZ_{HQ} \cdot HQ, \quad (13)$$

$HQ$  odgovarja vrednosti pretoka pri recesijskem razmerju  $KHQ$ . Razmerje  $KHQ$  določa velikost konice hidrograma in njegovo upadanje. Ocenimo ga iz opazovanih hidrogramov. Vrednost  $HQ$  izračunamo po enačbi:

$$HQ = (MQ \cdot MHQ)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{86.4}{AREA}, \quad (14)$$

kjer je  $MQ$  srednji obdobjni pretok,  $MHQ$  srednji obdobjni maksimalni pretok,  $AREA$  površina povodja v  $km^2$ .  $HQ$  ustreza iztoku iz odzivnega rezervoarja.



Slika 10: Računanje odtoka iz zgornjega rezervoarja.

Komponenta odtoka iz spodnjega rezervoarja se računa po enačbi:

$$Q_1 = k_4 \cdot LZ, \quad (15)$$

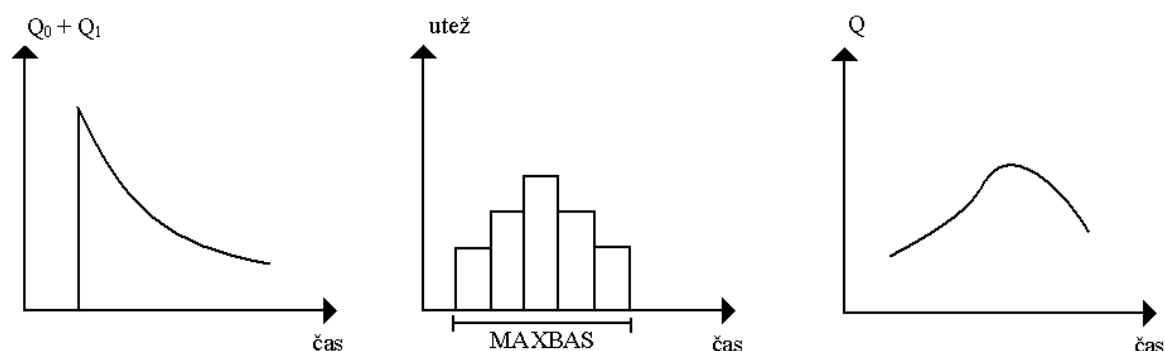
kjer je  $k_4$  recesijski koeficient baznega odtoka,  $LZ$  pa zaloga vode v spodnjem rezervoarju. V modelu se upošteva tudi kapilarni tok. Parameter  $CFLUX$  ustvarja kapilarni tok iz zgornjega rezervoarja k vlagi kot funkcija primanjkljaja vlage v tleh in se računa po enačbi:

$$\text{kapilarni tok} = CFLUX \cdot \frac{SMDEF}{FC}, \quad (16)$$

kjer je  $SMDEF = FC - SM$  in predstavlja primanjkljaj vlage v tleh.

Postopki računanja vlage v tleh in odzivne funkcije so specifični za vsako posamezno podpovodje. Odtok se tako generira neodvisno za vsako podpovodje posebej. Preko transformacijske funkcije, ki je preprosta filter tehnika s trikotno porazdelitvijo uteži (slika 11) se nato izračuna hidrogram bolj pravilne oblike.

V modelu HBV-96 parameter  $MAXBAS$  tudi ni več omejen na cela števila.



Slika 11: Transformacijska funkcija.

## 2.6 Vhodni podatki in umerjanje modela

Vhodni podatki so običajno dnevne vrednosti padavin in temperature, vrednosti pa se lahko podajajo tudi za krajši časovni interval. Potencialna evapotranspiracija se običajno vnaša v obliki srednjih mesečnih vrednosti, lahko pa jo model tudi izračuna preko temperature (enačba 11). Podatki o pretokih so potrebni zaradi kontrole izračunanih pretokov, merijo pa se ob iztoku iz podpovodja. Če je model postavljen na dnevni vrednostih, morajo biti tudi opazovani pretoki dnevne vrednosti.

Model se lahko umerja ročno ali avtomatsko. Pri dnevni vhodnih podatkih se priporoča vsaj obdobje 5 do 10 let za umerjanje. Ročno umerjanje poteka po principu spreminjanja optimizacijskih parametrov (PRILOGA A), temu sledi kontrola rezultatov. H kontroli rezultatov spada:

- vizualna kontrola opazovanih in izračunanih hidrogramov

- kontrola vsote razlike volumnov:

$$Accdiff = \sum (QC - QR) * C_t, \quad (17)$$

- kontrola statističnega parametra  $R^2$  (Nash in Sutcliffe, 1970):

$$R^2 = \frac{\sum (QR - QR_{mean})^2 - \sum (QC - QR)^2}{\sum (QR - QR_{mean})^2}, \quad (18)$$

$QC$  je izračunani pretok,  $QR$  merjeni pretok,  $C_t$  pa konstanta za preračun v mm.

Statistični parameter  $R^2$  imenujemo tudi Nash-Sutcliffov kriterij po znanstvenikih, ki sta ga vpeljala in izraža varianco okrog povprečja (Bergström, 1995). Vrednost  $R^2$  je lahko največ 1.0, v tem primeru hidrograma opazovanih in izračunanih pretokov soupadata. V praksi se ta vrednost giblje med 0.8 in 0.95 za dobro umerjeno podpovodje (IHMS, 1999). Možne so tudi negativne vrednosti, ki so pogosto posledica slabih vhodnih podatkov ali pa slabše oblikovanega modela podpovodja.

V okviru SMHI je bil razvit postopek za avtomatsko kalibracijo (Harlin, 1991). Program sicer ni del modela HBV-96, tako da testiranje tega postopka v okviru te diplomske naloge ni bilo mogoče. Ideja avtomatske kalibracije pa je, da se model umerja glede na koeficient  $RV$ . Koeficient  $RV$  je odvisen od koeficienta  $R^2$  (Nash in Sutcliffe, 1970) in relativne volumnske napake  $RD$ , podan pa je z enačbo:

$$RV = R^2 - w|RD|, \quad (19)$$

kjer je  $w$  običajno blizu 0.1. Tako avtomatsko umerjanje poleg dobrih vrednosti  $R^2$  omogoči tudi minimalne napake v volumnih ( $V_E$ ) (Harlin, 1991), za razliko od ročnega umerjanja, kjer sicer dobimo prav tako dobre vrednosti za  $R^2$ , ostane pa napaka v volumnih.

Ročno umerjanje modela je dolgotrajen postopek, a ima to prednost, da se umerjevalec ob spreminjanju posameznih parametrov veliko nauči o obnašanju modela. Za ročno umerjanje je običajno potrebno kar nekaj 100 zagonov modela.

## 2.7 Rezultati modela

Osnovni izhodni produkt modela je odtok, vendar sistem omogoča tudi prikaz drugih spremenljivk. Seznam izhodnih spremenljivk modela HBV-96 je podan prilogi (PRILOGA B). Rezultate modela HBV-96 lahko v sistemu IHMS prikažemo v tabelarični ali grafični obliki. Možno jih je izvoziti v druga programska orodja.

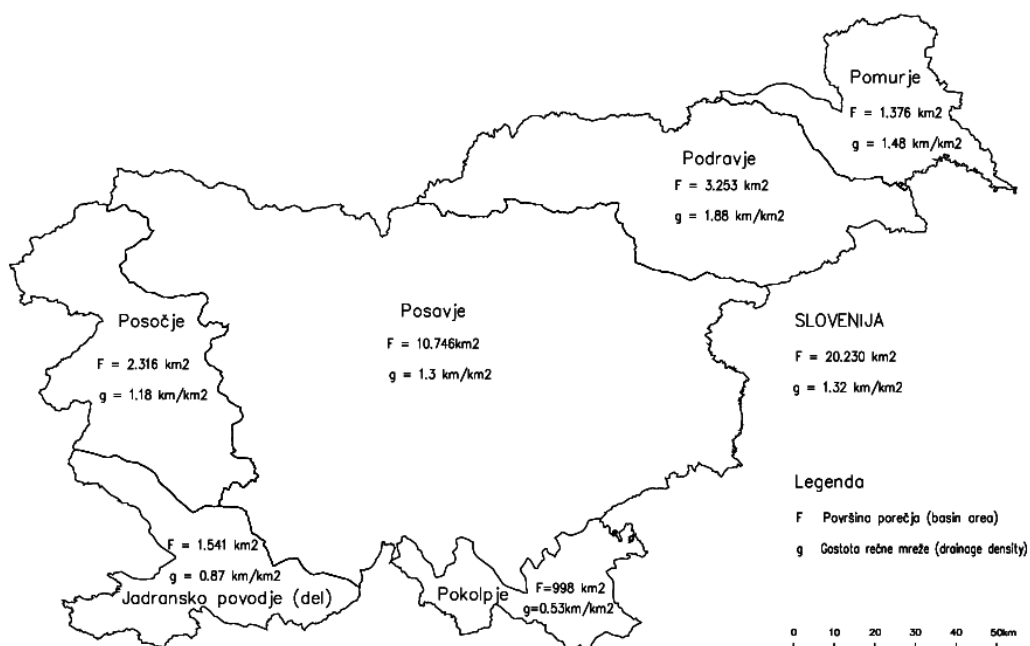
Model HBV omogoča kratkoročne in dolgoročne hidrološke napovedi. Kratkoročna napoved omogoča napoved za obdobje do 30 dni. Za zagon modela so potrebni merjeni podatki o padavinah in temperaturi zraka do časa začetka napovedi ter podatki meteorološke napovedi (padavin in temperature zraka) za čas, za katerega izdelujemo hidrološko napoved. Rezultat modela je izračunan hidrogram. Poleg pretoka se lahko napoveduje tudi evapotranspiracija, zaloga vode v tleh, akumuliran sneg, ploskovne padavine, itd.

Dolgoročna napoved je možna za več mesecev. V tem primeru ne vnašamo meteoroloških napovedi, temveč program za obdobje, za katero želimo napoved, vzame podatke opazovanj prejšnjih let. Dolgoročno napoved program izdelava na osnovi statističnega izračuna in verjetnostne porazdelitve pretokov prejšnjih let.

### 3 POREČJE SAVE

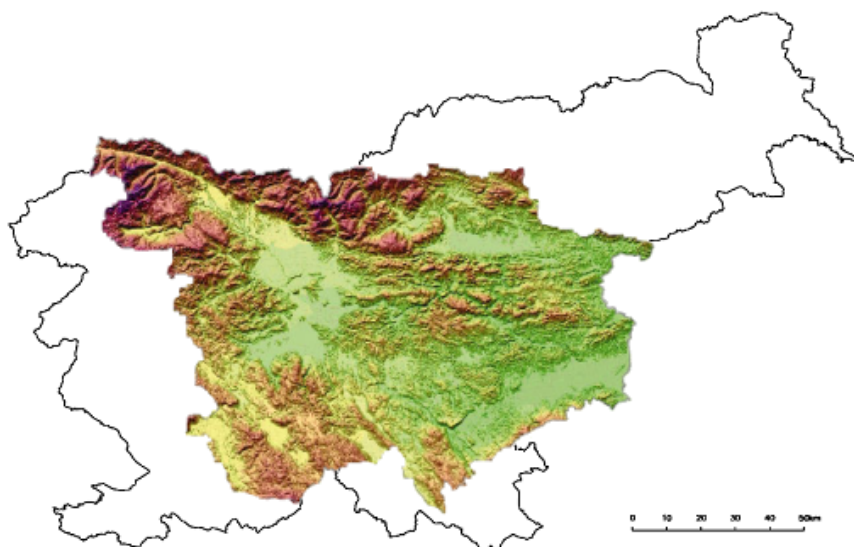
#### 3.1 Geološke in geografske značilnosti

Reka Sava oziroma njeno porečje predstavlja 53.1 odstotkov ozemlja Slovenije in je tudi naše največje porečje. Kot večina porečij v Sloveniji ima tudi to svoje povirje v alpskem svetu in preko hribovitega sveta prehaja v ravnino (slika 13).



Slika 12: Glavna porečja s površino (F) in gostoto rečne mreže (g).





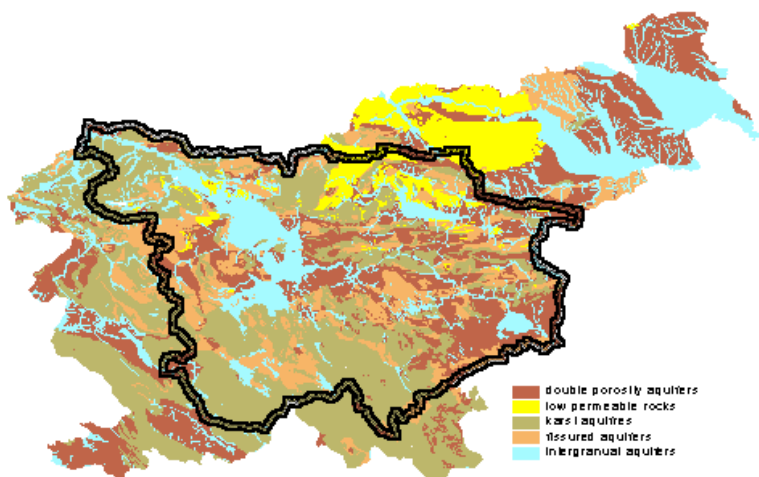
Slika 13: Relief porečja Save.

Glede na geološko zgradbo Posavje sestavljajo naslednje hidrogeološke enote (Kolbezen, Pristov, 1998, 11-12)

- alpsko območje  
obsega Julijske in Savinjske Alpe ter Karavanke, ki so v glavnem grajene iz prepustnih karbonatnih kamnin. Na visokih planotah je to območje močno zakraselo, zaradi česar večji del padavinske vode ponikne v notranjost.
- predalpsko hribovje  
zajema Škofjeloško-polhograjsko, Idrijsko-cerkljansko in Posavsko hribovje, kjer je geološka zgradba močno neenotna in dokaj zapletena. Sestavljajo ga predvsem neprepustne kamnine, kot so razni skrilavci in laporji. Mednje so stisnjene ali narinjene manj prepustne karbonatne kamnine (apnenec, dolomit).
- porečje Savinje  
zajema v svojem zgornjem toku območje visokogorskega sveta vzhodnih Karavank in Savinjskih Alp grajenih iz karbonatnih kamnin, več ali manj zakraselega apnenca in dolomita. Številni večji ali manjši izviri, ki se pojavljajo, kažejo na večje ponikanje padavinske vode v podzemlje. Pod Lučami se pri zgradbi površja vse bolj pojavljajo manj prepustni skrilavci, tufi ter peščenjaki in gline, ki gradijo v glavnem tudi severno in južno gričevnato obrobje Celjske kotline. Iz podobnih kamnin je grajeno ozemlje med Celjem in Zidanim mostom. Le delno se med njimi pojavljajo prepustni apnenci

in dolomiti. Neprepustne terciarne, mezozojske in paleozojske kamnine sestavljajo pretežni del ozemlja porečja Voglajne, ki zbira vode z najbolj vzhodnega dela porečja Savinje. Neprepustni terciarni sedimenti, ki obdajajo Celjsko kotlino, sestavljajo tudi njeno dno, prekrito s prodno plastjo. Debelina prodnega zasipa je različna in raste od Savinje proti severu.

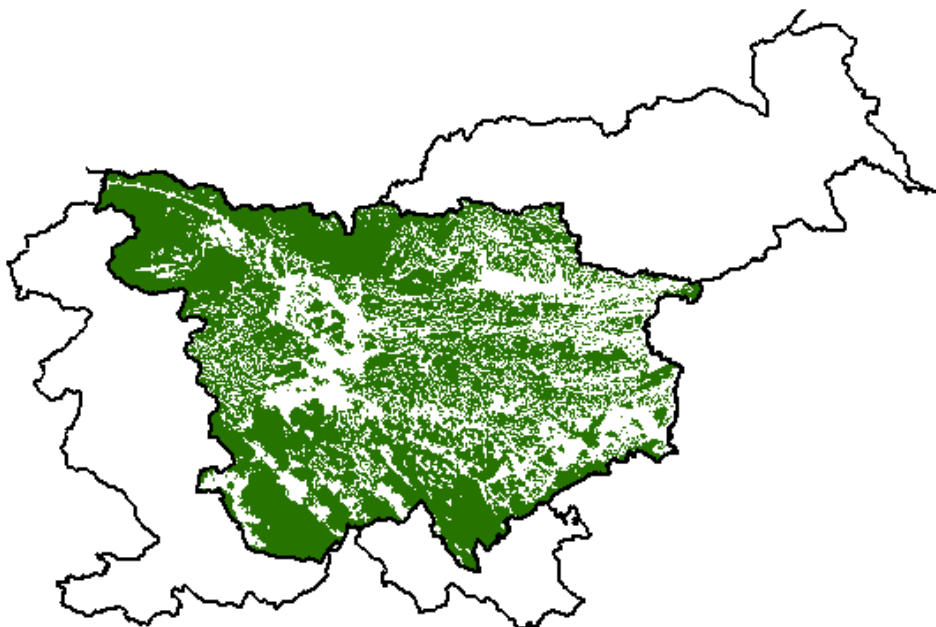
- porečji Ljubljani in Krke  
zajemata ozemlje visokega krasa in pokrivata nekaj manj kot 40 odstotkov ozemlja Posavja. Grajeno je pretežno iz močno razpokanih, zakraselih in prepustnih karbonatnih kamnin apnenca in dolomita. Vode, ki se tu zbirajo, hitro poniknejo, se prelivajo in pritekajo na dan v številnih izvirih na obrobju dolin. Na porečju Ljubljani je iz manj prepustnih kamnin grajeno le ozemlje, ki pripada delu Polhograjskih Dolomitov in Krško hribovje, ki pretežno pripada porečju Krke.
- ravninska dela Ljubljanske in Krške kotline  
sta prekrite z debelo plastjo kvartarnega proda in konglomerata, med njima se nahajajo večji ali manjši vložki gline. Samo dno kotline sestavljajo neprepustne terciarne plasti.



Slika 14: Karta hidrogeoloških enot.

Gozdovi so s skoraj 60 odstotki (vključuje tudi grmičaste gozdove) prevladujoča kategorija pokrovnosti v porečju Save. Največja sklenjena območja gozda pokrivajo dinarsko-kraške planote južne in jugozahodne Slovenije ter pobočja Alp na severu in zahodu. Aluvialne

ravnine in rečne doline so gosteje naseljene in v glavnem namenjene kmetijstvu. Na sliki 15 je prikazana pokritost porečja Save z gozdom.



Slika 15: Pokritost z gozdom po CORINE klasifikaciji.

### 3.2 Pretoki in rečni režimi

Veliko rek na povodju Save ima hudourniški značaj. To pomeni, da pretoki zelo hitro narastejo in tudi hitro upadejo, večji del vode pa odteče ob visokovodnih ali celo poplavnih valovih. Na večini rek nastopajo visoke vode najpogosteje spomladi in jeseni. Ponavadi nastanejo ob odjugi, taljenju snežne odeje in izdatnih padavinah. Intenzivne lokalne padavine povzročijo lokalne poplave hudourniškega značaja, ki prizadenejo le manjša porečja. Vodotoki s hudourniškim značajem so še posebej ranljivi v času malih pretokov in hidrološke suše. Le-ti niso tako očitno vezani na določen letni čas, najbolj običajni so v poznem poletju in zgodnji jeseni. Kolebanje vodnega stanja med letom imenujemo rečni režim in je v poglavitni meri odraz časovne razporeditve padavin, izhlapevanja, zadrževanja podzemnih voda in podobnega. Višek vodnega stanja ali pretoka se zato ne ravna povsod in popolnoma po višku padavin. V Sloveniji se srečamo s štirimi osnovnimi tipi rečnih režimov (Mikoš, 2007):

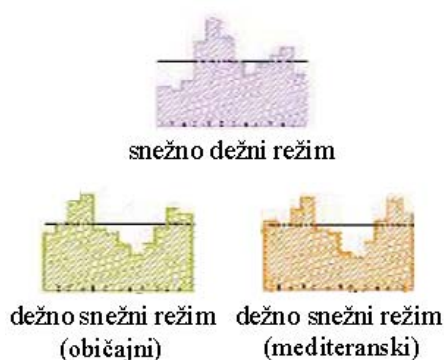
- snežni režim (nivalni režim)

- snežno dežni režim (nivo-pluvialni režim)
- dežno snežni režim (pluvio-nivalni režim)
- dežni režim (pluvialni režim)

Za porečje Save pa sta značilna snežno dežni režim in dežno snežni režim.

Značilna razporeditev pretokov za snežno dežni režim je, da ima dva viška in dva nižka (slika 16). Primarni višek nastopi v pozni pomladi (april, maj). Novembrski sekundarni višek ga kljub poudarjenosti ne doseže. Glavni nižek je praviloma pozimi (januar, februar) in je nižji od poletne nizke vode (avgust). Ta režim je značilen za Savo do sotočja z Ljubljano in na Savinji do Nazarij.

Za dežno snežni režim sta tudi značilna dva viška in dva nižka (slika 16). Primarni višek nastopi običajno v zgodnji pomladi (marec, april) ali celo v maju. Sekundarni višek je vedno jeseni (november). Primarni nižek nastopi poleti, običajno avgusta, redkeje septembra. Sekundarni nižek je pozimi (januar, februar), ne traja dolgo in je večji od poletnega. Znotraj dežno snežnega režima obstaja še kontinentalni (sekundarni višek je manj izrazit) in mediteranski (jesenski višek se običajno združi z marčno-aprilskim) podrežim. Slednji je značilen za desne pritoke Save med Selško Soro in Ljubljano. Za preostali del Save, od Sotočja z Ljubljano do Čateža in reko Krko, pa je značilen običajen dežno snežni režim.



Slika 16: Shematični prikaz rečnih režimov, ki se pojavljajo na porečju Save.

### 3.3 Padavine

Na porečju Save se bolj ali manj pojavljajo vsi trije tipi padavin (Brilly, 2000):

- konvektivne padavine

nastanejo zaradi lokalnega dviganja segretyh zračnih mas. Pojavljajo se v poletnem obdobju, lokalno in so močne.

- orografske padavine  
nastanejo zaradi dviganja zračnih mas ob pobočju planin. Tako dviganje zračnih mas povzroča lokalne padavine in povečanje padavin pri ostalih oblikah padavin.
- ciklonske padavine  
jih povzroča ciklon – območje nizkega zračnega pritiska.

Na obravnavanem porečju, na padavine močno vplivajo parametri kot so:

- relief - količina padavin z nadmorsko višino običajno narašča, vendar le do višine 2500 m. Nad to višino se količina padavin zmerno povečuje ali celo zmanjšuje.
- biosfera - del padavin se zadrži na biosferi. Večji del teh padavin izhlapi in niti ne prispe do tal. Količina prestreženih padavin je odvisna od lastnosti padavin (intenziteta, trajanje), vrste in gostote rastlin (drevje, grmovje) ter od obdobja v letu (vegetacijsko ali zunajvegetacijsko obdobje). Na območju, ki je gosto poraščeno z gozdom, lahko drevesa prestrežejo tudi do 25 odstotkov letnih padavin.
- večja mesta - imajo pogosto nekoliko višje padavine od okolice. V mestih so padavine tudi pogostejše.

Mera za količino padavin je debelina vodne plasti na vodoranih tleh, če ta voda ne izhlapi, odteče ali ponikne v zemljo.

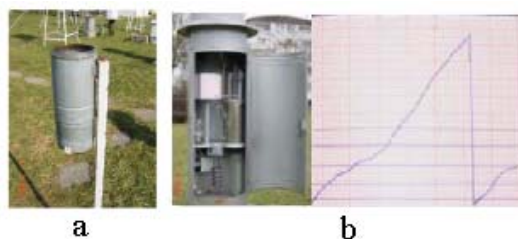
Padavine se meri s pomočjo:

- ombrometra
- totalizatorja
- ombrografa
- meteorološkega radarja

Ombrometer se imenuje tudi navadna padavinska postaja (slika 17 (a)) in se uporablja za merjenje količine padavin v krajših časovnih obdobjih. Običajno se meritev izvaja vsakodnevno ob 7.00 uri. Na ta način se izmeri padavine, ki so padle prejšnji dan.

Totalizator je podoben ombrometru, le da ima večjo posodo in lahko zajame večmesečno količino padavin. Postavlja se ga v bolj odročnih krajih, še posebej pa je potrebno paziti, da je onemogočeno izhlapevanje že zajetih padavin.

Ombrograf (slika 17 (b)), je opremljen z mehanizmom za avtomatsko registriranje padavin in omogoča neprekinjene meritve količine padavin. Običajno je opremljen tudi z grelcem, ki sproti tali snežne padavine.



Slika 17: Slika navadne padavinske postaje (a) in ombrografa (b).

Meteorološki radar je namenjen merjenju padavin, preko odboja radarskih valov. Prednost uporabe radarja za merjenje padavin je pokritost velikega področja z veliko časovno in prostorsko ločljivostjo, iz ene same točke in v realnem času. Slabost pa, kot se je pokazalo na povodju Savinje (Kobold, 2007), da je količina padavin podcenjena. Radar na Lisci (slika 18) izmeri vsakih 10 minut trenutno odbojnost v vsaki točki atmosfere nad Slovenijo do nadmorske višine 15 km. Odbojnost je odvisna od števila padavinskih delcev na prostorninsko enoto in od njihove velikosti. Iz tridimenzionalnih polj odbojnosti se za operativno uporabo tvorijo dvodimenzionalne radarske slike v prostorski ločljivosti 1 km x 1 km. Kljub temu, da bila v letu 2000 na Lisci izvedena posodobitev radarja (konvencionalen radar je bil zamenjan z Dopplerjevim radarjem), so dobljeni podatki dokaj neuporabni za hidrološke aplikacije in jih je potrebno korigirati s talnimi padavinami (Kobold, 2007).



Slika 18: Radarska pokritost Slovenije in porečja reke Save.

Prva intenzivna opazovanja padavin v Sloveniji so se začela leta 1851 v Ljubljani. V letu 2007 ima Agencija Republike Slovenije za okolje, na področju celotne Slovenije, na voljo mrežo 176 navadnih padavinskih postaj (slika 19) in 37 ombrografov (slika 20). Od tega se na porečju reke Save nahaja 103 navadnih padavinskih postaj in 19 ombrografov.



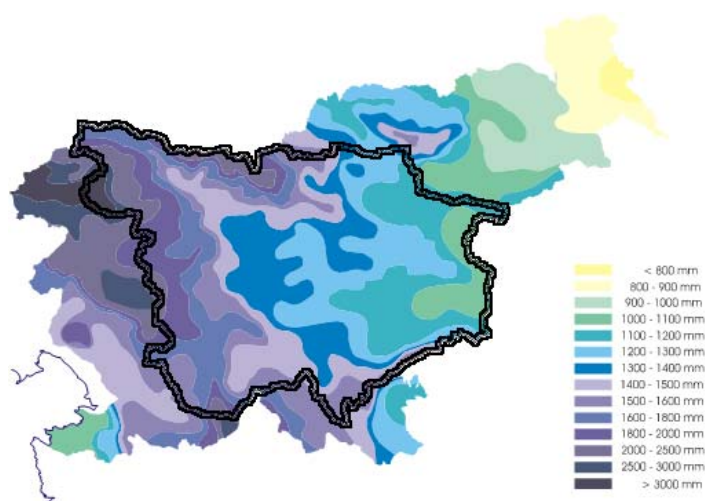
Slika 19: Mreža navadnih padavinskih postaj (ARSO, 2007) z označenim porečjem Save.



Slika 20: Mreža ombrografov (ARSO, 2007) z označenim porečjem Save.

Čeprav je mreža padavinskih postaj dokaj gosta, lahko aparature zgrešijo padavine, zlasti, če so te lokalno omejene. Redkejša mreža postaj tudi ne omogoča pravilne ocene ploskovnih padavin, zlasti pri višji časovni ločljivosti, omogoča le določanje povprečnih letnih padavin.

Slika 21 predstavlja povprečno letno višino padavin za obdobje 1961 – 1990.



Slika 21: Povprečna letna višina padavin za obdobje 1961-1990.



## 4 IMPLEMENTACIJA MODELA HBV NA POREČJU SAVE

### 4.1 Zgradba HBV modela z dnevnimi podatki

Pri postavitvi modela se upošteva naslednji vrstni red priprave podatkov oz. modeliranja:

- a) izbira podpovodij
- b) izbira in vnos podatkov o geografskih conah
- c) vnos podatkov o evapotranspiraciji
- d) izbira merilnih mest za padavine in temperature
- e) izbira vodomernih postaj
- f) določitev PTQW-key datoteke
- g) izračun uteži in vnos le teh v model
- h) uvoz vhodnih podatkov v model
- i) določitev začetnega stanja in izbira izhodnih spremenljivk

- a) izbira podpovodij

Začetek postavitve modela predstavlja izbiro podpovodij. Glede na nalogo, ki je modelirati reko Savo z vsemi pretoki, od njihovih izvirov do državne meje, je bilo Posavje (slika 12) potrebno deliti na posamezna podpovodja. Kot izhodišče za takšno delitev je služila karta Katedre za splošno hidrotehniko.

Reke Mestinjščica, Bistrica in Sotla oziroma njihova podpovodja (na sliki 22 so ta področja označena s temno sivo barvo) v model niso vključena. Razlog zato je, da reka Sotla, ki jo tvorita reki Mestinjščica in Bistrica tudi v najbolj vodnatem obdobju nima velikih pretokov in zaradi tega le minimalno poveča pretoke Save.

V procesu modeliranja je nato podpovodje Save Dolinke razdeljeno na dve ločeni podpovodji (Sava Dolinka I in Sava Dolinka II – razvodnica poteka preko Jesenic) na spodnjem koncu porečja Save pa je dodano še malo podpovodje (0,25 km<sup>2</sup>), ter s tem rešena težava s kontrolo pretokov na iztoku iz modela. V preglednici 1 je prikazan seznam modeliranih podpovodij s

številom geografskih con. Zaporedna številka predstavlja tudi vrstni red računanja podpovodij v modelu.

Izbira imen podpovodij je potekala po principu imen pritokov. Če je v nekem podpovodju več pritokov Save se ta poimenuje po največjem. Kadar gre za podpovodja, ki predstavljajo dele vodotokov (Save Dolinke, Ljubljanice, Save, Savinje in Krke) so ta podpovodja označena z rimskimi številkami, ki se povečujejo v smeri toka.



Slika 22: Porečje reke Save s področjem, ki ni vključeno v model (temno siva barva).

Preglednica 1: Razdelitev porečja reke Save na podpovodja in število geografskih con.

Zap. št.	Ime podpovodja	Število geografskih con	Površina [km <sup>2</sup> ]
1	Sava Dolinka I	5	266.7
2	Sava Dolinka II	5	232.19
3	Sava Bohinjka	5	387.28
4	Kokra	5	640.4
5	Sora	4	647.82
6	Sava I	1	118.04
7	Cerkniško jezero	1	270.42
8	Kras I	1	83.13
9	Kras II	1	744.25
10	Ljubljanica I	1	467.72
11	Gradaščica	1	158.82
12	Ljubljanica II	1	159.45
13	Kamniška Bistrica	5	538.66
14	Sava II	1	523.49
15	Savinja izvir	5	536.17
16	Paka	3	211.23
17	Savinja I	3	445.22
18	Vogljajna	1	413.46
19	Savinja izliv	1	246.72
20	Sava III	1	756.87
21	Krka izvir	1	342.81
22	Krka I	1	1019.85
23	Krka II	1	177.93
24	Krka III	1	418.88
25	Krka izliv	1	291
26	Sava izliv	1	0.26



Slika 23: Modelirana podpovodje porečja reke Save.

b) izbira in vnos podatkov o geografskih conah

Geografske ali tudi elevacijske cone predstavljajo višinsko razdelitev posameznega podpovodja. V S delu porečja, kjer je razgibanost reliefa večja, so podpovodja predvidoma razdeljena na 5 elevacijskih con in sicer po višinah 0 – 500 m, 500 – 1000 m, 1000 – 1500 m, 1500 – 2000 m, 2000 – 2864 m. Dejansko število teh con je odvisno od razpona nadmorskih višin na podpovodju (preglednica 1). V J delu porečja, kjer relief ni razgiban, delitve ni. V J delu torej obstaja le ena elevacijska cona za vsako podpovodje. Za vsako elevacijsko cono je potrebno določiti površino, ter odstotek pokritosti z gozdom. Višinske delitve in površine posameznih elevacijskih con so izračunane s pomočjo računalniškega programa ArcGis. Odstotek pokritosti posamezne cone pa je ocenjen s pomočjo karte pokritosti z gozdom po CORINE klasifikaciji, podatka o višini gozdne meje in Atlasa Slovenije.

Preglednica 2: Delitev podpovodij na elevacijske cone in njihova pokritost z gozdom.

Ime podpovodja	Delitev po m.n.v.	Površina [km <sup>2</sup> ]	Povprečna m.n.v.	Gozd	Ostalo
Sava Dolinka I	500	2.80	433	0	2.80
	1000	89.17	791	4.46	84.71
	1500	119.16	1232	107.25	11.92
	2000	41.40	1689	41.40	0
	2864	14.24	2177	0	14.24
Sava Dolinka II	500	9.64	426	0	9.64
	1000	93.49	765	4.67	88.81
	1500	86.91	1227	82.56	4.35
	2000	35.35	1711	35.35	0
	2864	6.81	2186	0	6.81
Sava Bohinjka	500	17.17	468	0	17.17
	1000	122.02	721	73.21	48.81
	1500	151.91	1248	151.91	0
	2000	77.72	1707	77.72	0
	2864	18.47	2172	0	18.47
Kokra	500	212.78	425	10.64	202.14
	1000	211.64	716	169.31	42.33
	1500	170.41	1219	170.41	0
	2000	40.82	1702	36.74	4.08
	2864	4.51	2183	0	4.51
Sora	500	146.11	410	29.22	116.89
	1000	434.45	706	391.01	43.45
	1500	65.03	1197	65.03	0
	2000	2.22	1600	0	2.22
Sava I	NI	118.04	362	59.02	59.02
Cerkniško jezero	NI	270.42	717	135.21	135.21
Kras I	NI	83.13	628	58.19	24.94
Kras II	NI	744.25	735	595.40	148.85
Ljubljana I	NI	467.72	479	210.47	257.24
Gradaščica	NI	158.82	518	79.41	79.41
Ljubljana II	NI	159.45	364	55.81	103.64
Kamniška Bistrica	500	289.08	375	101.18	187.90
	1000	180.71	683	162.64	18.07
	1500	44.90	1232	42.66	2.25
	2000	19.04	1721	9.52	9.52

se nadaljuje ...

nadaljevanje ...

Ime podpovodja	Delitev po m.n.v.	Površina [km <sup>2</sup> ]	Povprečna m.n.v.	Gozd	Ostalo
Sava II	NI	523.49	485	392.62	130.87
Savinja izvir	500	96.33	413	4.82	91.51
	1000	231.76	750	220.17	11.59
	1500	164.25	1226	147.83	16.43
	2000	42.18	1696	25.31	16.87
	2864	1.52	2157	0	1.52
Paka	500	77.03	414	19.26	57.77
	1000	125.55	688	100.44	25.11
	1500	8.65	1139	7.79	0.87
Savinja I	500	311.17	339	124.47	186.70
	1000	124.32	681	99.46	24.86
	1500	9.73	1307	9.73	0
Voglajna	NI	413.46	444	144.71	268.75
Savinja izliv	NI	246.72	483	123.36	123.36
Sava III	NI	756.87	392	340.59	416.28
Krka izvir	NI	342.81	484	171.41	171.41
Krka I	NI	1019.85	537	764.89	254.96
Krka II	NI	177.93	355	88.96	88.96
Krka III	NI	418.88	329	146.61	272.27
Krka izliv	NI	291.00	273	116.40	174.60
Sava iztok	NI	0.26	140	0	0.26

Zone			
Subbasin: Sava Dolinka I			
	Elevation	Zone type	Area (km2)
1	433	field	2.8000
2	791	forest	4.4600
3	791	field	84.7100
4	1232	forest	107.2500
5	1232	field	11.9200
6	1689	forest	41.4000
7	2177	field	14.2400
Total subbasin area :			266.78

Slika 24: Primer vnešenih podatkov o elevacijskih conah v modelu HBV.

## c) vnos podatkov o evapotranspiraciji

Podatki o evapotranspiraciji se lahko vnesejo direktno v model, ali pa se ob zagonu modela izračunajo sami (glej: poglavje 2.4). Podatke je mogoče vnesti v model preko ukaza Data/Evaporation, ali pa uvoziti preko pripravljenih datotek v ASCII formatu. V primeru modela HBV za porečje reke Save je bil izbran vnos podatkov preko ukaza Data/Evaporation, odločitev o takem načinu vnosa podatkov se je kasneje pokazala za boljšo, saj je bilo tako umerjanje evapotranspiracije enostavnejše.

First day	Value	(Group 1)
1	0101	0.84
2	0201	1.13
3	0301	1.50
4	0401	1.90
5	0501	2.90
6	0601	8.10
7	0701	8.41
8	0801	8.56
9	0901	2.26
10	1001	1.60
11	1101	1.10
12	1201	0.72
13	1231	0.72

First day	Value	(Group 2)
1	0101	0.58
2	0201	0.86
3	0301	1.09
4	0401	1.25
5	0501	1.89
6	0601	3.44

Slika 25: Primer vnosa podatkov o evapotranspiraciji v modelu HBV.

HBV model omogoča vnos podatkov o evapotranspiraciji za največ 50 merilnih mest, od katerih ima vsako merilno mesto lahko največ 30 vrednosti.

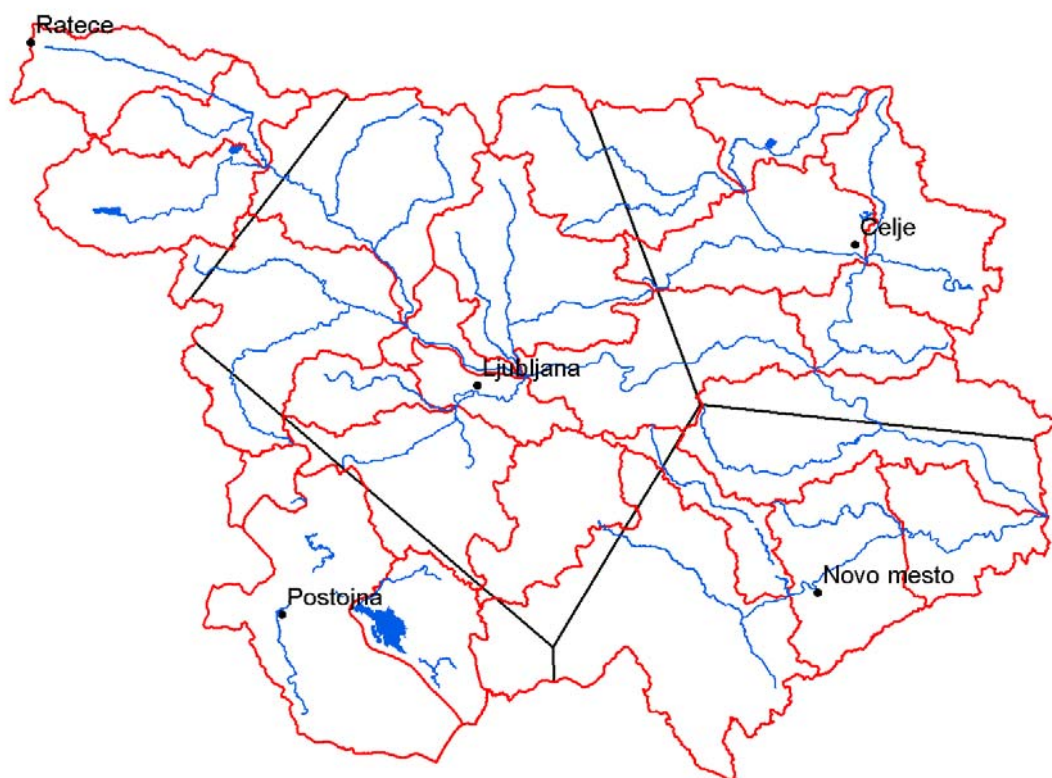
V model HBV za porečje reke Save so vnešene vrednosti o evapotranspiraciji za pet merilnih mest (preglednica 3). Vrednosti evapotranspiracije iz slike 25 so v enoti mm/dan. Iz slike 25 je tudi razvidno, da so povprečne dnevne vrednosti posameznih mesecev, pripisane prvemu dnevu v mesecu, pri čemer se vrednosti do prvega dneva v naslednjem mesecu izračunajo z linearno interpolacijo (Interpolation method: interp). Pri takem načinu vnosa podatkov je potrebno korekcijski faktor *athorn* popraviti na vrednost 0 (prednastavitev v modelu: *athorn* >

0). V nasprotnem primeru se evapotranspiracija ne glede na vnešene podatke izračuna po Thornthwaites-ovi metodi.

Preglednica 3: Izbrana merilna mesta za evapotranspiracijo.

Šifra postaje	Ime postaje	X [m]	Y [m]
51	Rateče	401540	151150
136	Postojna	437588	69412
192	Ljubljana	465468	102101
249	Novo mesto	514175	72525
268	Celje	519469	122286

Za preračunavanje točkovnih vrednosti v ploskovne je bila uporabljena metoda Thiessenovih poligonov (slika 26). Deleže pokritosti posameznih podpovodij z določenim merilnim mestom se potrebuje izračunu uteži (glej: f).



Slika 26: Izbrana merilna mesta za evapotranspiracijo z izrisanimi Thiessenovimi poligoni.



d) Izbira merilnih mest za padavine in temperature

Glede izbire postaj za merjenje padavin so določeni trije kritični parametri, po katerih so izbrana posamezna merilna mesta (preglednica 4).

Prvi kritični parameter se nanaša na količino podatkov. Glede na to, da je model postavljen za obdobje 1990 – 2006, je bilo potrebno upoštevati merilna mesta, ki so bila v tem obdobju aktivna. Vsa merilna mesta na porečju Save za to obdobje niso imela celotnega niza podatkov (vzroki za to so bili različni). Skušalo se je izbrati merilna mesta, ki so imela v omenjenem obdobju čim manj manjkajočih podatkov. V primeru manjkajočih nizov podatkov je bilo v modelu potrebno le te nadomestiti s podatki z drugega merilnega mesta (običajno sosednjega in vrednosti korigirati z ustreznim korekcijskim faktorjem) ali pa jih določiti na podlagi korelacije glede na sosednje merilno mesto. V obeh načinih nadomeščanja podatkov bi v model vnesli še dodatno napako, čemur smo se poskušali izogniti.

Drugi kritični parameter se nanaša na kakovost podatkov. V model se je poskušalo zajeti čim več merilnih mest, ki so za obdobje modeliranja dajala bolj zanesljive podatke o padavinah. V modelu so tako za modelirano področje zajeti vsi, v tem obdobju delujoči, ombrografi. Ombrografi so običajno avtomatski in nam dajejo podatke o padavinah v časovnem razmaku 10 ali 5 minut, zato so ti podatki bolj zanesljivi kot podatki iz navadnih padavinskih postaj, kjer se višine padavin običajno meri dnevno.

Tretji kritični parameter se nanaša na število merilnih mest. Število merilnih mest na vsakem podpovodju je izbrano glede na površino podpovodja (večje podpovodje – več merilnih mest, oz. vsaj dve merilni mesti na posameznem podpovodju) in glede na enakomernost razporeditve.

Preglednica 4: Izbrana merilna mesta za padavine.

Zap. št.	Šifra postaje	Ime merilne postaje	X [m]	Y [m]	Nadmorska višina [m]	
1	2	Kamniška Bistrica	468479	131752	601	<b>RRS</b>
2	8	Brnik	459693	119393	364	<b>CRS</b>
3	13	Bukovščica	443435	114170	460	<b>CRS</b>
4	14	Zgornje Bitnje	449511	129379	378	<b>CRS</b>
5	16	Poljane	437384	108775	385	<b>CRS</b>
6	21	Davča	428554	117455	960	<b>RRS</b>
7	25	Dražgoše	436978	123568	930	<b>CRS</b>
8	27	Zgornje Jezersko	461465	138646	872	<b>RRS</b>
9	30	Jelendol	449981	139686	760	<b>CRS</b>
10	35	Javorniški Rovt	431344	146259	940	<b>RRS</b>
11	40	Zgornja Radovna	419163	143229	750	<b>CRS</b>
12	44	Bohinjska Bistrica	419577	126118	510	<b>CRS</b>
13	48	Kredarica	411850	137860	2514	<b>CRS</b>
14	51	Rateče	401540	151150	864	<b>RRS</b>
15	136	Postojna	437588	69412	533	<b>RRS</b>
16	146	Hotedrščica	433616	87822	550	<b>CRS</b>
17	151	Rob	446782	78310	510	<b>CRS</b>
18	152	Sveti Vid	458455	78683	851	<b>CRS</b>
19	160	Cerknica	450900	72565	576	<b>CRS</b>
20	162	Smarata	458962	60622	580	<b>RRS</b>
21	170	Podtabor	482181	70359	420	<b>CRS</b>
22	181	Šentjošt (Horjul)	440508	98896	590	<b>CRS</b>
23	186	Črni vrh	442610	105174	830	<b>RRS</b>
24	192	Ljubljana	465468	102101	299	<b>RRS</b>
25	195	Črna vas	458712	94518	288	<b>CRS</b>
26	199	Želimplje	467578	86532	309	<b>CRS</b>
27	204	Prežganje	479443	97748	635	<b>CRS</b>
28	205	Sevno	494405	92962	545	<b>RRS</b>
29	208	Kal nad Šentjanžem	509033	96918	525	<b>CRS</b>
30	215	Moravče	480965	110369	381	<b>CRS</b>
31	217	Zgornji Tuhinj	482304	120737	578	<b>CRS</b>
32	219	Čemšenik	495540	115620	760	<b>CRS</b>
33	221	Laško	518460	112573	228	<b>CRS</b>
34	224	Ložice	534120	100905	560	<b>CRS</b>
35	235	Kostanjevica	535712	80191	150	<b>CRS</b>
36	248	Vinji vrh	521628	80650	210	<b>CRS</b>
37	249	Novo mesto	514175	72525	220	<b>RRS</b>
38	251	Poljane pri NM	504691	64378	200	<b>CRS</b>
39	266	Šentjur	530921	119153	265	<b>CRS</b>
40	268	Celje	519469	122286	244	<b>RRS</b>

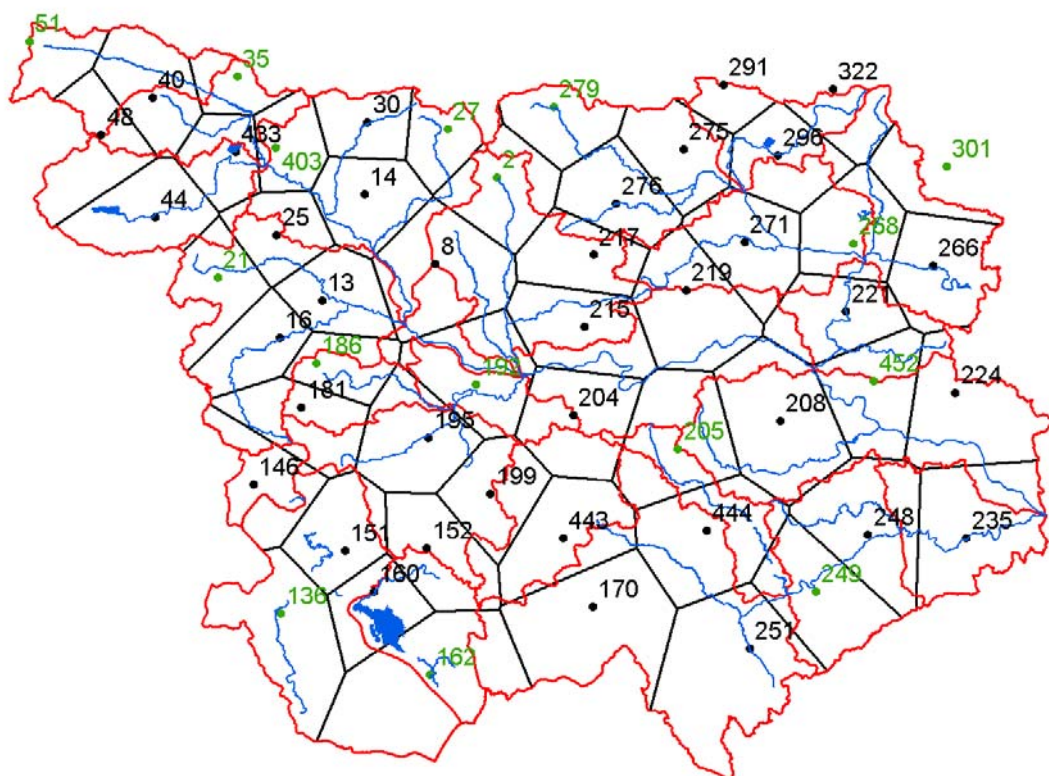
se nadaljuje ...

## nadaljevanje ...

Zap. št.	Šifra postaje	Ime merilne postaje	X [m]	Y [m]	Nadmorska višina [m]	
42	275	Radegunda	495213	135809	800	CRS
43	276	Gornji Grad	485557	128014	428	CRS
44	279	Solčava	476601	141841	658	RRS
45	291	Zgornji Razbor	500939	145068	864	CRS
46	296	Velenje	508656	134918	410	CRS
47	301	Slovenske Konjice	532870	133325	330	RRS
48	322	Mislinja	516560	144443	589	CRS
49	403	Lesce	436850	136011	515	RRS
50	433	Bled	431115	135456	482	CRS
51	443	Zdenska vas	478000	80200	440	CRS
52	444	Dobrníč	498448	81199	245	CRS
53	452	Lisca	522404	102670	943	RRS

Classical Raingauge Station - CRS  
Recording Raingauge Station - RRS

Navadna padavinska postaja  
Ombrograf



Slika 27: Izbrana merilna mesta za padavine z izrisanimi Thiessenovimi poligoni.

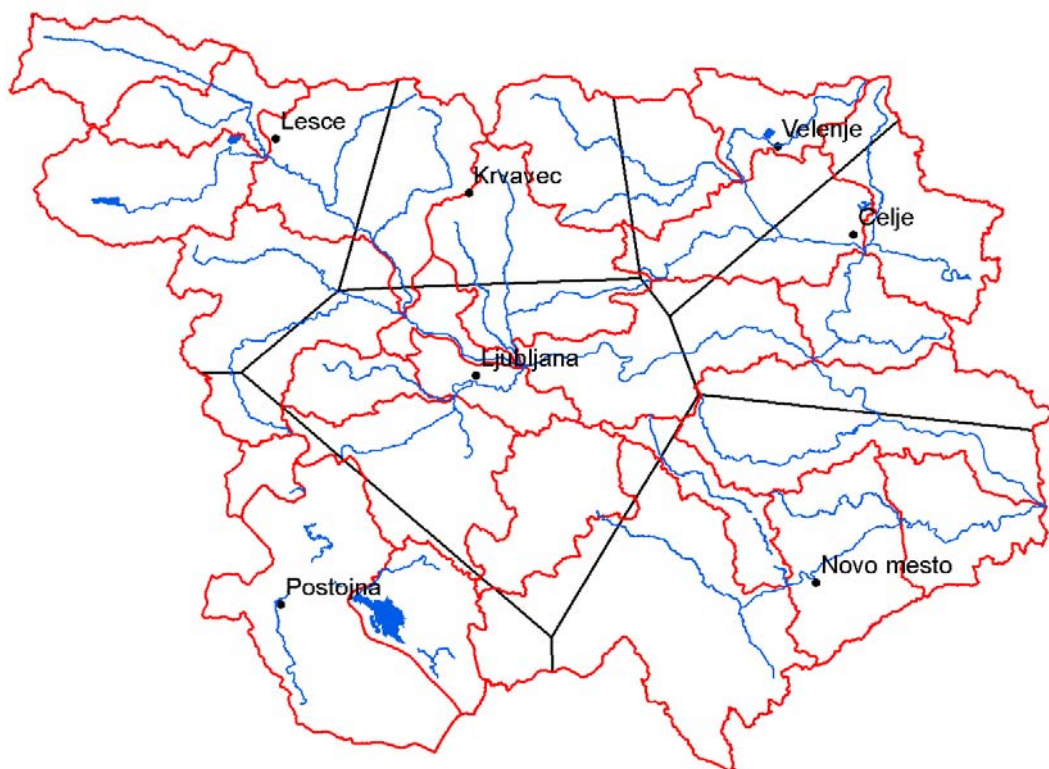
Za preračunavanje točkovnih vrednosti v ploskovne je bila uporabljena metoda Thiessenovih poligonov (slika 27). Deleže pokritosti posameznih podpovodij z določenim merilnim mestom se potrebuje za izračun uteži (glej: f).

Temperature v modelu HBV niso ključnega pomena. Uporabljajo se pri računskih postopkih za sneg in za račun vrednosti evapotranspiracije, če te niso drugače podane.

Sedem merilnih mest za temperature na porečju reke Save je bilo izbranih glede na enakomernost razporeditve in razgibanost terena (preglednica 5). Pri večji razgibanosti terena se namreč temperatura z lego v prostoru bolj spreminja, kot na področjih s konstantno nadmorsko višino. Iz slike 13 je razvidno, da je relief na S delu porečja bolj razgiban v primerjavi z J delom, zato je v S delu je tudi izbranih nekaj več merilnih mest.

Preglednica 5: Izbrana merilna mesta za temperature.

Šifra postaje	Ime postaje	X [m]	Y [m]
136	Postojna	437588	69412
192	Ljubljana	465468	102101
249	Novo mesto	514175	72525
268	Celje	519469	122286
403	Lesce	436850	136011
3	Krvavec	464459	128255
296	Velenje	508656	134918



Slika 28: Izbrana merilna mesta za temperature z izrisanimi Thiessenovimi poligoni.

## e) Izbira vodomernih postaj

Podatki o pretokih so ključnega pomena pri kalibraciji/verifikaciji modela. Uporabljajo se izključno za primerjavo z izračunanimi pretoki. Pri izbiri merilnih mest pretokov je potrebno upoštevati, da morajo biti ta merilna mesta čim bližje iztoku iz posameznega podpovodja.

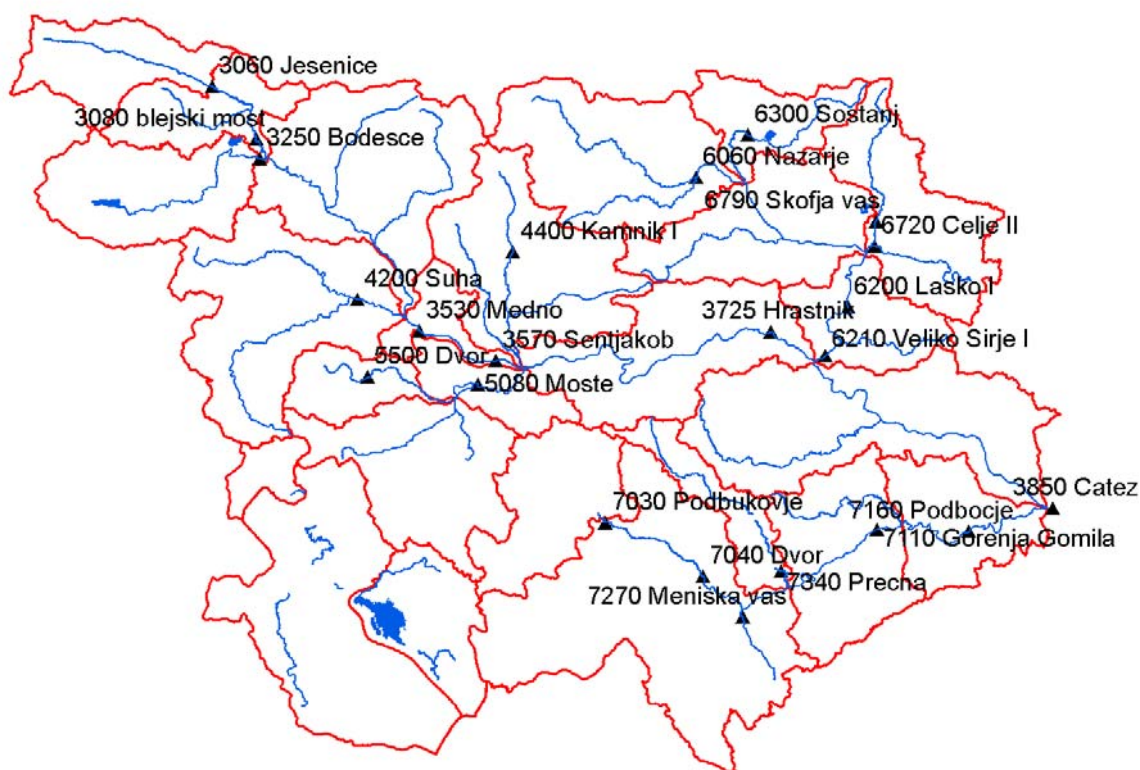
Preglednica 6: Seznam vodomernih postaj in podpovodij.

Ime podpovodja	Ime vodomerne postaje	Šifra vodomerne postaje
Sava Dolinka I	Jesenice	3060
Sava Dolinka II	blejski most	3080
Sava Bohinjka	Bodešče	3250
Kokra	Medno - Suha	3530 - 4200
Sora	Suha	4200
Sava I	Šentjakob	3570
Cerkniško jezero		
Kras I		
Kras II		
Ljubljanica I		

se nadaljuje ...

**nadaljevanje ...**

Ime podpovodja	Ime vodomerne postaje	Šifra vodomerne postaje
Gradaščica	Dvor	5500
Ljubljanica II	Moste	5080
Kamniška Bistrica	Kamnik I	4400
Sava II	Hrastnik	3725
Savinja izvir	Nazarje	6060
Paka	Šoštanj	6300
Savinja I	Laško I - (Škofja vas + Celje II)	6200 - (6790 + 6720)
Vogljajna	Škofja vas + Celje II	6790 + 6720
Savinja izliv	Veliko Širje I	6210
Sava III	Čatež - Podbočje	3850 - 7160
Krka izvir	Podbukovje	7030
Krka I	Dvor + Meniška vas	7040 + 7270
Temenica	Prečna	7340
Krka II	Gorenja Gomila	7110
Krka izliv	Podbočje	7160
Sava iztok	Čatež	3850



Slika 29: Izbrane vodomerne postaje.

## f) določitev PTQW-key datoteke

PTQW-key datoteka je datoteka, ki določa vsebino PQTW datoteke. V to datoteko je potrebno vnesti začetni in končni datum modela, časovni korak modela, ter vsa izbrana merilna mesta (z imeni, šiframi, ter oznako za kakšno merilno mersto gre: *p* – padavine, *t* – temperature, *q* – pretoki). Model reke Save je postavljen za obdobje 01.01.1990 – 31.12.2006 s časovnim korakom 1 dan.

V PTQW-key datoteki lahko končni datum poljubno spreminjamo, začetnega pa le, če to datoteko na novo določimo. Program omogoča vnos maksimalno 254 merilnih mest.

Station name	Code	Type	Repl	Corr
34 Ložice	224	p		
35 Brod (Kostanjevica)	235	p		
36 Vinji Urh	248	p		
37 Novo mesto	249	p		
38 Poljane pri Novem mestu	251	p		
39 Šentjur	266	p		
40 Celje	268	p		
41 Gomilsko	271	p		
42 Radegunda	275	p		
43 Gornji Grad	276	p		
44 Solčava	279	p		
45 Zgornji Razbor	291	p		
46 Uelenje	296	p		
47 Slovenske Konjice	301	p		
48 Mislinja	322	p		
49 Lesce	403	p		
50 Bled	433	p		
51 Zdenska vas	443	p		
52 Dobrnič	444	p		
53 Lisca	452	p		
54 Krvaavec	003	t		
55 Postojna	136	t		
56 Ljubljana	192	t		
57 Novo mesto	249	t		
58 Celje	268	t		
59 Uelenje	296	t		
60 Lesce	403	t		
61 Jesenice	3060	q		
62 blejski most	3080	q		
63 Bodešče	3250	q		
64 Medno	3530	q		
65 Šentjakob	3570	q		
66 Hrastnik	3725	q		
67 Čatež	3850	q		
68 Suha	4200	q		
69 Uir	4430	q		
70 Urhnika	5030	q		
71 Moste	5080	q		
72 Dvor	5500	q		
73 Nazarje	6060	q		
74 Laško	6200	q		
75 Veliko širje	6210	q		
76 Šoštanj	6300	q		
77 Celje	6720	q		
78 Škofja vas	6790	q		
79 Podbukovje	7030	q		
80 Dvor	7040	q		
81 Gorenja Gomila	7110	q		
82 Podbočje	7160	q		
83 Medno – Suha	11111	q		
84 Škofja vas + Celje	22222	q		
85 Čatež – Podbočje	33333	q		
86 Laško – (Škofja vas + Ce	44444	q		
87 Prečna	7340	q		
88 Dvor + Meniška vas	55555	q		
89 Uir + Podrečje Rača	77777	q		
90 Kannik	88888	q		

Legenda:

p padavine

t temperature

q pretoki

Slika 30: Izgled PTQW – key datoteke.

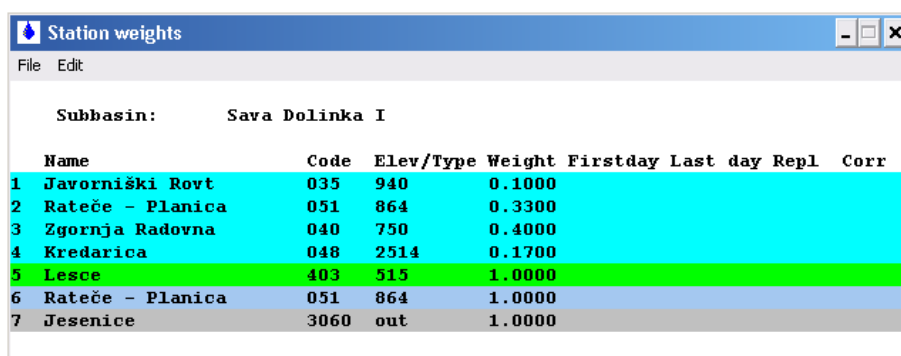
		Hišljina p 325	Lesce p 403	Šlup p 453	Zdravca p 443	Dobronič p 444	Lisca p 452	Hrušavec t 085	Peceljina t 136	Ljubljana t 192	Novo mesto t 249	Čelja t 258	Belovže t 259	Lesce t 403	Jezovce q 304	Štork q 305	Breda q 325
19900101	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.5	-2.5	-1.5	-1.5	-1.0	-2.0	7.35	8.62	18.50	
19900102	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.5	-3.7	-1.0	-1.0	-1.7	-0.0	7.35	8.62	9.02	
19900103	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.6	-2.6	-0.7	-1.5	-2.6	-0.6	7.35	13.50	6.43	
19900104	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.7	-3.5	-1.0	-2.0	-3.6	-0.7	7.35	14.50	7.66	
19900105	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.0	-4.0	-4.1	-5.4	-4.9	-3.0	7.06	19.50	7.02	
19900106	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.8	-7.3	-5.2	-5.6	-5.1	-6.1	7.06	13.50	6.43	
19900107	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.5	-7.1	-8.6	-7.8	-9.4	-7.3	6.78	7.82	5.84	
19900108	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.0	-5.5	-6.0	-9.2	-6.5	-8.0	6.51	15.60	5.84	
19900109	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.5	-2.0	-6.5	-5.9	-5.9	-0.4	6.51	17.20	5.29	
19900110	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-8.0	-6.4	-5.4	-8.0	6.51	14.00	5.29	
19900111	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	0.0	-4.6	-5.4	-6.5	-0.6	6.51	14.00	5.29	
19900112	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	-1.0	-4.0	-4.0	-6.5	-2.0	6.51	15.10	4.79	
19900113	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	-1.0	-4.0	-4.0	-6.5	-2.0	6.51	18.20	4.31	
19900114	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.2	0.7	-5.0	-6.1	-5.6	-4.0	6.25	13.00	4.31	
19900115	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	-4.5	-6.2	-6.2	-5.0	-5.5	6.25	16.10	4.31	
19900116	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	-1.7	-2.1	-2.0	-2.1	-0.1	6.25	14.00	4.31	
19900117	1	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	5.8	0.1	2.5	2.5	5.1	4.4	6.25	9.85	3.44	
19900118	1	5.2	1.2	0.0	0.0	0.0	3.7	-1.5	2.0	0.7	1.2	0.4	2.8	6.25	12.10	3.44	
19900119	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-5.0	-0.0	0.5	-1.0	-1.6	0.4	6.25	9.43	3.64	
19900120	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.4	0.0	0.2	0.2	1.4	6.25	16.10	3.20	
19900121	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	0.5	2.3	0.1	3.1	6.25	8.62	3.64	
19900122	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	1.1	0.0	2.1	0.2	4.4	6.25	10.20	3.64	
19900123	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	2.1	-0.1	1.6	-0.2	-4.0	6.25	13.20	3.64	
19900124	1	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	-2.5	8.0	7.5	7.7	7.7	7.7	6.51	12.10	62.50	
19900125	1	0.0	0.6	2.5	0.3	0.2	0.1	-1.5	5.4	5.4	6.0	5.4	6.4	6.51	15.60	3.20	
19900126	1	43.1	38.1	26.3	5.1	2.7	82.6	0.0	7.0	8.5	8.4	5.2	5.0	6.51	21.90	22.60	
19900127	1	0.1	5.2	2.0	0.0	0.0	-0.2	1.9	2.7	2.1	0.5	2.1	0.9	6.51	12.10	62.50	
19900128	1	12.2	30.9	30.5	0.0	4.8	27.0	0.0	5.7	8.0	9.2	8.0	8.0	7.06	9.85	35.40	
19900129	1	7.4	5.5	5.4	6.8	4.3	1.6	0.6	7.5	9.8	5.8	6.8	6.8	13.90	33.00	157.00	
19900130	1	0.0	4.4	3.3	0.3	0.0	0.0	0.1	6.9	7.9	5.5	6.5	6.0	7.94	32.20	122.00	
19900131	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.6	6.1	5.6	6.2	7.0	2.9	8.00	74.40	74.40	
19900201	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.1	5.0	7.3	5.0	6.7	5.7	7.06	27.00	35.40	
19900202	1	0.0	0.9	1.2	0.0	0.0	0.0	-1.5	6.9	7.0	8.0	7.9	7.4	6.78	27.00	29.40	
19900203	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.4	7.0	8.7	8.7	8.5	7.4	6.51	15.60	21.60	
19900204	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	5.0	7.0	8.1	5.1	5.7	6.25	14.50	17.50	
19900205	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	1.7	4.0	4.8	2.1	5.1	6.25	15.10	15.60	
19900206	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	3.6	3.0	3.2	3.4	4.0	5.99	11.20	15.60	
19900207	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	2.0	2.4	2.9	0.5	3.4	5.99	11.20	12.10	
19900208	1	6.7	2.2	0.0	0.4	4.9	1.0	5.6	3.4	4.9	6.5	5.4	1.0	5.99	10.70	10.50	
19900209	1	0.0	4.4	5.5	5.1	3.8	2.7	-4.2	1.0	2.8	2.6	2.5	3.2	6.4	5.99	12.10	
19900210	1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-5.0	0.0	0.7	0.6	3.3	1.7	-2.0	6.47	14.00	
19900211	1	8.7	4.0	3.5	8.7	7.1	6.2	-6.0	0.0	1.5	1.0	1.6	2.1	6.72	8.62	7.66	
19900212	1	1.1	1.9	3.4	10.6	5.0	2.5	-6.8	1.1	1.5	0.7	3.2	1.0	6.72	17.20	7.02	
19900213	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.5	0.4	2.3	0.4	2.3	0.4	6.47	16.70	6.43	
19900214	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.6	4.0	4.0	4.4	5.1	5.2	6.22	13.50	6.43	
19900215	1	3.0	0.0	0.0	2.4	7.8	8.0	-0.7	8.7	6.8	6.8	8.2	7.7	6.6	6.22	17.20	6.43
19900216	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.0	1.4	3.8	3.2	3.0	4.2	6.22	11.60	5.29	
19900217	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.7	1.8	6.9	6.2	5.4	2.8	6.22	10.70	5.29	
19900218	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	2.0	6.4	6.5	6.4	5.8	6.25	9.02	4.79	
19900219	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	7.4	7.7	7.5	7.4	6.8	2.7	5.99	10.70	4.79
19900220	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.1	7.2	7.1	7.0	5.4	6.5	5.99	11.20	4.79	
19900221	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	7.0	7.1	7.5	5.5	8.0	5.4	5.99	11.20	4.79
19900222	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.1	11.1	8.0	9.0	9.0	10.5	5.4	5.99	14.50	4.79
19900223	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.8	8.0	8.4	6.8	5.9	7.9	5.99	10.90	4.79	
19900224	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.1	7.8	6.2	7.4	5.4	9.4	5.99	11.60	4.79	
19900225	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	5.9	9.2	10.1	9.5	11.2	5.4	5.99	11.20	4.31
19900226	1	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.0	8.0	10.0	11.7	11.1	9.8	7.0	5.99	14.50	4.79
19900227	1	11.7	2.2	2.4	10.4	10.9	7.5	-0.0	7.0	8.0	7.6	10.0	5.0	7.0	5.25	12.10	5.29
19900228	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-3.0	4.0	7.0	5.0	3.4	5.6	5.75	14.50	5.29	
19900229	1	0.0	0.0	0.0	0.0	11.1	0.0	-1.0	7.6	7.0	7.0	9.2	7.7	6.4	5.75	15.60	4.79
19900230	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-4.0	1.0	4.8	3.8	2.8	4.1	5.99	14.50	4.79	

Slika 31: Izgled PTQW datoteke, potem ko preko ukaza Database/import standard-format uvozimo podatke v model.

g) izračun uteži in vnos le teh v model

Izračun uteži vhodnih podatkov (evapotranspiracije, padavin in temperatur) poteka po metodi Thiessenovih poligonov (slike 26, 27 in 28). Poligoni predstavljajo simetrale črt, ki vežejo posamezna merilna mesta. Na tak način dobimo mrežo poligonov in za vsak poligon reprezentančno mersko postajo. Za porečje reke Save so bili poligoni izrisani s pomočjo računalniškega programa ArcGis. Uteži, ki jih potrebujemo pri postavitvi modela, so nato izračunane glede na površine Thiessenovih poligonov, ki prekrivajo posamezno podpovodje. Uteži predstavljajo razmerje med celotno površino podpovodja in površino dela podpovodja, ki ga prekriva Thiessenov poligon posameznega merilnega mesta. Uteži je potrebno vnesti za vsako podpovodje posebej.





Subbasin: Sava Dolinka I							
Name	Code	Elev/Type	Weight	Firstday	Last day	Repl	Corr
1 Javorniški Rovt	035	940	0.1000				
2 Rateče - Planica	051	864	0.3300				
3 Zgornja Radovna	040	750	0.4000				
4 Kredarica	048	2514	0.1700				
5 Lesce	403	515	1.0000				
6 Rateče - Planica	051	864	1.0000				
7 Jesenice	3060	out	1.0000				

Slika 32: Primer vnosa podatkov o utežeh v modelu HBV.

## h) uvoz vhodnih podatkov v model

Podatke o padavinah, temperaturah in pretokih je v PTQW datoteko potrebno uvoziti preko ukaza Database/Import standard-format. Podatki morajo biti pripravljeni v ASCII formatu. Pri pripravi teh datotek je potrebno paziti na glavo datoteke, ki mora vsebovati podatke o imenu in šifri merilnega mesta, o tipu meritve ( $P$  - padavine,  $T$  - temperature,  $Q$  - pretoki) in o številu korakov/dan in na podajanje podatkov v telesu datoteke.

'P'	'Q'	'T'
002	11111	003
'Kamniška Bistrica'	'Medno - Suha'	'Krvavec'
1 0	1 24	1 24
1990 1 2 0	1990 1 1 36.3	1990 1 1 -0.5
1990 1 3 0	1990 1 2 36.7	1990 1 2 -0.5
1990 1 4 0	1990 1 3 37.9	1990 1 3 -6.4
1990 1 5 0	1990 1 4 38.31	1990 1 4 -2.7
...	...	...

Slika 33: Primer treh ASCII datotek za uvoz podatkov v HBV model.

## i) določitev začetnega stanja in izbira izhodnih spremenljivk

Ob prvem zagonu modela začetno stanje predstavlja prvi dan obdobja modeliranja. V primeru porečja reke Save je to datum 01.01.1990. Pred umerjanjem modela je potrebno določiti novo začetno stanje. To storimo preko ukaza Computation/Create/save/delete model state in sicer tako, da po prvem zagonu modela kontroliramo izmerjene in izračunane pretoke, kjer se ti dve krivulji približno ujemata, izdelamo novo začetno stanje. Običajno je to z zamikom dveh do

treh mesecev. Posledica je boljše ujemanje krivulj izračunanih in opazovanih pretokov in tudi višji vrednosti  $R^2$  za obdobje kalibracije in verifikacije modela. V primeru porečja reke Save predstavlja novo začetno stanje datum 01.03.1990.

Model HBV omogoča izdelavo do 50 različnih začetnih stanj. Kreiranje začetnih stanj je tudi sicer zelo uporabna funkcija, kajti če se želimo pri umerjanju modela osredotočiti le na določeno obdobje oziroma, če želimo preveriti obnašanje modela le v določenem obdobju, lahko to enostavno storimo s klikom na izbrano začetno stanje in nam ni potrebno vedno znova vpisovati začetnega in končnega datuma tega obdobja.

Potrebno je še izbrati izhodne spremenljivke, to je spremenljivke katere želimo, da jih model izpiše. Izbrane spremenljivke se po izračunu za vsako podpovodje posebej izpišejo v datoteko comp.tab. Osnovni izhodni produkt je odtok, vendar sistem omogoča prikaz tudi drugih spremenljivk, ki se nanašajo na komponente vodne balance in jih program računa (povprečne padavine na povodju, temperatura zraka, evapotranspiracija, vlaga in zaloga vode v tleh, snežna odeja, idr.). Seznam izhodnih spremenljivk modela HBV- 96 je podan v prilogi B.

#### **4.2 Kalibracija in verifikacija HBV modela z dnevnimi podatki**

Za kalibracijo in verifikacijo modela reke Save, z dnevnimi podatki, je bilo dogovorjeno obdobje 16 let. Od tega je obdobje od 1990 do 1999 uporabljeno za kalibracijo modela, obdobje od 2000 do 2006 pa za verifikacijo modela.

V procesu umerjanja porečja se za vsako podpovodje spreminjajo parametri (PRILOGA A), tako da je razlika med izračunanimi in dejanskimi pretoki najmanjša. Sosledje umerjanja posameznih podpovodij poteka v smeri toka. Najprej se umerja podpovodje ob izviro, ko je to umerjeno, se nadaljuje z umerjanjem dolvodno.

Poleg parametrov se umerja tudi evapotranspiracijo.

Ob zagonu modela HBV za porečje reke Save smo v mesecih julij, avgust in september ugotovili, da model preceni pretoke. Rešitve smo iskali v netočnih vrednostih evapotranspiracije v tem obdobju. Po znatnem povečanju vrednosti evapotranspiracije v omenjenih mesecih, je model dal boljše rezultate.

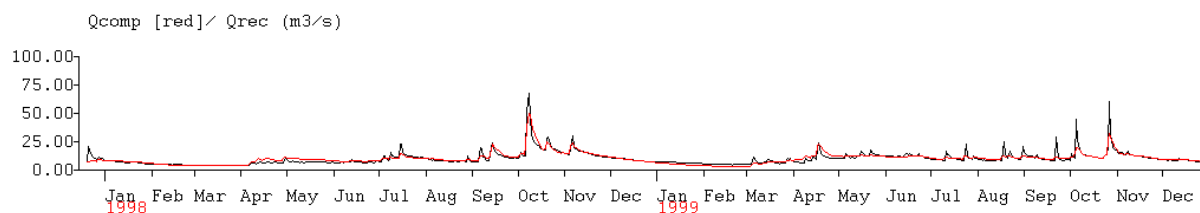
Preglednica 7: Primerjava vrednosti  $R^2$  za obdobje kalibracije in verifikacije modela

Ime podpovodja	Ime vodomerne postaje	Šifra vodomerne postaje	$R^2$ za obdobje kalibracije m.	$R^2$ za obdobje verifikacije m.
Sava Dolinka I	Jesenice	3060	0.82346	0.84424
Sava Dolinka II	Blejski most	3080	0.80830	0.81083
Sava Bohinjka	Bodešče	3250	0.83783	0.82229
Kokra	Medno - Suha	3530 - 4200	0.84200	0.85358
Sora	Suha	4200	0.84946	0.80451
Sava I	Šentjakob	3570	0.89825	0.87905
Cerkniško jezero				
Kras I				
Kras II				
Ljubljana I				
Gradaščica	Dvor	5500	0.61119	0.64090
Ljubljana II	Moste	5080	0.85929	0.86589
Kamniška Bistrica	Kamnik I	4400	0.81603	0.78050
Sava II	Hrastnik	3725	0.89748	0.90322
Savinja izvir	Nazarje	6060	0.86426	0.82697
Paka	Šoštanj	6300	0.79851	0.66023
Savinja I	Laško I - (Škofja vas + Celje II)	6200 - (6790 + 6720)	0.83752	0.86281
Vogljajna	Škofja vas + Celje II	6790 + 6720	0.79684	0.63012
Savinja izliv	Veliko Širje I	6210	0.84936	0.85994
Sava III	Čatež - Podbočje	3850 - 7160	0.86652	0.86942
Krka izvir	Podbukovje	7030	0.83157	0.78229
Krka I	Dvor + Meniška vas	7040 + 7270	0.82325	0.81766
Temenica	Prečna	7340	0.71753	0.68345
Krka II	Gorenja Gomila	7110	0.81725	0.77760
Krka izliv	Podbočje	7160	0.83662	0.79861
Sava iztok	Čatež	3850	0.88410	0.87368

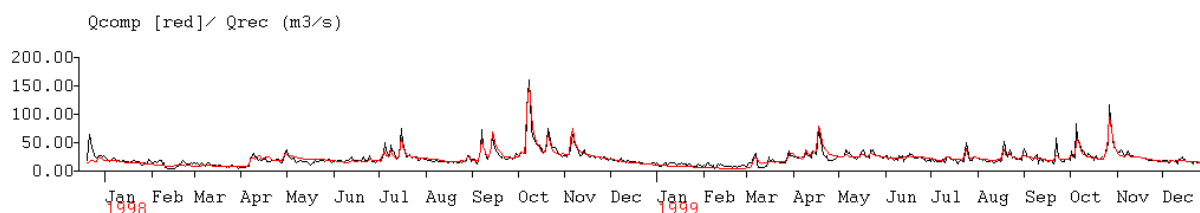
V preglednici 7 je za vse vodomerne postaje podan Nash-Sutcliffov kriterij  $R^2$ , za obdobje kalibracije in za obdobje verifikacije. Na podpovodjih, ki v preglednici 7 nimajo podanih vrednosti  $R^2$ , umerjanje ni bilo izvršeno.

Na sliki 34 je prikazana primerjava izračunanih pretokov z opazovanji. Primerjava pretokov je podana le za obdobje 1998-1999.

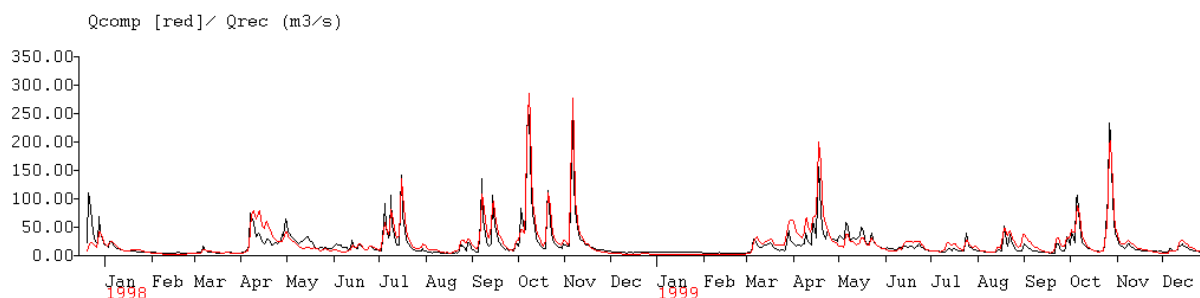
(a) Sava Dolinka I



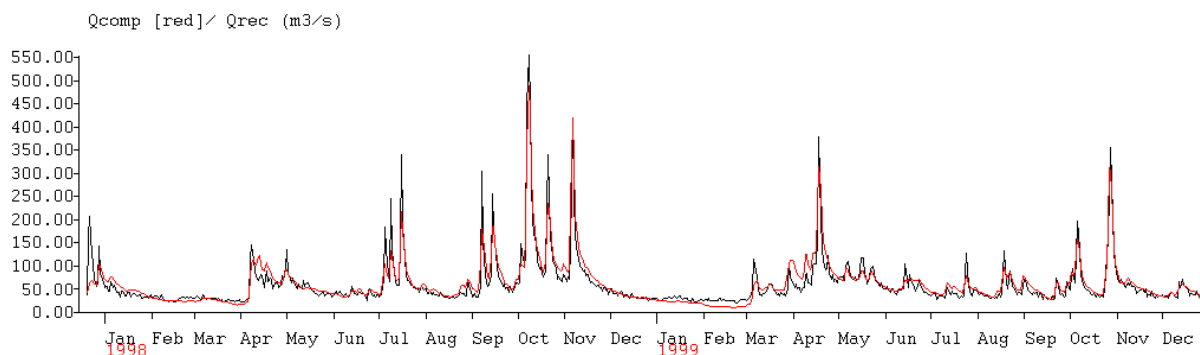
(b) Sava Dolinka II



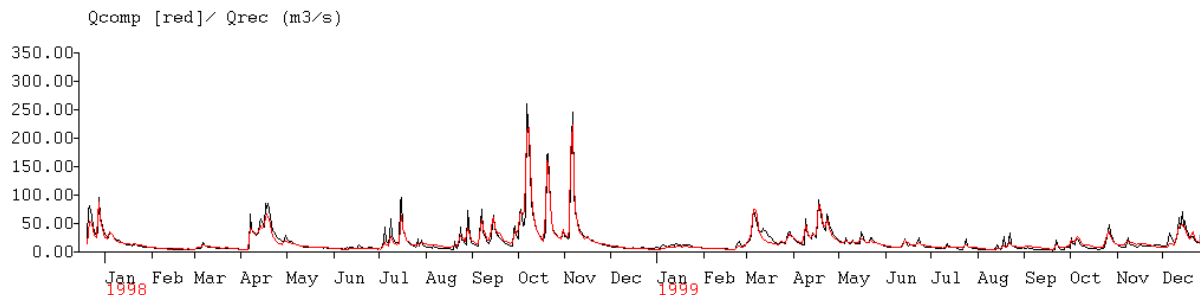
(c) Sava Bohinjka



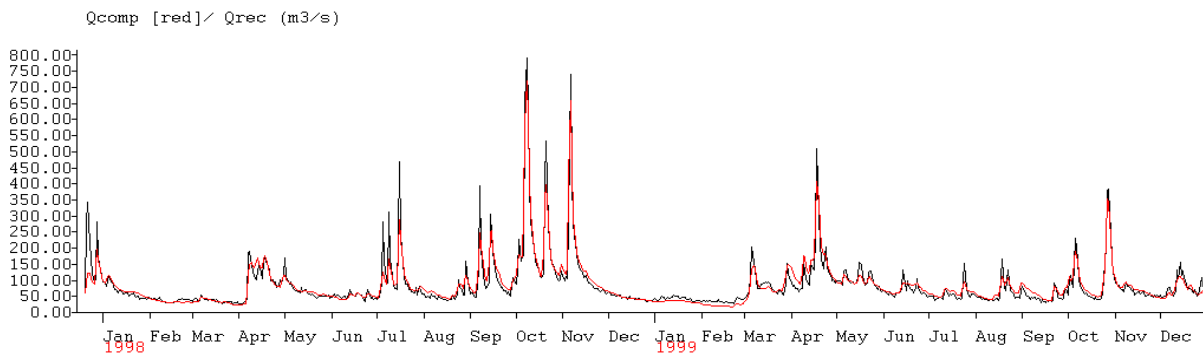
(d) Kokra



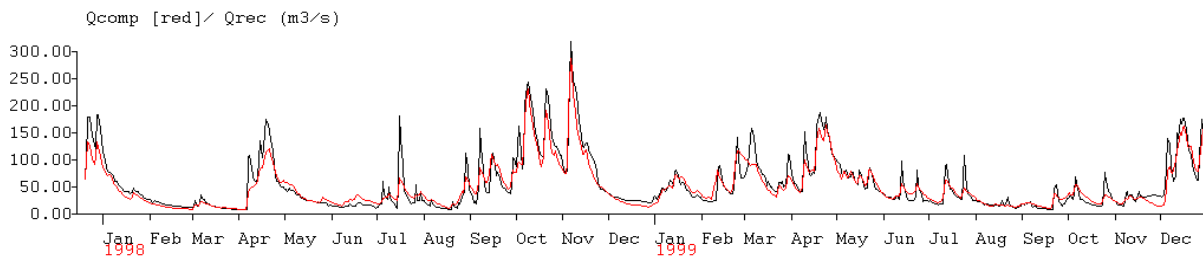
(e) Sora



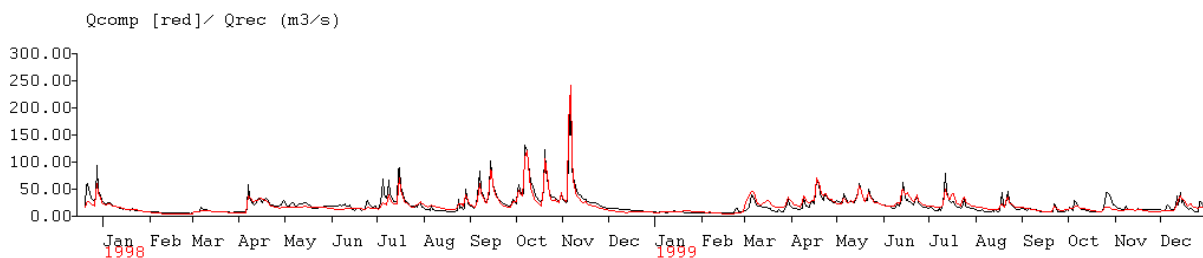
## (f) Sava I



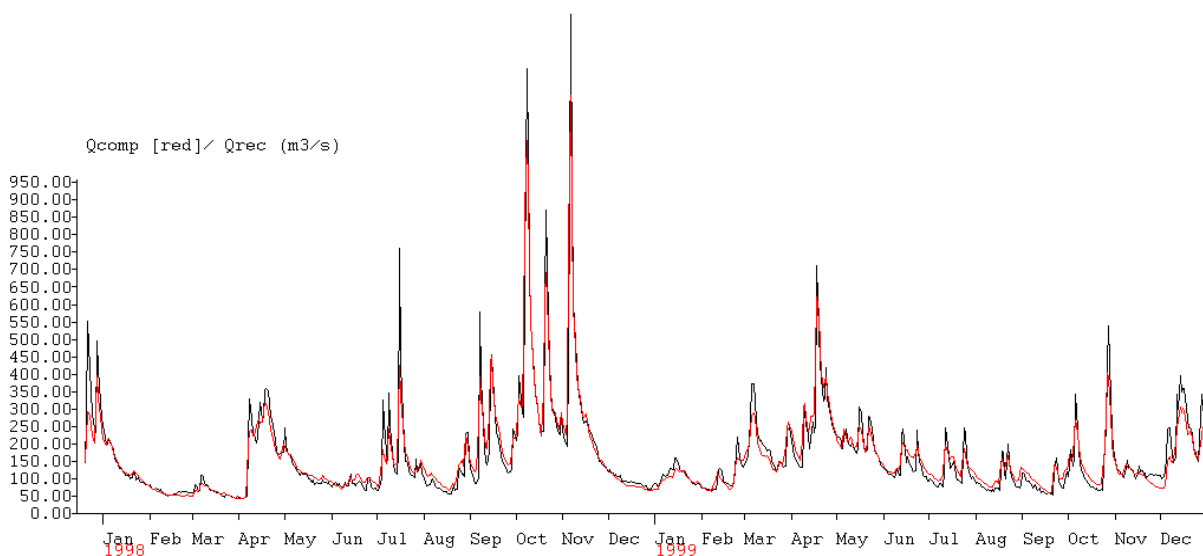
## (g) Ljubljana II



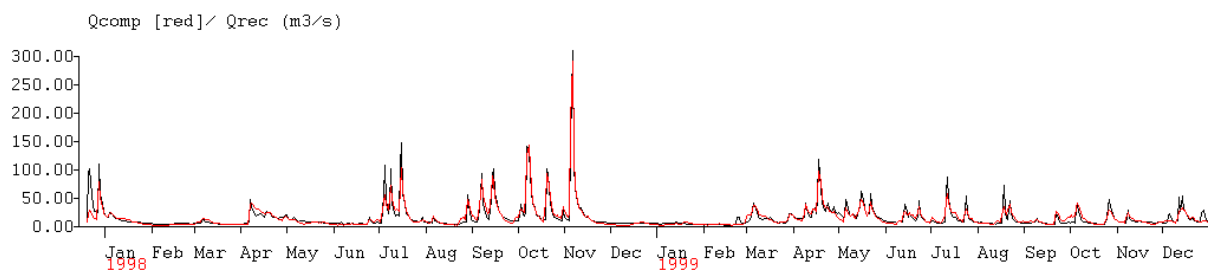
## (h) Kamniška Bistrica



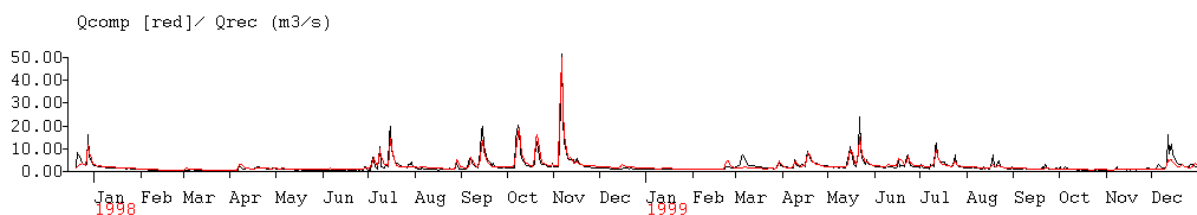
## (i) Sava II



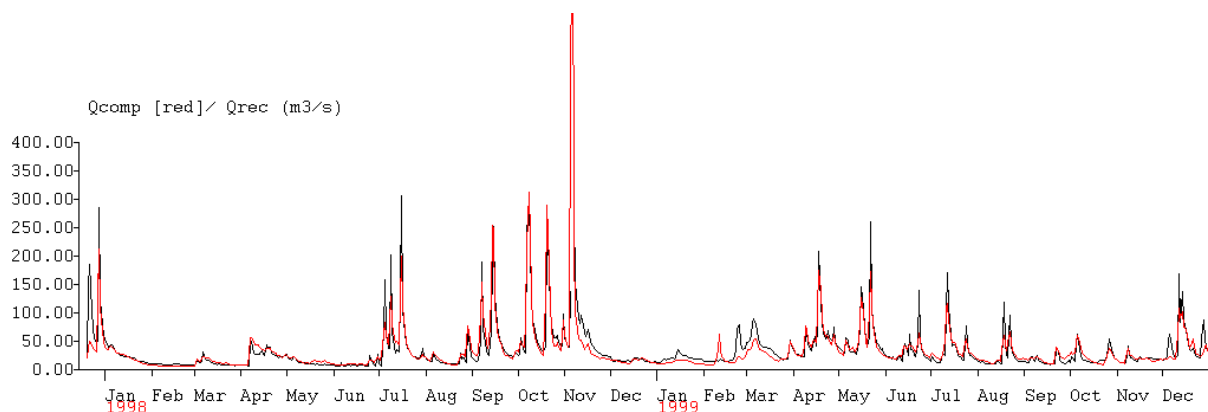
(j) Savinja izvir



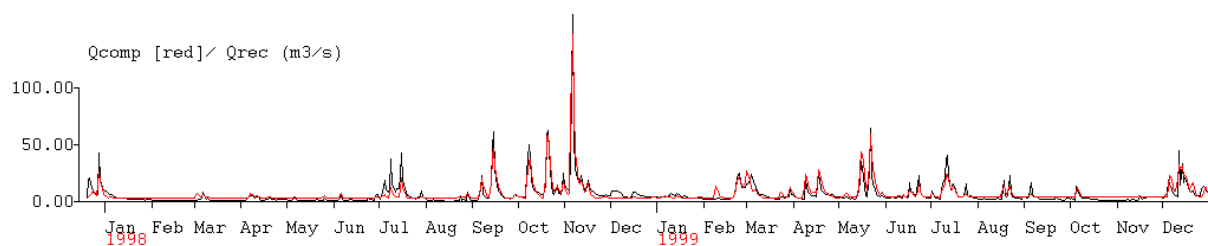
(k) Paka



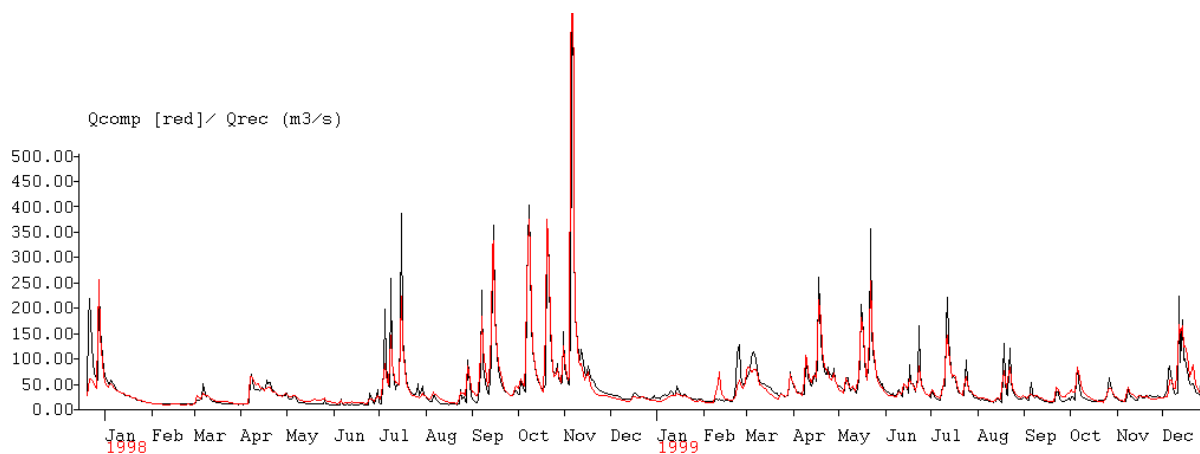
(l) Savinja I



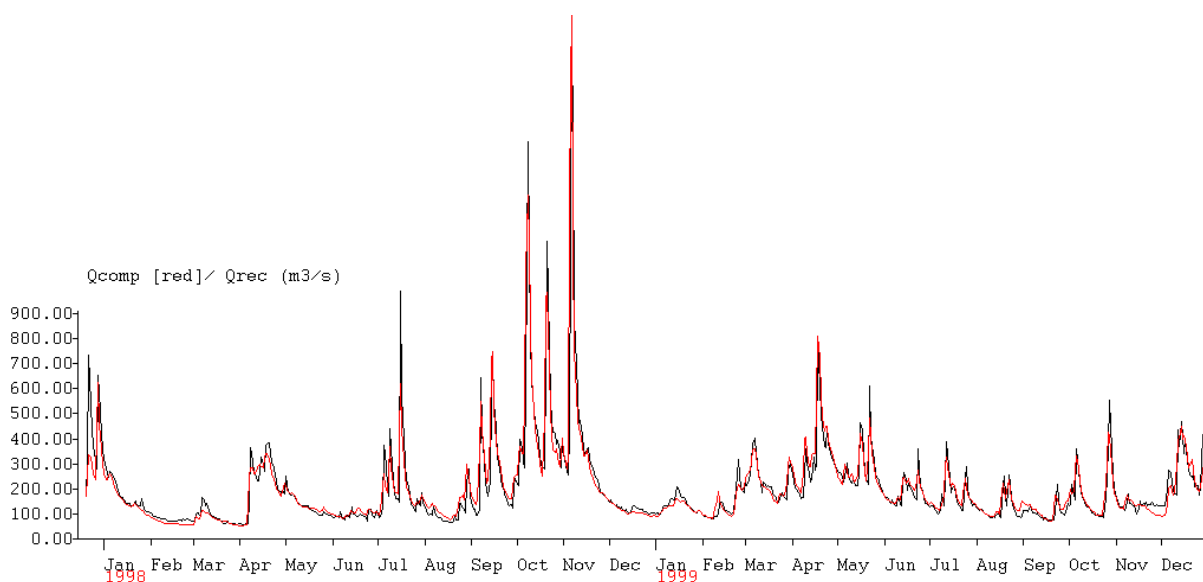
(m) Voglajna



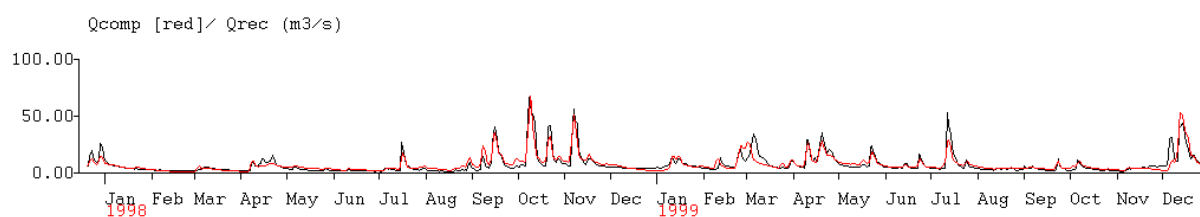
## (n) Savinja izliv



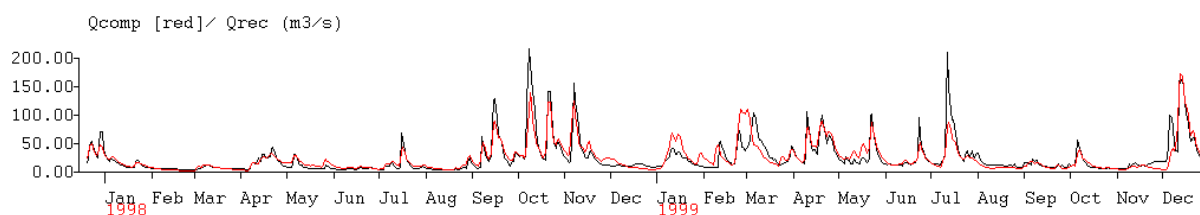
## (o) Sava III



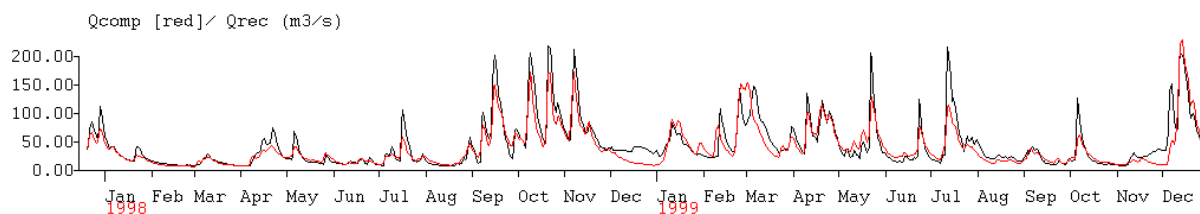
## (p) Krka izvir



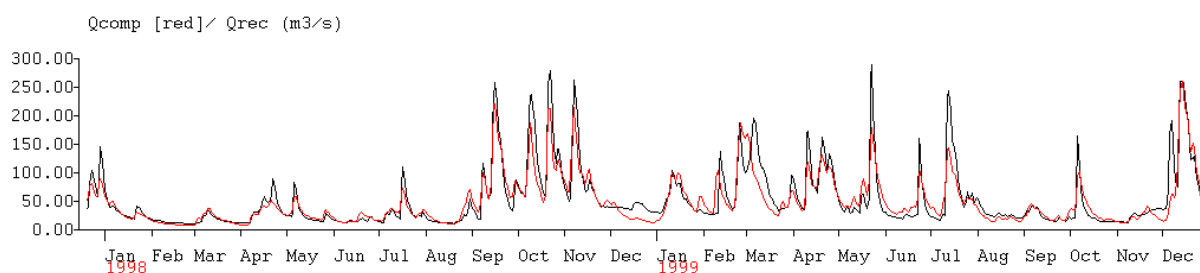
## (q) Krka I



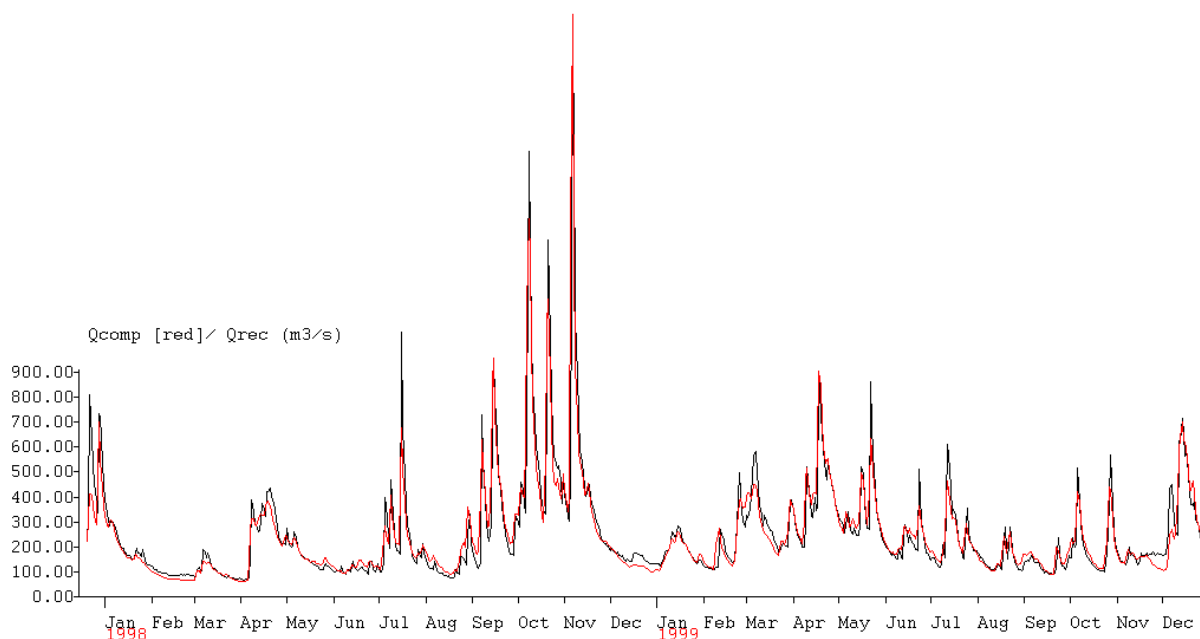
(r) Krka II



(s) Krka izliv



(t) Sava izliv



Slika 34 (a) - (t): Primerjava izračunanih in opazovanih pretokov za obdobje 1998-1999 za posamezna podpovodja (vodomerne postaje) po procesu kalibracije.

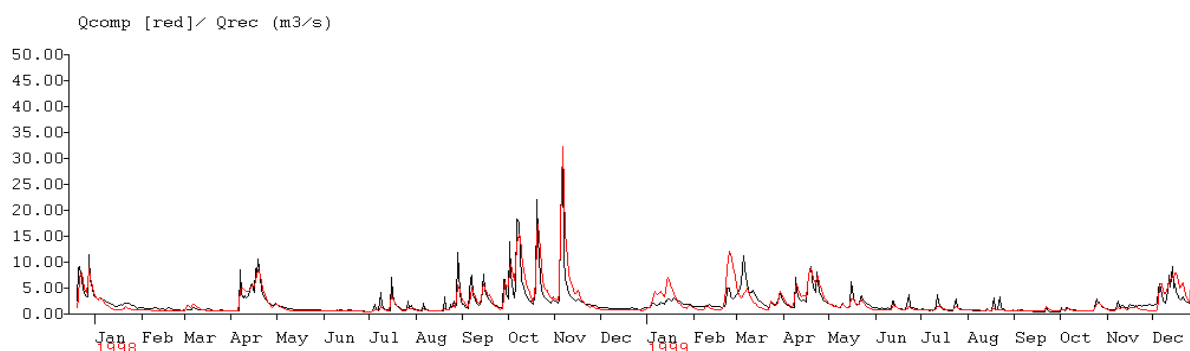
Primerjave izračunanih in opazovanih pretokov na sliki 34 ustrezajo vrednostim Nash-Sutcliffovega kriterija  $R^2$  za obdobje kalibracije modela (preglednica 7). O dobro umerjenem podpovodju lahko govorimo, če je vrednost  $R^2$  preko 0.8 (IHMS, 1999).



Iz preglednice 7 je razvidno, da so skoraj pri vseh vodomernih postajah vrednosti Nash-Sutcliffeovega kriterija višje od 0.8. Podpovodja Gradaščica, Paka, Voglajna in Temenica imajo nekoliko nižje vrednosti za  $R^2$ . Običajno vzroki za slabše umerjeno podpovodje ne ležijo v samem umerjanju, pač pa v slabših vhodnih podatkih.

Od omenjenih bi izpostavil najslabše umerjeni podpovodji Gradaščica ( $R^2 = 0.61115$ ) in Temenica ( $R^2 = 0.71753$ ).

#### Gradaščica:



Slika 35: Izmerjeni in izračunani pretoki na iztoku iz podpovodja Gradaščica.

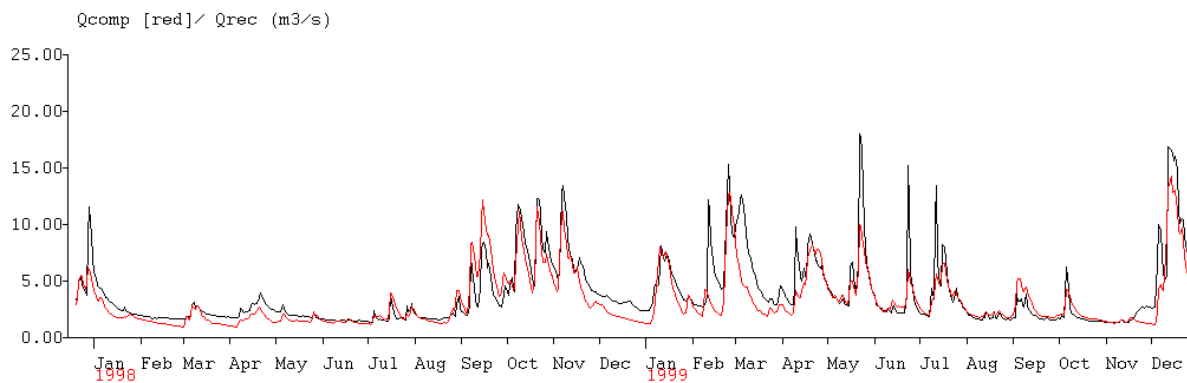
Gradaščica ima relativno nizko vrednost  $R^2$ , kar je opaziti tudi na sliki 35, kjer je ujemanje opazovanih in izmernih pretokov dokaj slabo. Vzrok za to najdemo v tem (slika 36), da podpovodje Gradaščica sestoji iz porečij dveh rek, Gradaščice in Horjulščice. Iztok iz podpovodja torej predstavlja skupni pretok obeh rek v točki na izhodu iz podpovodja. Vodomerna postaja, ki podaja opazovane pretoke na sliki 36 je Dvor (5500), nahaja pa se na reki Gradaščici (slika 36, v.p. je označena z rdečim krogom). Da bi lahko izračunani iztok iz podpovodja, primerjali z ustreznimi opazovanimi pretoki, bi bila potrebna vodomerna postaja dovodno, tik za sotočjem Gradaščice in Horjulščice. Taka vodomerna postaja žal ne obstaja, kot tudi ne obstaja vodomerna postaja na Horjulščici, preko katere bi lahko s seštevkem opazovanih pretokov obeh postaj dobili pretoke za umerjanje podpovodja.

Podpovodje Gradaščica je zato le približno umerjeno glede na vodomerno postajo Dvor (5500).



Slika 36: Karta dela podpovodja Gradaščica z označeno vodomerno postajo Dvor (5500).

Temenica:



Slika 37: Izmerjeni in izračunani pretoki na iztoku iz podpovodja Temenica.

Podpovodje Temenica se nahaja v zakraselem predelu Slovenije. Razlike med izračunanimi in opazovanimi pretoki za to podpovodje izhajajo iz karakteristik krasa. Ta namreč padavinsko vodo sprejme in jo nato časovno neodvisno vrača v reko, česar pa model ne more predvideti.

Podpovodja Cerknjiško jezero, Kras I, Kras II in Ljubljana I niso umerjena (tudi nimajo vrednosti  $R^2$  v preglednici 7) kajti brez podatkov o izmerjenih pretokih teh tudi ni mogoče

umeriti. Vodomerne postaje na področju omenjenih podpovodij sicer obstajajo, a so zaradi karakteristik krasa njihovi podatki za HBV model porečja reke Save neuporabni. Za kraška področja je značilno, da tam praktično ni površinskega odtoka in da celotne padavine odtečejo podzemno. Podpovodja Cerkniško jezero, Kras I, Kras II in Ljubljana I so tudi podzemno močno povezana, kar pomeni, da pretoke reke na iztoku iz posameznega podpovodja zato ni mogoče povezati le z iztokom iz tega podpovodja.

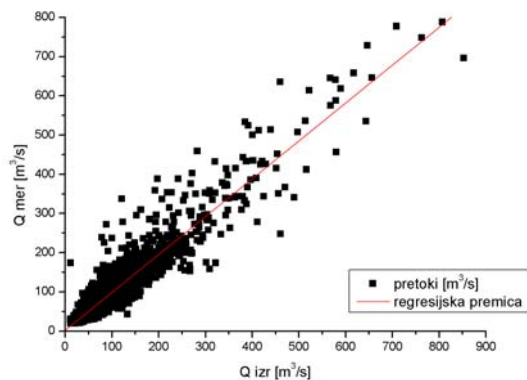
Od dobro umerjenih podpovodij je potrebno omeniti le še Kamniško Bistrico. Tudi pri tem podpovodju se pojavlja problem izbire ustrezne vodomerne postaje za primerjavo z izračunanimi pretoki. Dobiti bi bilo potrebno opazovane pretoke Kamniške Bistrice tik pred sotočjem s Savo, kajti sotočje predstavlja spodnjo točko podpovodja Kamniška Bistrica. Vodomerne postaje, najbližje sotočju, so večinoma v okolici Domžal (slika 38) in so označene z modrimi kvadrati, vendar pa zaradi regulacijskih objektov ne dajejo pravih rezultatov (ki bi ustrezali naravni dinamiki pretokov). Zaradi tega je bila izbrana vodomerne postaja Kamnik I (na sliki 38 označena z rdečim krogom). Za to vodomerno postajo je bil izračunan specifični odtok za del podpovodja (do vodomerne postaje Kamnik I), ki je bil nato ekstrapoliran na celotno podpovodje.



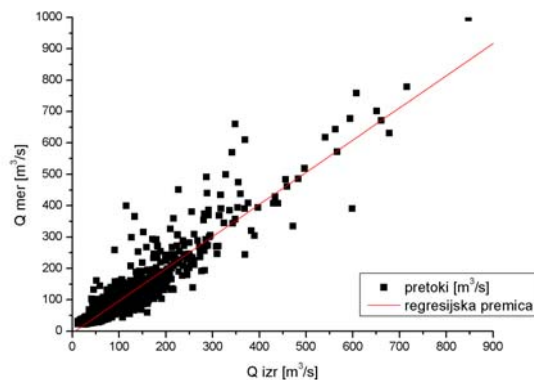
Slika 38: Karta dela porečja Kamniška Bistrica z vodomerno postajo Kamnik I (4400).

a) Sava I

obdobje kalibracije

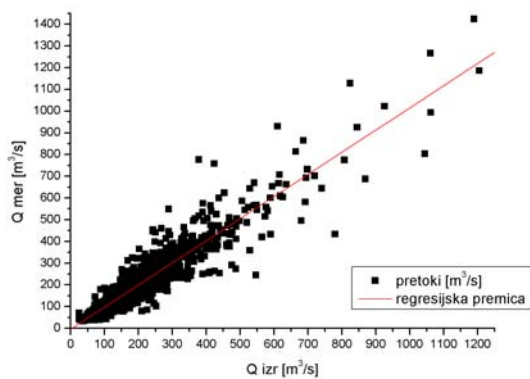


obdobje verifikacije

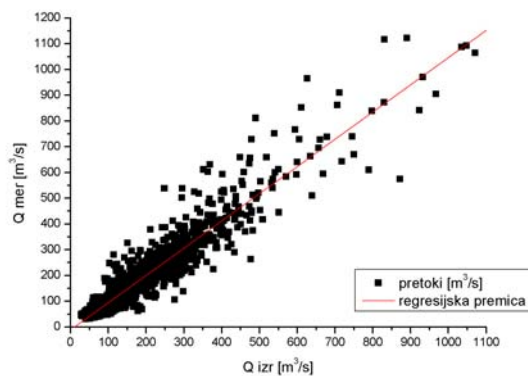


b) Sava II

obdobje kalibracije

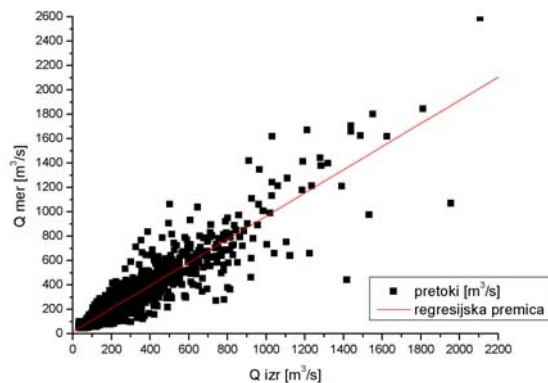


obdobje verifikacije

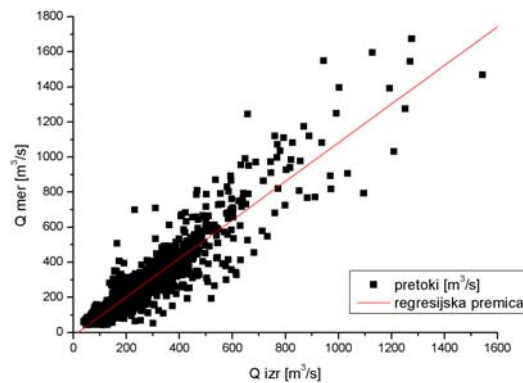


c) Sava III

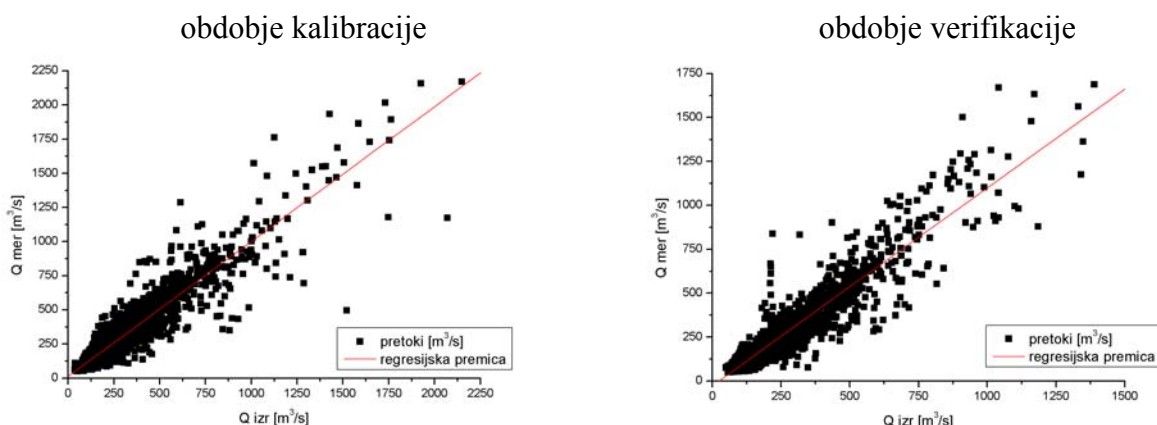
obdobje kalibracije



obdobje verifikacije



d) Sava izliv



Slika 39 (a) – (d): Primerjava merjenih in izračunanih pretokov modela z dnevnimi podatki.

Preglednica 8: Rezultati kalibracije modela z dnevnimi vrednostmi za izbrana podpovodja za obdobje 1990 – 1999.

Ime podpovodja	Korelacijski koeficient $R$	Standardna deviacija $SD$	Enačba regresijske premice
Sava I	0.94839	23.30222	$Y = 1.8745 + 0.96655 \cdot X$
Sava II	0.94752	39.21911	$Y = -3.55615 + 1.01882 \cdot X$
Sava III	0.93275	65.28002	$Y = 16.19737 + 0.94933 \cdot X$
Sava izliv	0.9413	75.60614	$Y = 12.59005 + 0.98788 \cdot X$

Preglednica 9: Rezultati verifikacije modela z dnevnimi vrednostmi za izbrana podpovodja za obdobje 2000 – 2006.

Ime podpovodja	Korelacijski koeficient $R$	Standardna deviacija $SD$	Enačba regresijske premice
Sava I	0.93912	26.10932	$Y = -5.74356 + 1.02522 \cdot X$
Sava II	0.9519	38.92544	$Y = -10.68498 + 1.05741 \cdot X$
Sava III	0.93637	61.39994	$Y = -17.94707 + 1.10035 \cdot X$
Sava izliv	0.94078	72.70425	$Y = -26.46628 + 1.12582 \cdot X$

V preglednici 8 in 9 se pojavlja enačba regresijske premice, ki definirana kot:

$$Y = A + B \cdot X, \quad (20)$$

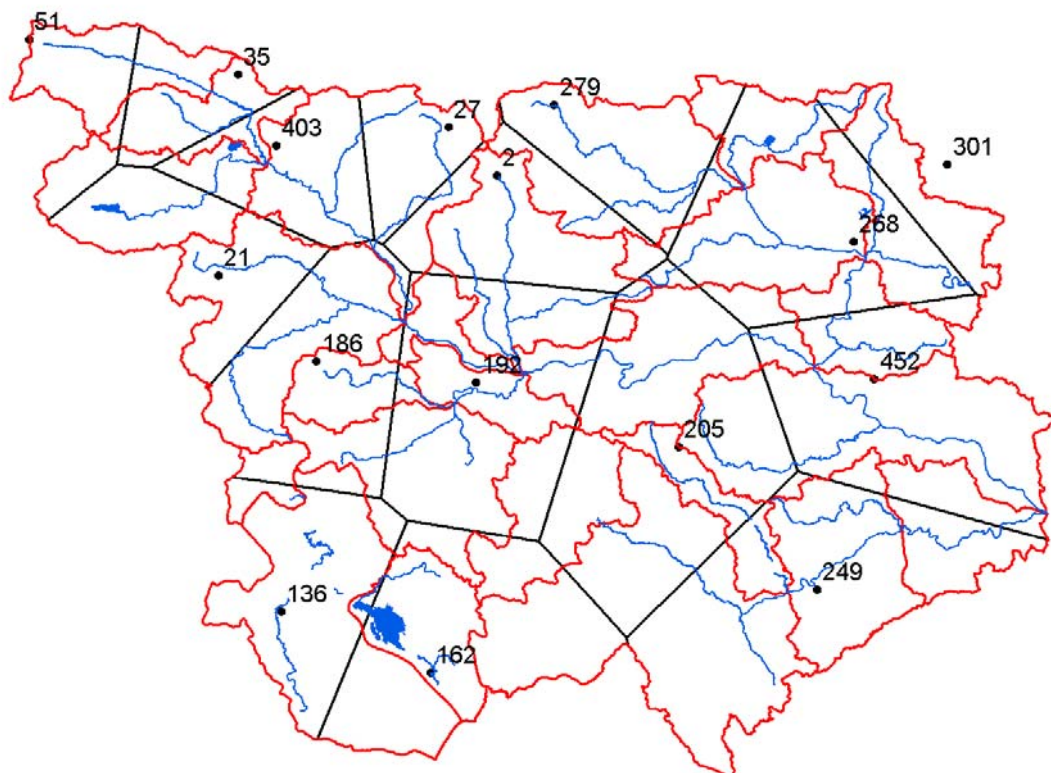
standardna deviacija  $SD$  pa kot:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - (A + B \cdot x_i))^2}{N - 2}}, \quad (21)$$

kjer je  $N$  je število vrednosti,  $A$  in  $B$  sta parametra regresijske premice in  $x_i, y_i$  so vrednosti.

### 4.3 Prehod na HBV model z urnimi podatki

Glede na to, da model HBV-96 dopušča krajši časovni korak od enega dneva, je bil z namenom simulacije padavinskih scenarijev na porečju reke Save umerjen model s časovnim korakom ene ure. Začetne vrednosti parametrov modela so bili privzete iz modela z dnevnimi podatki. V model so bili lahko vključeni le ombrografi, katerih vrednosti so v arhivu ARSO podane na 5 minut in omogočajo izračun urne količine padavin. Na porečju reke Save in v bližnji okolici je na razpolago 16 ombrografskih postaj. Omenjeni ombrografi so prikazani na sliki 40 (z izrisanimi Thiessenovimi poligoni), v preglednici 4 pa so označeni s kratico **RRS**.



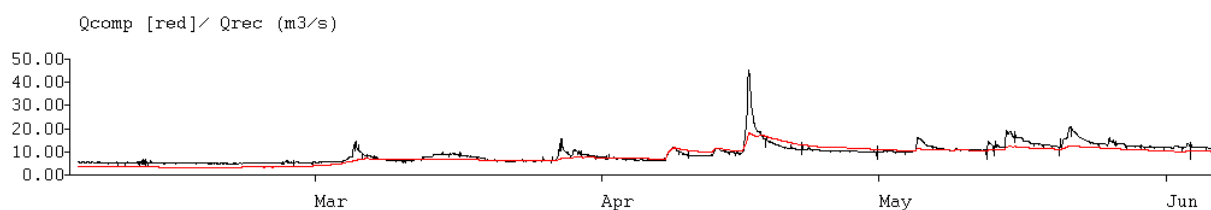
Slika 40: Položaj ombrografov z izrisanimi Thiessenovimi poligoni.

#### 4.4 Kalibracija HBV modela z urnimi podatki

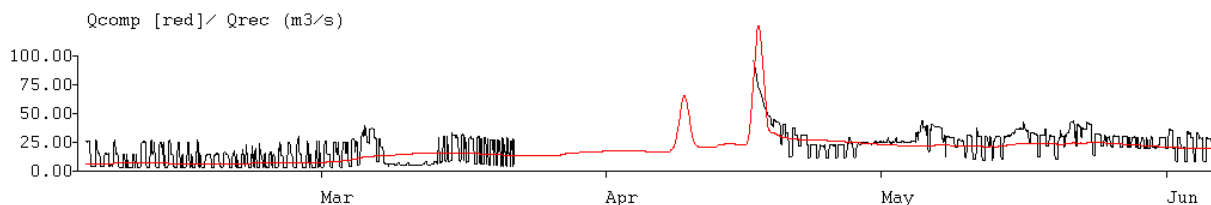
Glede na to, da so bile ob prehodu na model z urnimi podatki, začetne vrednosti parametrov privzete iz modela z dnevnimi podatki, modela ni bilo potrebno v celoti še enkrat umerjati. Kljub temu je bilo zaradi zmanjšanja števila merilnih mest padavin, potrebno nekatere parametre ponovno umeriti. Umerjanje modela z urnimi podatki je bilo skoncentrirano na parametre, ki vplivajo na obliko hidrograma. Ponovno je bilo tako potrebno umeriti parametre: *KHQ*, *HQ*, *ALFA*, *K4*, *PERC* in *MAXBAS*. Rezultati umerjanja so za posamezna podpovodja podani na sliki 42 (a) – (s), sliki 42 ter preglednici 10.

Verifikacija za model z urnimi podatki ni bila dogovorjena, zato so vsi rezultati podani le za obdobje kalibracije.

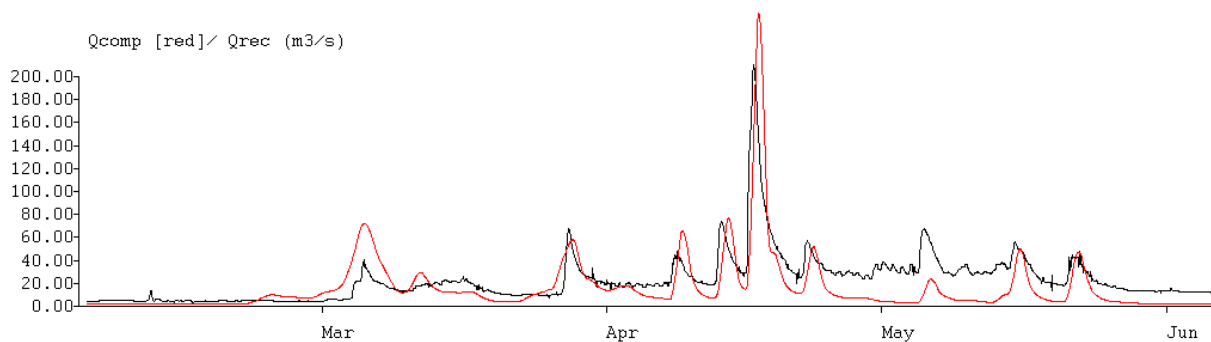
(a) Sava Dolinka I



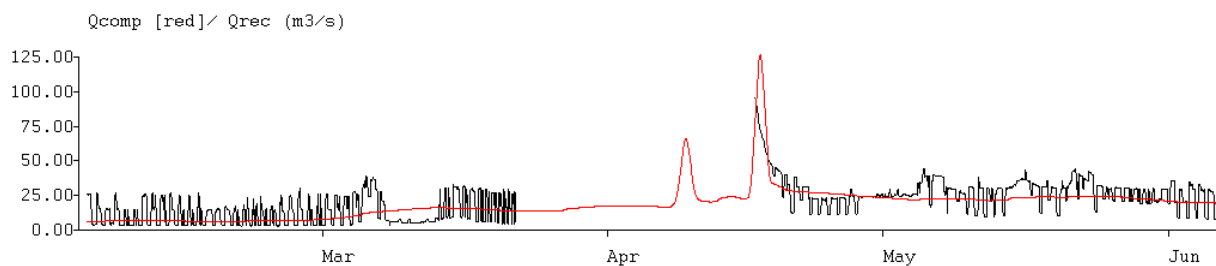
(b) Sava Dolinka II



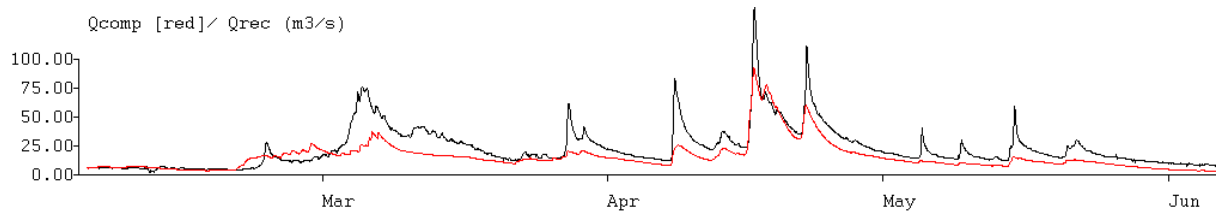
(c) Sava Bohinjka



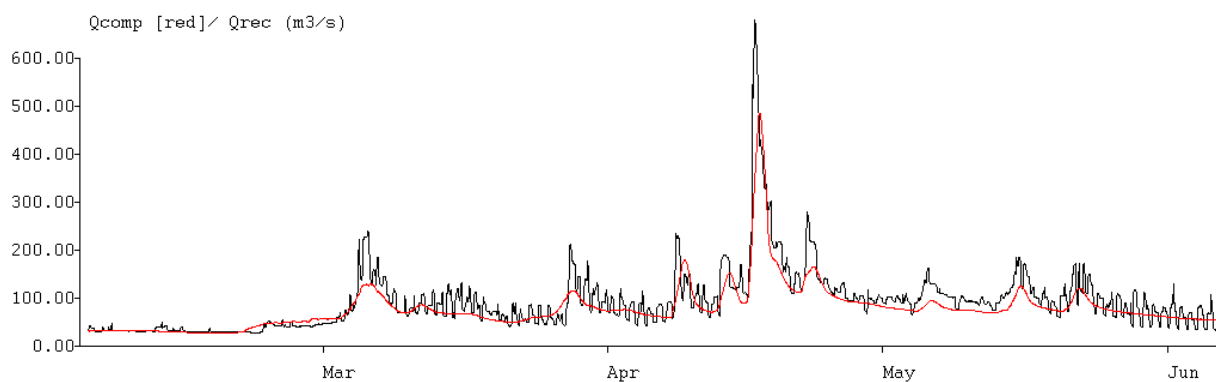
(d) Kokra



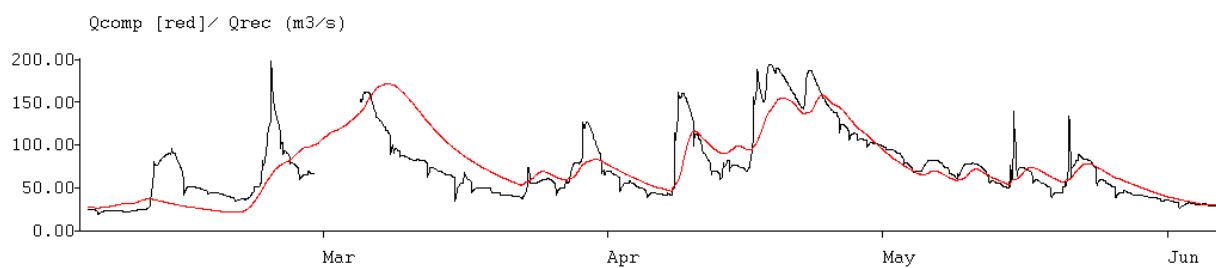
(e) Sora



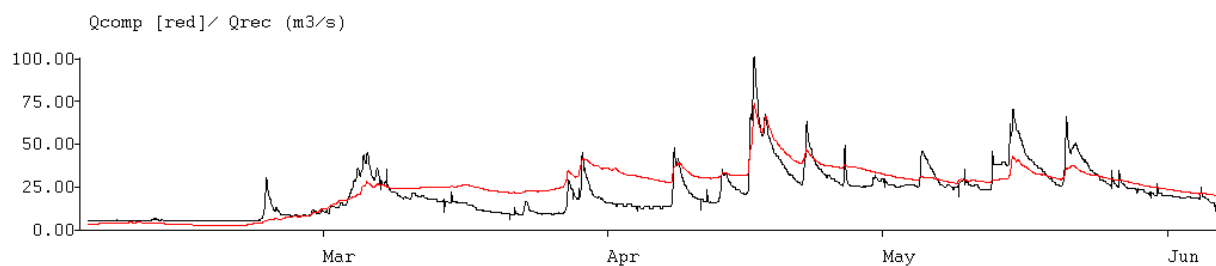
(f) Sava I



(g) Ljubljana II

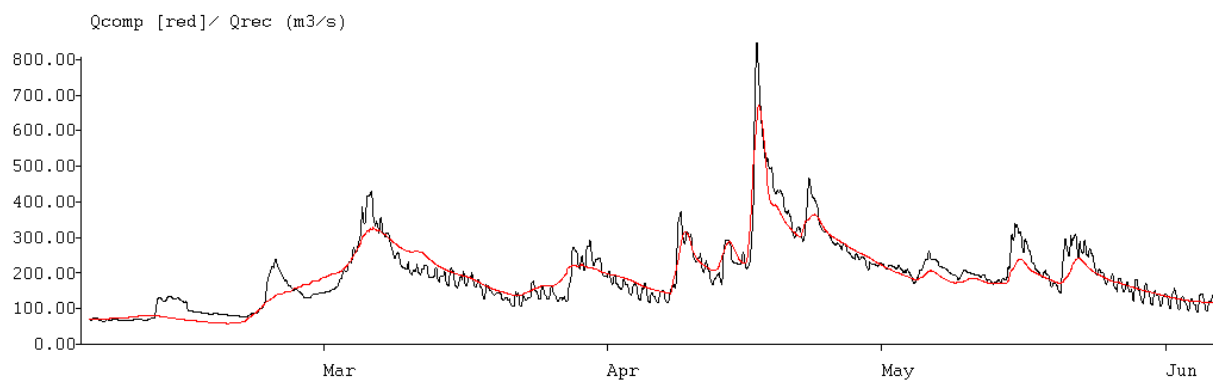


(h) Kamniška Bistrica

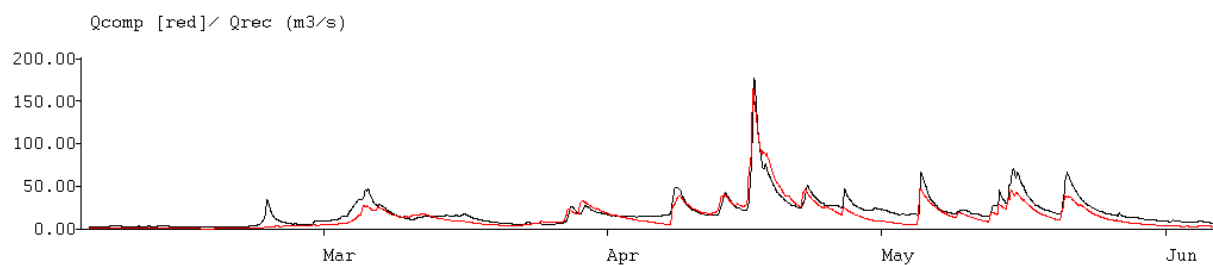




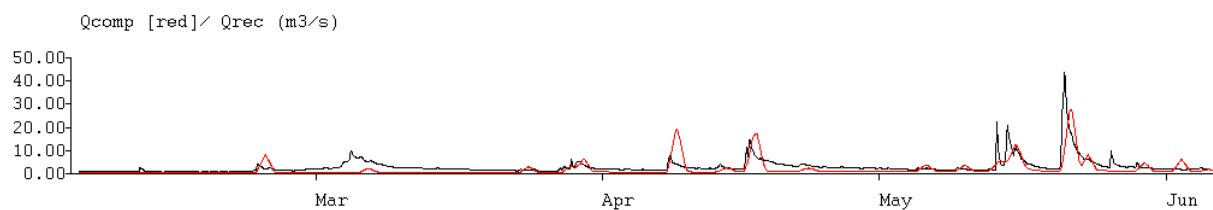
## (i) Sava II



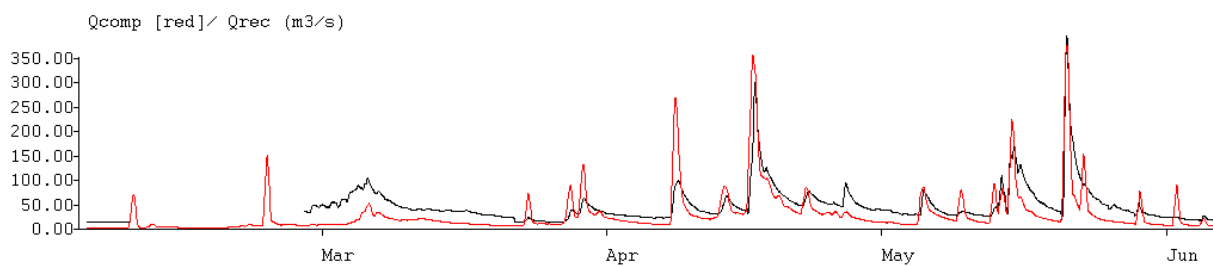
## (j) Savinja izvir



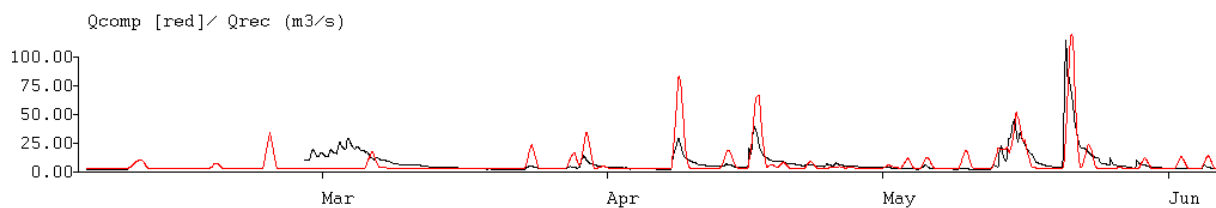
## (k) Paka



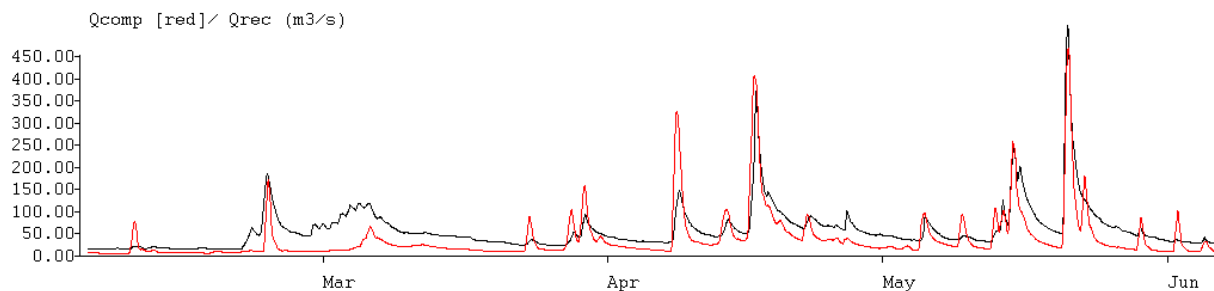
## (l) Savinja I



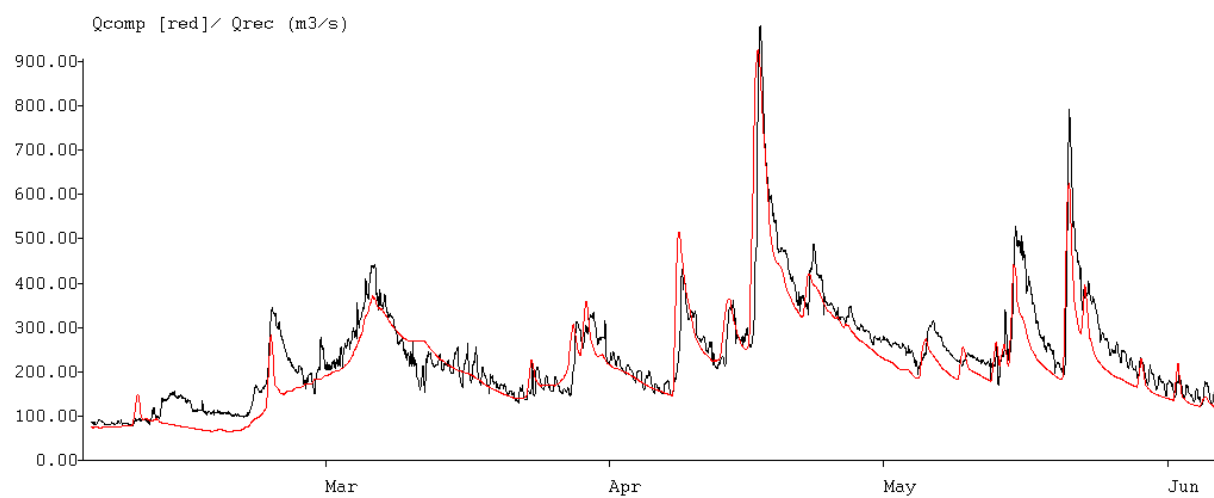
## (m) Voglajna



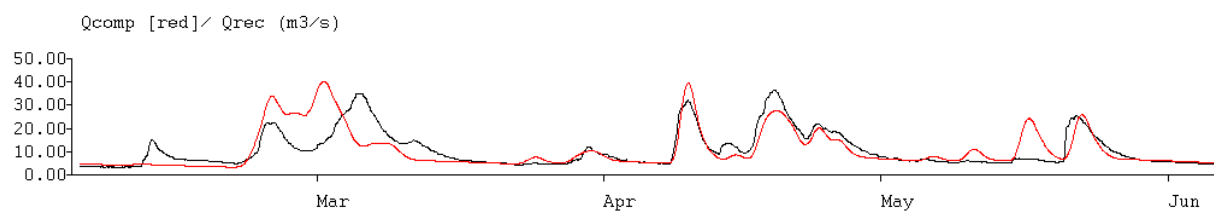
(n) Savinja izliv



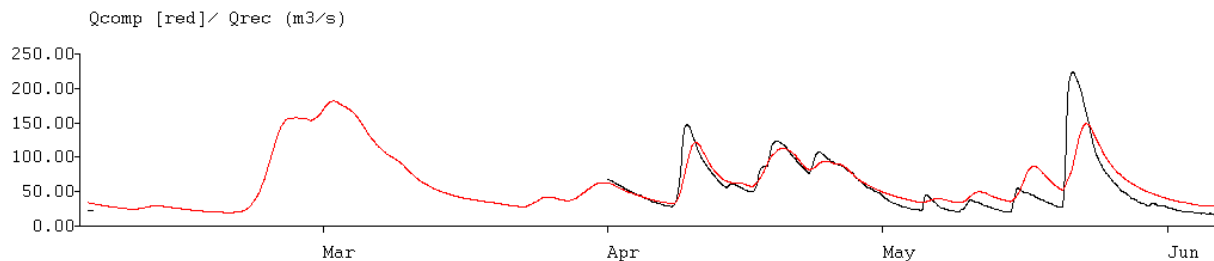
(o) Sava III



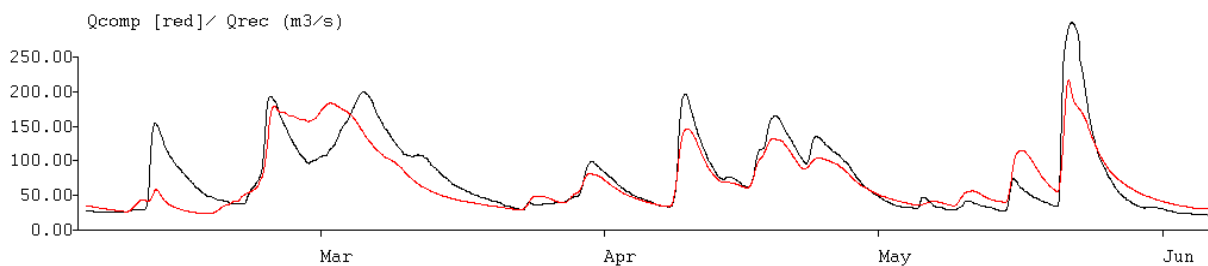
(p) Krka izvir



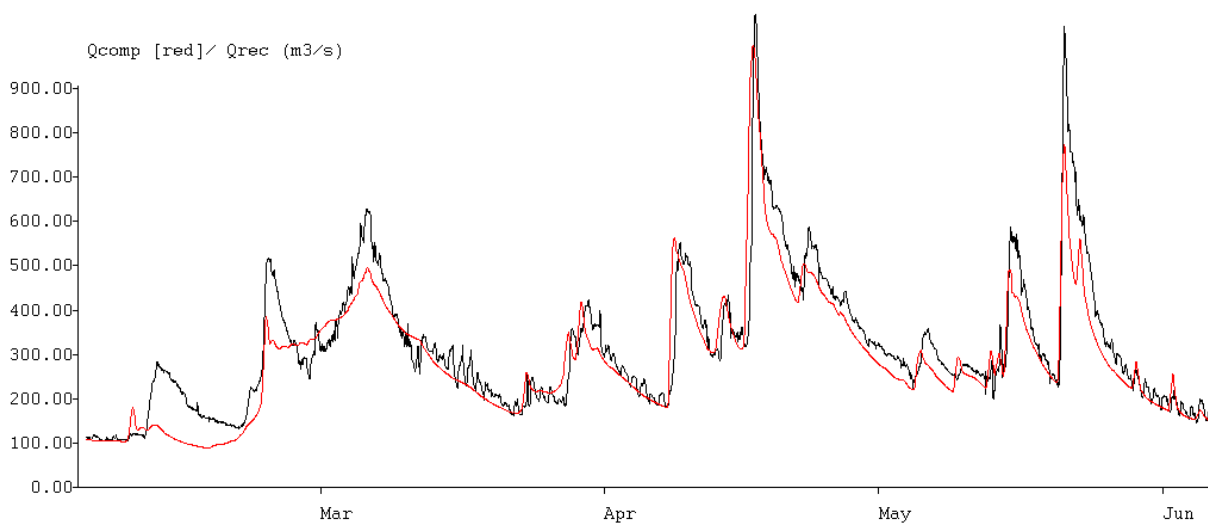
(q) Krka II



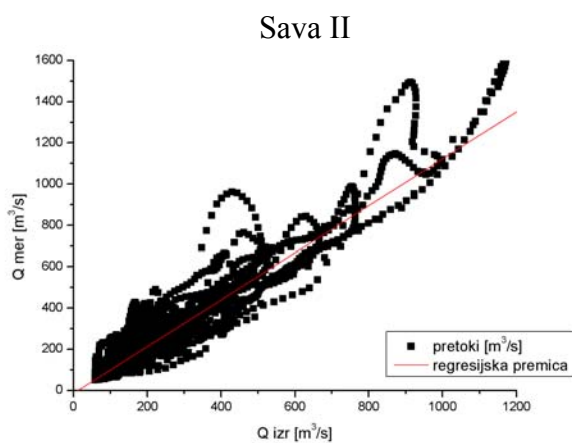
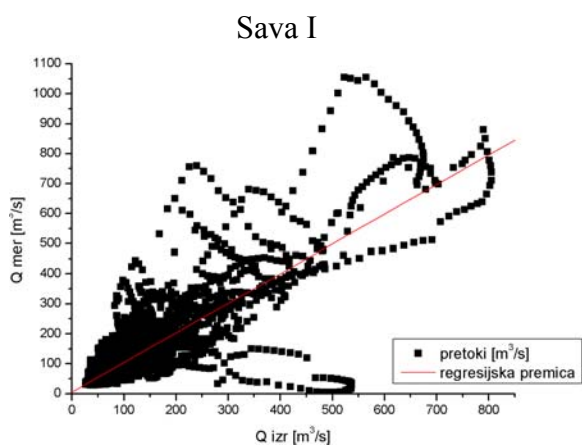
## (r) Krka izliv

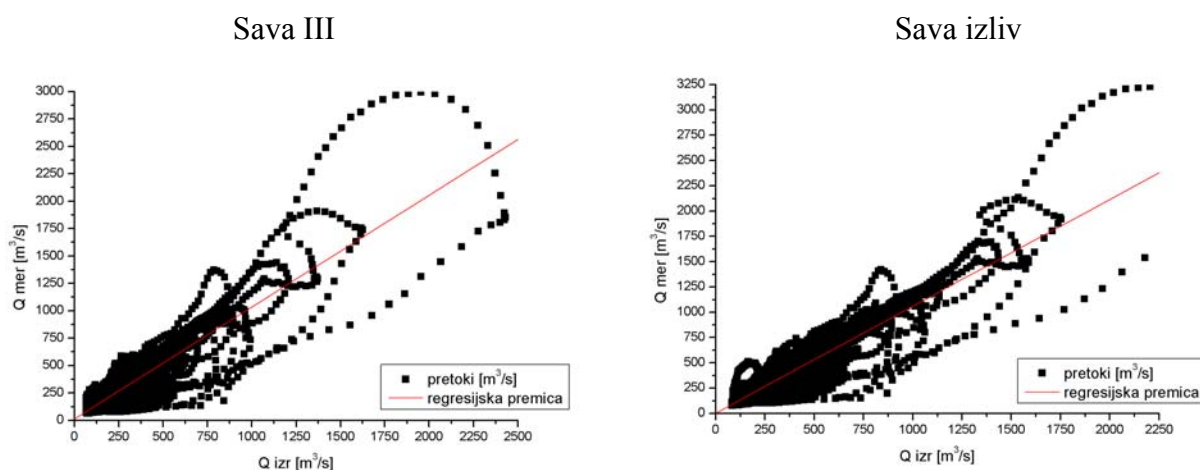


## (s) Sava izliv



Slika 41 (a) - (s): Primerjava izračunanih in opazovanih pretokov za obdobje mar.-jun. 1999 za posamezna podpovodja (vodomerne postaje) po procesu kalibracije.





Slika 42: Primerjava merjenih in izračunanih pretokov modela z urnimi podatki.

Preglednica 10: Rezultati kalibracije modela z urnimi vrednostmi za izbrana podpovodja za obdobje 1998 – 1999.

Ime podpovodja	Korelacijski koeficient $R$	Standardna deviacija $SD$	Enačba regresijske premice
Sava I	0.84436	45.49121	$Y = 5.57819 + 0.98786 \cdot X$
Sava II	0.94404	46.10743	$Y = -13.94464 + 1.13627 \cdot X$
Sava III	0.91128	81.2962	$Y = 14.22572 + 1.02 \cdot X$
Sava izliv	0.93051	86.92516	$Y = 3.68012 + 1.05583 \cdot X$

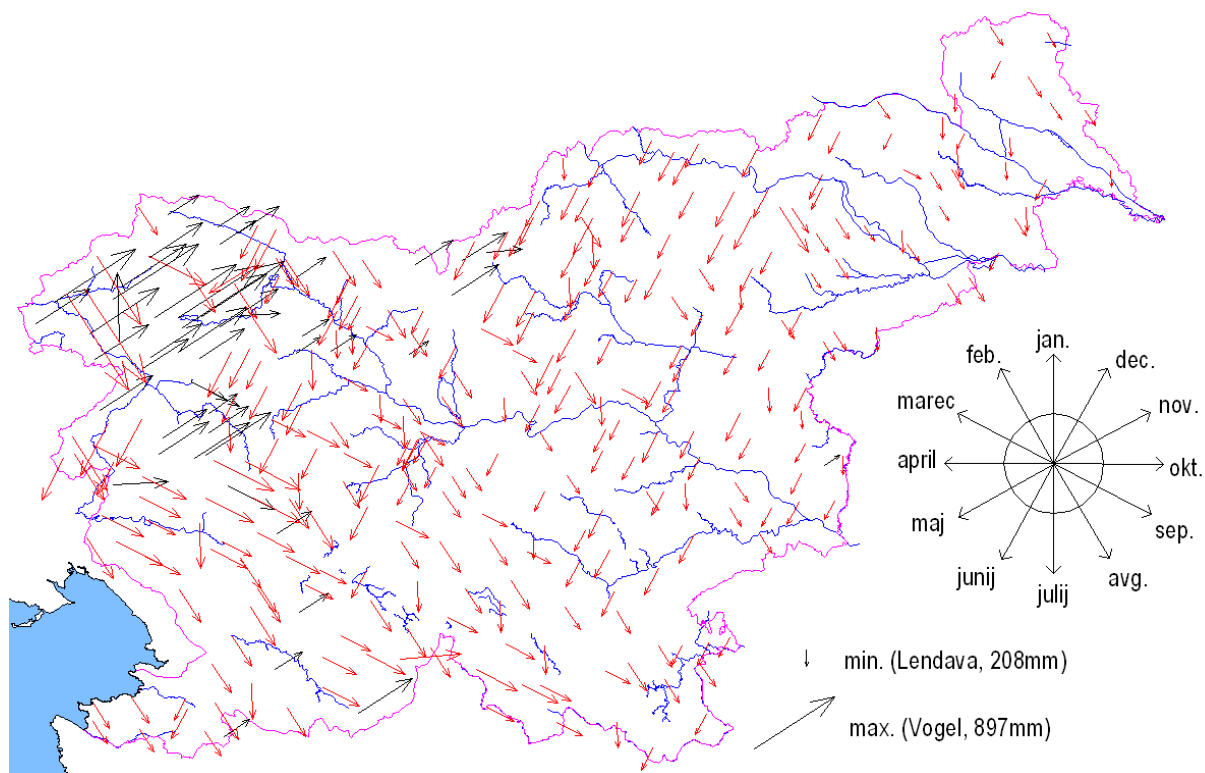
Standardna deviacija  $SD$  je definirana po enačbi (21) regresijska premica pa po enačbi (20).

## 5 RAČUN PRETOKOV MAKSIMALNIH PADAVINSKIH SCENARIJEV

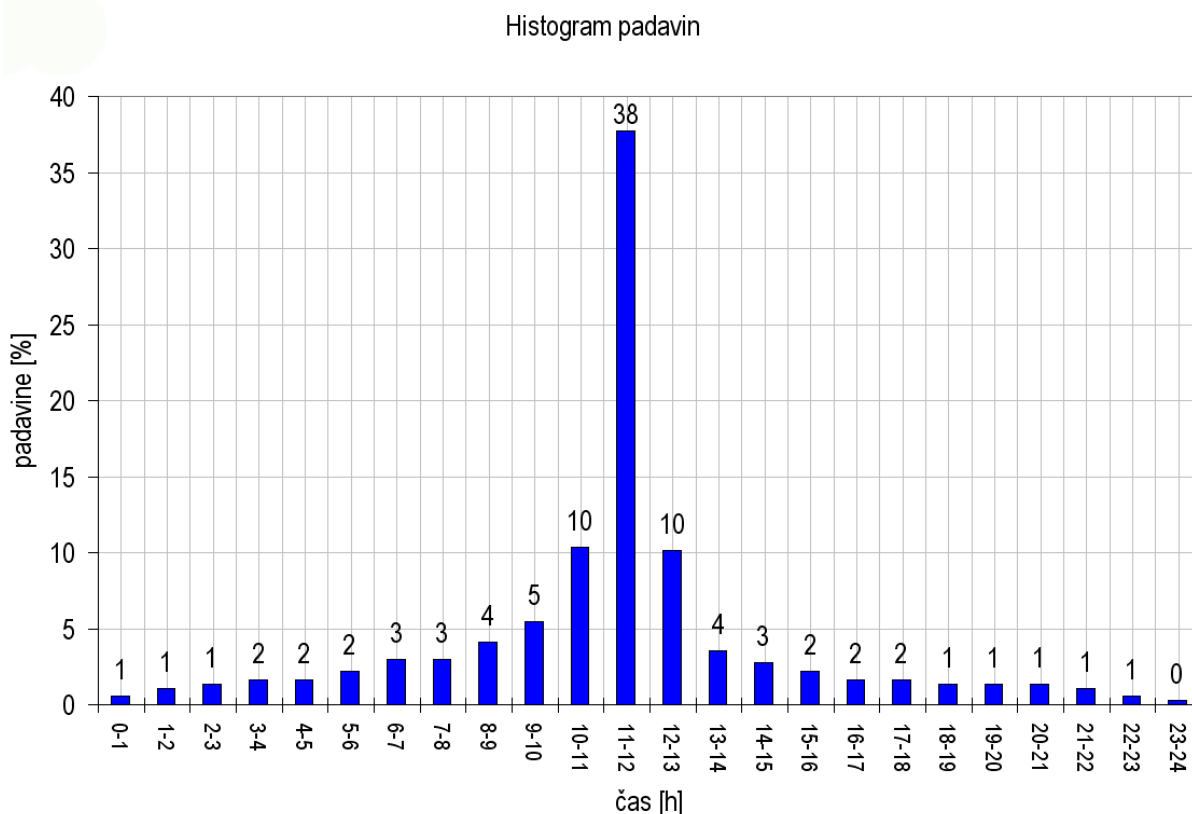
### 5.1 Padavine

Za simuliranje največjih pretokov po različnih scenarijih je bil uporabljen HBV model z urnimi podatki. Rezultati HBV modela z dnevnimi podatki imajo v primeru nekaj dnevnih padavinskih scenarijev namreč preslabo časovno ločljivost.

Slika 43 prikazuje 24-urne verjetne največje padavine (VNP), posredovane s strani meteorologov z Agencije Republike Slovenije za okolje, ki so bile nadalje uporabljene za izračun urnih vrednosti. Izračun urnih vrednosti VNP je potekal preko histograma padavin (Brilly, 1993), ki je prikazan na sliki 44.



Slika 43: 24-urne VNP.



Slika 44: Histogram padavin za preračun 24-urnih VNP na urne.

Dobljene urne vrednosti predstavljajo izhodišče pri oblikovanju različnih padavinskih scenarijev. V naslednjih poglavjih je opisanih več scenarijev, ki upoštevajo različne možne naravne pojave in njihove kombinacije.

## 5.2 Pomladanski in jesenski maksimalni padavinski scenarij

Izdelana padavinska scenarija pomladanskega in jesenskega deževja, upoštevata največje verjetne padavine junija, julija in avgusta za pomladanski scenarij ter največje verjetne padavine oktobra in novembra za jesenski scenarij.

## 5.3 Maksimalni padavinski scenarij

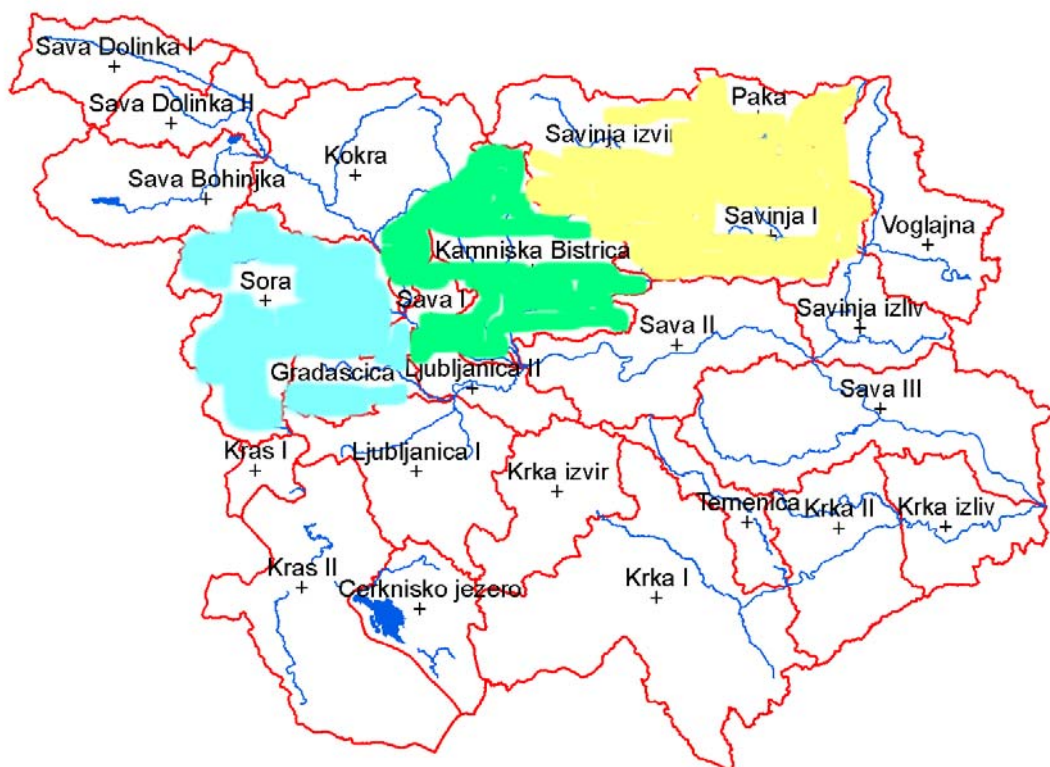
Ta padavinski scenarij povzame največje verjetne padavine na vseh postajah ne glede na mesec pojavnosti. Scenarij poleg tega še upošteva, da VNP padejo na suha tla in da istočasno zajamejo vsa podpovodja.

#### 5.4 Scenarija ujme na območju Z Slovenije

Oblikovana padavinska scenarija simulirata lokalni dogodek v Z delu Slovenije.

Prvi padavinski scenarij je oblikovan tako, da so na območju ujme vrednosti VNP 100%, medtem ko je ostalim padavinskim postajam pripisana 60% vrednost VNP.

V drugem padavinskem scenariju je uporabljena različna časovna porazdelitev padavin (potovanje ujme s hitrostjo 60km/h). Ujma se oblikuje nad Davčo, nato pa se pomika proti V delu Slovenije. Pri oblikovanju teh dveh scenarijev je bilo uporabljeno poročilo ARSO o septembrski ujmi (ARSO, 2007).



Slika 45: Potovanje ujme.

Na sliki 45 obarvana podpovodja predstavljajo območje ujme. Območje, nad katerim se ujma oblikuje je obarvano modro, območje kamor se ujma pomakne v prvi uri, je obarvano zeleno, rumeno pa je obarvano območje, kamor se ujma pomakne v drugi uri.

### **5.5 Padavinski scenariji s predhodnimi padavinami in vmesnimi sušnimi obdobji**

Za te scenarije velja, da manjšim predhodnim padavinam, ki namočijo tla, sledijo sušna obdobja, nakar padejo VNP. Dva taka scenarija sta povzeta po agenciji FEMA (FEMA, 2001).

Prvi padavinski scenarij upošteva, da najprej pade 30% VNP, sledijo trije sušni dnevi, nato pa pade 100% VNP.

Drugi padavinski scenarij pa upošteva, da najprej pade 39% VNP, sledi pet sušnih dni, nato pa pade 100% VNP.

Tema dvema padavinskima scenarijema je dodan še tretji, po katerem najprej pade 20% VNP, sledi en sušni dan, nato pa pade 100% VNP.

Vsi trije padavinski scenariji so izračunani za VNP in spomladanske padavine, kajti te so se v simulacijah izkazale za bolj kritične kot jesenske. Padavinski scenariji s predhodnimi padavinami in vmesnimi sušnimi obdobji dajo višje pretoke, kar je posledica namočenosti tal, ki jo povzročijo predhodne padavine.

### **5.6 Padavinski scenarij po Dingmanu**

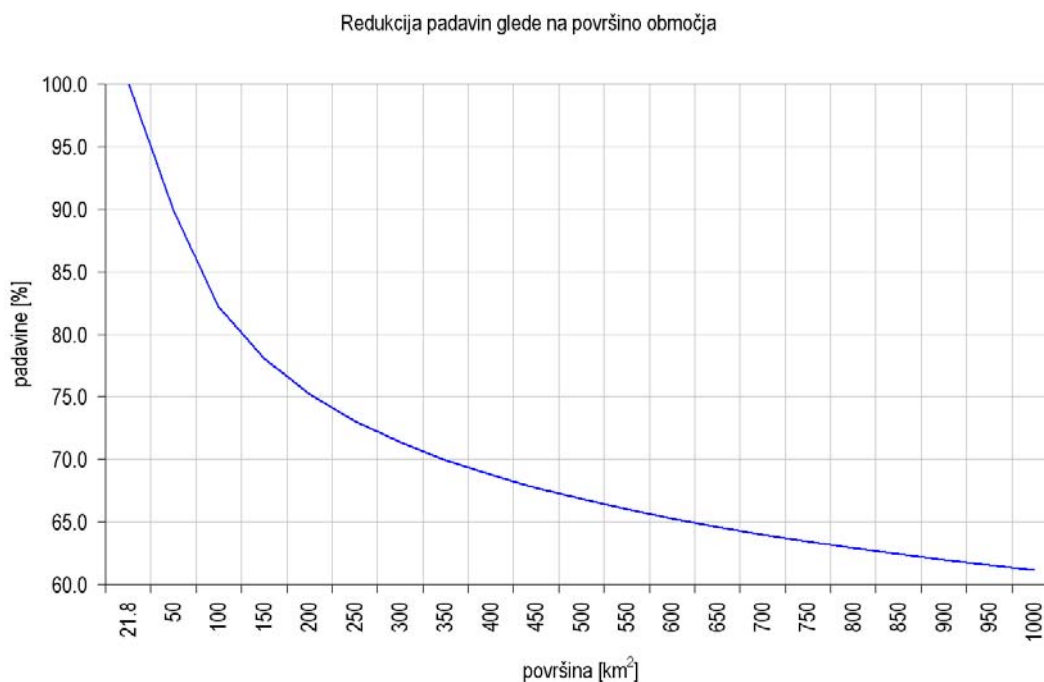
Pri tem padavinskem scenariju so 24-urne padavine izračunane po enačbi ovojnice največjih izmerjenih padavin na zemlji, v odvisnosti od trajanja:  $P = 422 \cdot T_d^{0.475}$ . Padavine, izračunane po tej enačbi močno presegajo 24-urne VNP, kajti izračunana največja 24-urna višina padavin znaša kar 1909 mm. Urne vrednosti padavin za ta scenarij so bile tudi v tem primeru izračunane preko histograma padavin (Brilly, 1993), ki je prikazan na sliki 44.

Padavinski dogodek, kjer bi v nekem kraju v Sloveniji padlo v enem dnevu preko 1900 mm padavin, seveda ni mogoč. Scenarij je dodan le zaradi prikaza sicer mogočega ekstremnega padavinskega dogodka na zemlji in pretokov, ki bi jih ta padavinski dogodek povzročil, če bi se pojavil na porečju reke Save.



## 5.7 Padavinski scenarij VNP z redukcijo

Ta padavinski scenarij upošteva redukcijo padavin. Pri tem so VNP preračunane glede na površino območja v katerem se pojavijo. Za območje Slovenije, ki ustreza območju ujme iz poglavja 5.4 so podane 100% VNP, za območje severno od ujme so glede na površino podane 77% VNP, za območje južno od ujme pa 67% VNP (slika 46), (WMO, 1986).



Slika 46: Krivulja redukcije padavin glede na velikost območja (WMO, 1986).

## 5.8 Padavinska scenarija kombinacije VNP in snega

Med padavinske scenarije s kombinacijo različnih dogodkov, spada kombinirani vpliv snežne odeje, padavin, temperatur in vetra.

Sneg ob taljenju odda velike količine vode, zaradi tega je ključni parameter scenarija, medtem, ko je vpliv vetra na obravnavanem območju zanemarljiv in ni upoštevan v scenariju. Potek padavinskega scenarija: snežna odeja, ki se je preko zime nalagala, se pomladi zaradi visokih temperatur začne taliti, hkrati pa se pojavijo še padavine. Pri prvem kombiniranem padavinskem scenariju so uporabljene pomladne VNP (glej poglavje 5.2), pri drugem pa reducirane pomladne VNP (glej poglavje 5.7).

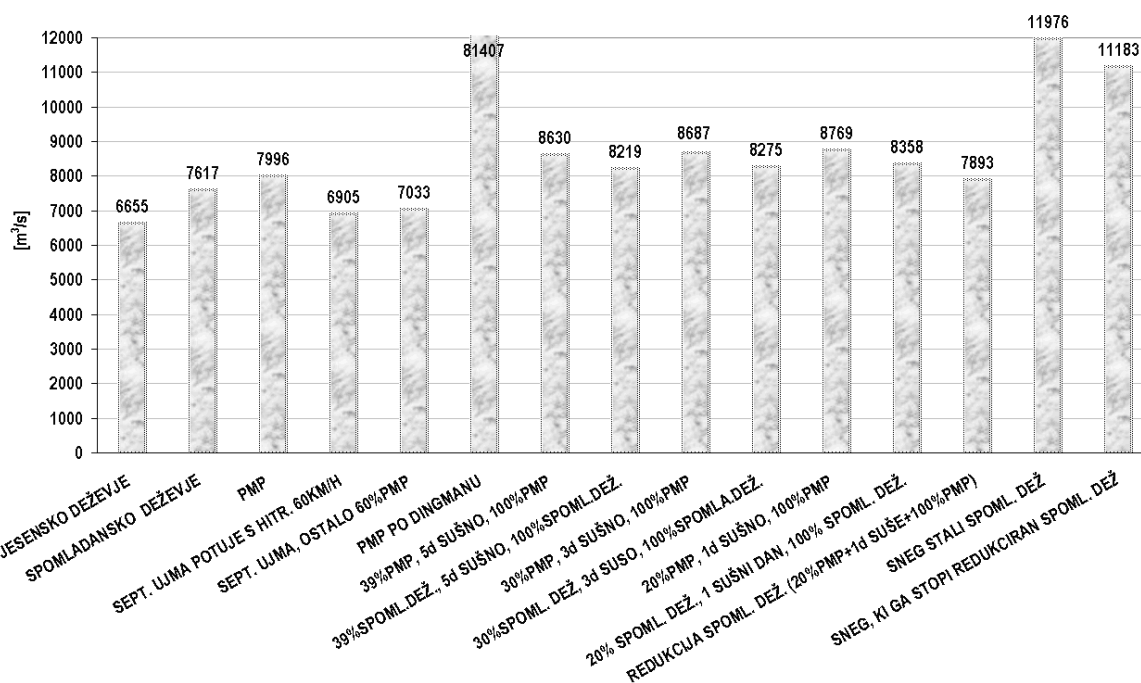
Višina snežne odeje (vodni ekvivalent), ki je bila uporabljena v obeh scenarijih je podana v preglednici 11.

Preglednica 11: Začetna višina snežne odeje v obeh padavinskih scenarijih s snegom.

Elevacijska cona	Višina snežne odeje [m]	Vodni ekvivalent [mm]
0-500	1	300
500-1000	2.2	770
1000-1500	3.4	1360
1500-2000	4.6	2070
Nad 2000	6	3000

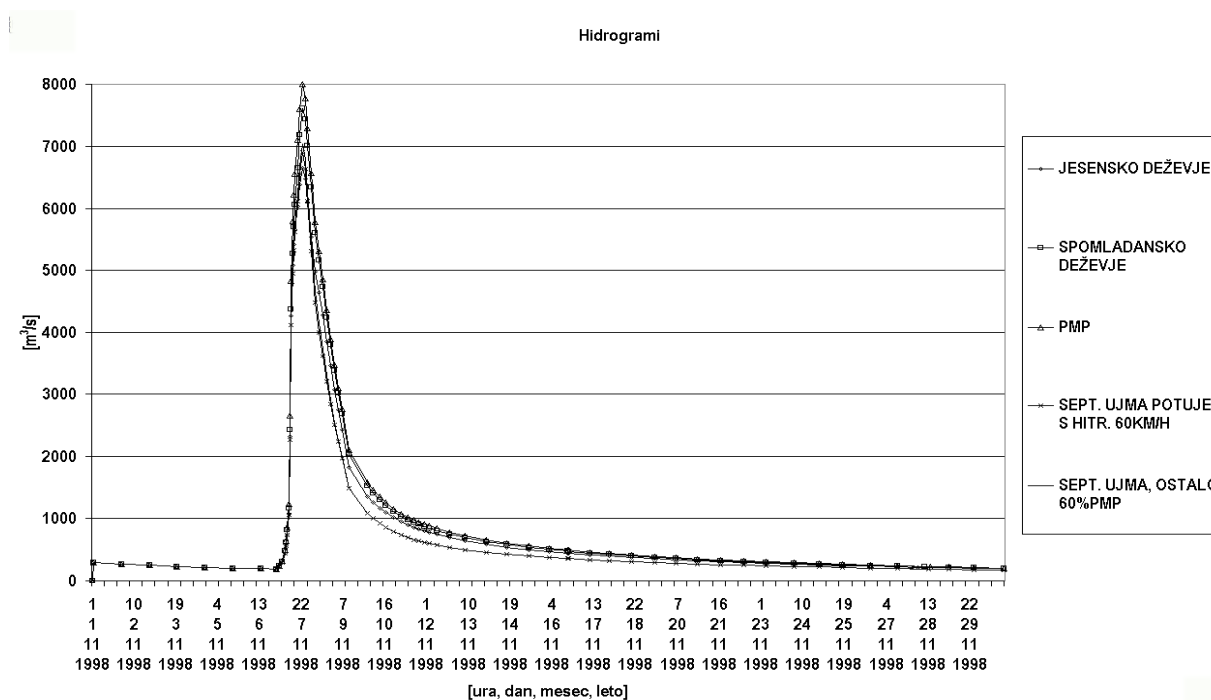
## 5.9 Rezultati padavinskih scenarijev in komentar

Rezultati posameznih padavinskih scenarijev, ki so bili izračunani z urnim HBV modelom, so za iztok s podpovodja Sava III (pred sotočjem s Krko) prikazani na slikah 47, 48, 49, 50 in 51. Na sliki 47 so v stolpičih prikazane vrednosti maksimalnih pretokov, na slikah 48, 49 in 50 pa hidrogrami.



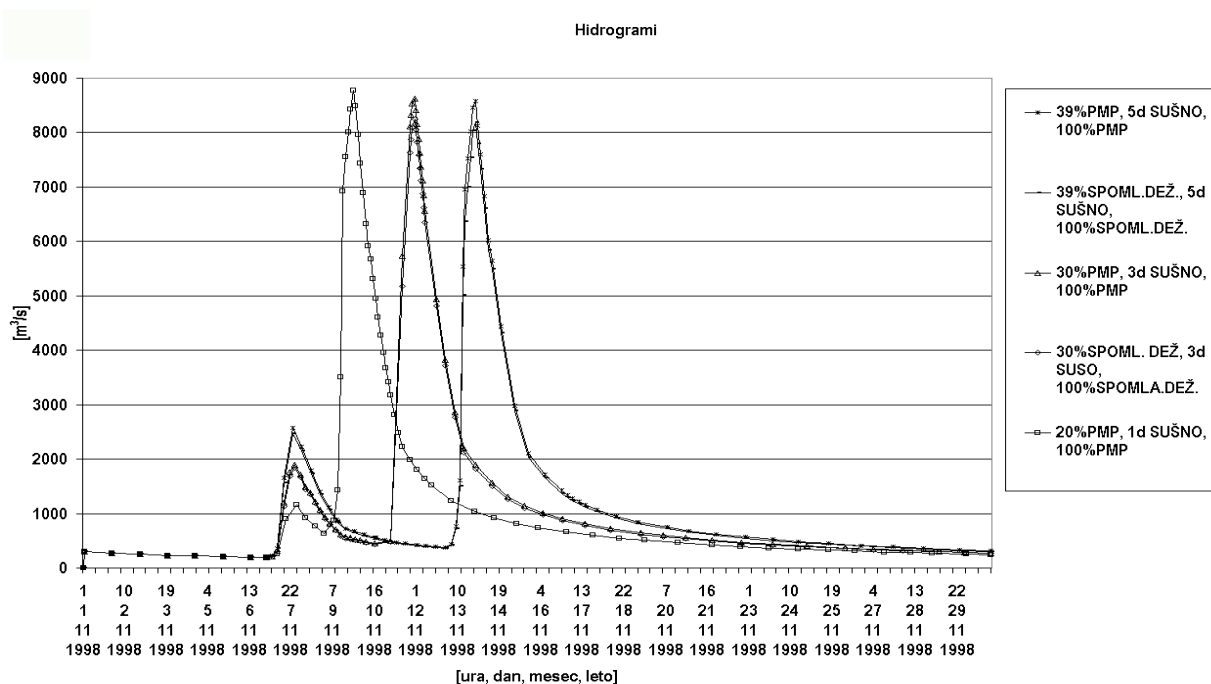
Slika 47: Pregled maksimalnih vrednosti pretokov glede na različne scenarije (PMP = VNP).

Po pregledu rezultatov je bilo ugotovljeno, da varianta pomladanskih VNP doseže večje pretoke, zato je bila ta tudi uporabljena v večini scenarijev. Največja vrednost pomladanskih padavin prikazana na sliki 47, je sicer nižja od jesenske najvišje vrednosti, vendar je v povprečju v spomladanskem obdobju verjetna večja količina 24-urnih padavin. Glede na splošno višje vrednosti padavin, so se pomladanski pojavi poplav pokazali kot bolj nevarni od jesenskih, zato so te padavine tudi uporabljene pri nadaljnjih izračunih.



Slika 48: Hidrogrami rezultatov začetnih variant (sezonske, maksimalne, varianta ujme).

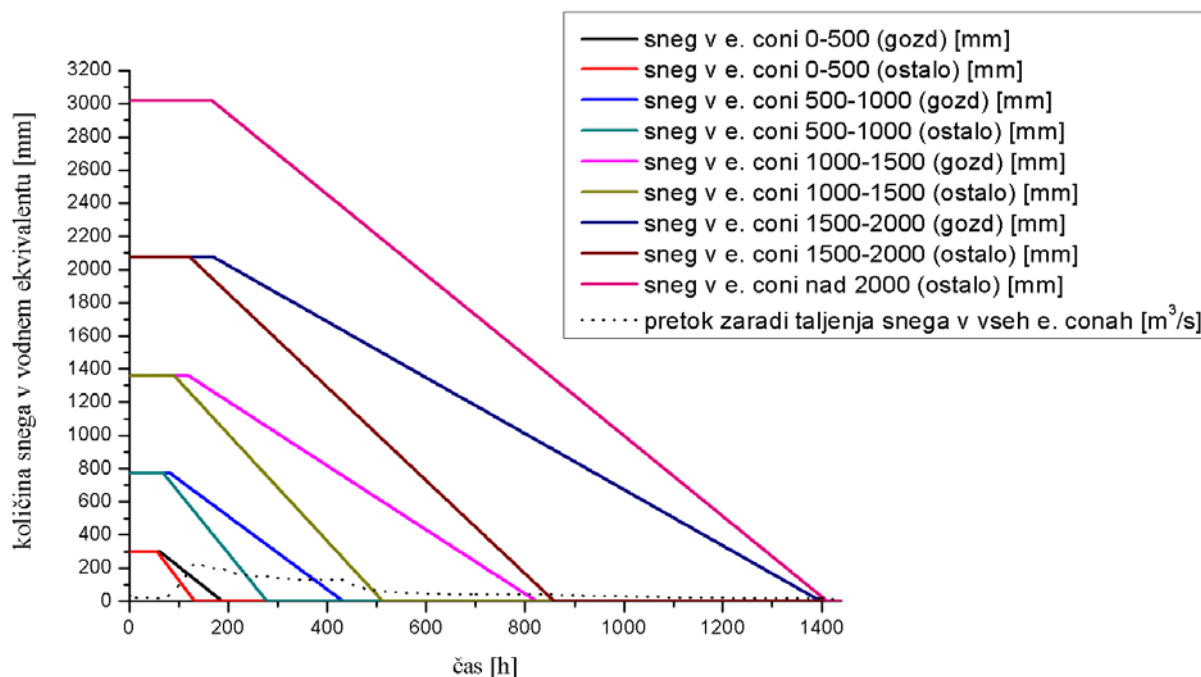
Pri scenarijih s predhodno namočenostjo, to so scenariji, kjer padavine padejo na mokra tla, (glej poglavje 5.4) je bilo ugotovljeno, da so bolj nevarni pojavi padavin s čim manjšim presledkom pred VNP dogodkom. Vzrok leži v sorazmerno hitri koncentraciji površinskega odtoka v porečju.



Slika 49: Hidrogrami rezultatov variant s predhodnimi padavinami (d v legendi pomeni dan).

Scenarija z vplivom taljenja snega bi po predvidevanjih morala dati največje pretoke. V prvi varianti je bilo upoštevano pomladansko deževje, v drugi pa še reducirano pomladansko deževje. Pri drugi varianti so bili pričakovani pretoki nekoliko manjši, a bolj realni (slika 50). Vsi padavinski scenariji, predvsem pa variante s snegom, so bile izdelane postopoma na podlagi dobljenih rezultatov iz prejšnjih scenarijev. Največje vrednosti pretokov so bile dobljene v kombinaciji s snegom in to tako, da se pred dogodkom pojavi vrsta toplih dni, nato šele VNP. Vrednosti maksimalnih pretokov dobljenih na tak način, so presegli pojave brez snega za okrog 30%.





Slika 51: Taljenje snega v podpovodju Kamniška Bistrica po posameznih elevacijskih conah.

Vrednosti maksimalnega pretoka, izračunane po različnih scenarijih, se gibljejo od 6000 do 12000 m<sup>3</sup>/s oziroma do 81000 m<sup>3</sup>/s, če upoštevamo padavinski scenarij po Dingmanu. Padavinski scenariji z upoštevanjem tajanja snega glede na pretoke, z izjemo scenarija po Dingmanu, presegajo ostale scenarije.

## 6 ZAKLJUČKI IN SKLEPI

Hidrološki modeli so v primerjavi z verjetnostnimi analizami učinkovitejše sredstvo za napovedovanje odtoka. Modelov za napovedovanje odtoka je veliko, razvijajo pa se tudi novi, vedno bolj kompleksni modeli s prostorsko razporejenimi parametri. Hidrološki modeli so, ne glede na vrsto modela, občutljivi na padavine, ki so glavni vhodni podatek v modele padavine-odtok. Modeli dajejo običajno večja odstopanja v odtokih na manjših podpovodjih, na večjih podpovodjih so odstopanja manjša, kar je bilo ugotovljeno tudi na porečju reke Save.

Hidrološki modeli so učinkovito sredstvo za napovedovanje odtoka le, če so vhodni podatki o padavinah točni in zanesljivi. V tem primeru so napovedi odtoka obremenjene le z napako modela, ki je rezultat neoptimalne določitve parametrov modela in poenostavljene strukture modela.

Ploskovna ocena padavin je, kot je razvidno iz diplomske naloge, odvisna od števila padavinskih postaj, ki jih vključimo v model. V model porečja reke Save z dnevnim časovnim korakom je bilo vključenih 53 merilnih mest padavin, kar je omogočilo dokaj dobro kalibracijo modela. Za porečje reke Save z urnim časovnim korakom, pa je bilo vključenih le 16 ombrografskih postaj. V povprečju znese to manj kot en ombrograf na vsako podpovodje, kar ob kratkem časovnem koraku ni dovolj za točno oceno ploskovnih padavin in zadovoljivo umerjanje modela.

Poleg ploskovne ocene padavin ima močan vpliv na meteorološko dogajanje v porečju tudi topografija povodja, zlasti v S delu porečja, kjer je relief močno razgiban.

Glede na prikazane rezultate umerjanja obeh modelov porečja, je za simulacijo odtoka bolj primeren model s časovnim korakom ene ure. Model s časovnim korakom enega dneva je primeren predvsem za dopolnjevanje manjkajočih nizov padavin navadnih padavinskih postaj. Na velikost odtoka s porečja Save poleg količine padavin odločilno vpliva tudi predhodna vlažnost tal, kar je bilo dokazano s simulacijo padavinskih scenarijev s predhodnimi padavinami in vmesnimi sušnimi obdobji. Infiltracija padavin v tla znatno prispeva k manjšemu odtoku tudi v jeseni, ko vegetacija in evapotranspiracija nimata velikega vpliva na odtok, če padejo padavine na suha tla z nizko predhodno vlažnostjo.

Model HBV se je v splošnem pokazal kot zelo dobro orodje za simulacijo površinskega odtoka v porečju reke Save. Omogoča enostavno modeliranje vseh pomembnih hidroloških pojavov, vključno s kopičenjem in tajanjem snega. Za povečanje natančnosti je v model mogoče vključiti tudi dodatna merilna mesta padavin, vendar je v tem primeru potrebno model vsaj do določene mere ponovno umerjati.



**VIRI:**

Ančik, A., Arih, A., Bat, M., et al. 2006. Kazalci okolja 2005. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje: 242 str.

ARSO, 2007. Poročilo o vremenski in hidrološki situaciji 18. septembra 2007. Ljubljana, Ministrstvo okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje: 23 str.

ARSO.

<http://www.arso.gov.si/vreme/o%20meritvah/> (10.11.2007).

Atlas Slovenije, 1985. Ljubljana, Geodetski zavod Republike Slovenije, Mladinska knjiga: 366 str.

Bergström, S. 2002. The HBV story in Sweden. Sweden, Norrköping, Swedish Meteorological and Hydrological Institute: 4 str.

Brilly, M. 1999. Razvoj sodobnih hidroloških modelov. Ljubljana, Zbornik referatov 18. Goljevščkovega spominskega dne. Acta hydrotechnica 17/26: 31-44.

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.

Brilly, M., Šraj, M. 2000. Osnove hidrologije. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 234 str.

De Roo, A.P.J., Wesseling, C.G., Van Deursen, W.P.A. 2000. Physically-based river basin modeling within a GIS: The LISFLOOD model. Hydrological Processes. Vol. 14: 1981-1992.  
[http://www.geocomputation.org/1998/06/gc\\_06.htm](http://www.geocomputation.org/1998/06/gc_06.htm) (03.11.2007).

Edijatno, Nascimento, N.O., Yang, X., Makhlof, Z. and Michel, C. 1999. GR3J: a daily watershed model with three free parameters. Hydrological Sciences Journal, 44(2): 263-278.

Harlin, J. 1991. Development of a process oriented calibration scheme for the HBV hydrological model. *Nordic Hydrol.*, 22: 15-36.

Holmqvist, U. 2003. Calibration hints – EFFS-NAS. Sweden, Norrköping, Swedish Meteorological and Hydrological Institute: 4 str.

Hydrologic Research Needs for Dam Safety, FEMA Workshop Proceedings, 2001. ZDA, California, Davis, Federal Emergency Management Agency: 189 str.

IHMS. 1999. Integrated Hydrological Modelling System. Manual, Version 4.5., Norrköping, Sweden, Swedish Meteorological and Hydrological Institute.

Isaie, D., 2007. Hydrological measurements and modeling - 2nd year Internship REA (2006-2007). France, Grenoble, Polytechnic Institute of Grenoble, Department of Hydraulics and the Environment: 69 str.

Kobold, M. 2004. IHMS-HBV 96 navodila za operativno delo. Ljubljana, Hidrometeorološki zavod Republike Slovenije: 7 str.

Kobold, M. 2007. Vpliv napake ocene padavin na napako napovedi odtoka pri napovedovanju poplav. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 139 str.

Kobold, M., Zgonc, A., Sušnik, M. 2007. Nezanesljivost padavinskih meritev in napovedi pri modeliranju hudourniških poplav = Uncertainty of precipitation measurements and predictions in flash flood modeling. *Acta hydrotechnica* 23, 39.  
<http://ksh.fgg.uni-lj.si/ksh/acta/> (07. 05. 2007).

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

Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., Bergström, S. 1997. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology* 201: 272-288.

Mathevet, T., Michel, C., Perrin, C., Andreassian, V. 2004. Experimental design of a lumped rainfall-runoff model dedicated to the hourly time-step. Macedonia, Ohrid, BALWOIS Conference on water observation and information system for decision support, Abstracts: 394-395.

Mikoš, M., Krajnc, A., Maticič, B., Müller, J., Rakovec, J., Roš, M., Brilly, M. 2003. Hidrološko izrazje = Terminology in hydrology. *Acta hydrotechnica* 20, 32.  
<http://ksh.fgg.uni-lj.si/ksh/acta/> (15. 04. 2004).

Mikoš, M. 2007. Vsak konec Slovenije ima svoj poplavni čas. *Delo*, četrtek, 11. Oktober 2007.

Rajar, R., 1980. Hidravlika nestalnega toka. Učbenik, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.

Reihan, A., Kovalenko, O. 2000. Experience of an application of the HBV model for runoff computation in Estonia. *Proceedings of the Symposium dedicated to the 40th Anniversary of Institute of the Environmental Engineering at Tallinn Technical University*: 126-134.

Rodda, J.C. and Rodda, H.J.E., 1999. Hydrological forecasting. Dealing with Natural Disasters: Achievements and new challenges in Science, London Technology and Engineering, Proceedings, The Royal Society: 75-99.

Seibert, J. 1999. Conceptual runoff models – fiction or representation of reality? *Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology* 436, Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala.

Wood, S.J., Jones, D.A. and Moore, R.J., 2000. Accuracy of rainfall measurement for scales of hydrological interest. *Hydrology and Earth system Sciences*, 4(4): 531-543.

## PRILOGA A : PARAMETRI MODELA HBV-96

Parameter	Pomen	Začetna vrednost	Interval
PCORR	temperaturni prag	1	
PCALT	višinski korekcijski faktor za padavine	0.1	
TCALT	temperaturni gradient (°C/100m)	0.6	
<b>RFCF</b>	<b>korekcijski faktor za dež</b>	<b>1</b>	<b>0.9-1.3</b>
<b>SFCF</b>	<b>korekcijski faktor za sneg</b>	<b>1</b>	<b>0.8-1.4</b>
FOSFCF	faktor, s katerim se pomnoži SFCF za območja z gozdom	0.8	
CFMAX	faktor taljenja snega (mm/°C/dan)	3.5	2-4.5
FOCFMAX	faktor, s katerim se pomnoži CFMAX za območja z gozdom	0.6	
<b>TT</b>	<b>temperaturni prag (°C), pod katerim se predpostavi, da so padavine snežne</b>	<b>0</b>	<b>-2°-2°</b>
<b>DTTM</b>	<b>vrednost, ki se doda TT zaradi območja taljenja snega (°C)</b>	<b>0</b>	<b>-2°-2°</b>
<b>TTINT</b>	<b>temperaturni interval, v katerem so padavine kot mešanica dežja in snega (°C)</b>	<b>2</b>	<b>0-2.5</b>
GMELT	Faktor taljenja ledenika (mm/°C/dan)	4	
CFR	faktor zmrzovanja	0.05	
WHC	kapaciteta vode v snegu	0.1	
SFDISTFO	porazdelitev snega v gozdnih conah	0.2	0-1
SFDISTFI	porazdelitev snega v negozdnih conah	0.5	0-1
SCLASS	število razredov s snegom	3	
<b>FC</b>	<b>kapaciteta tal (mm)</b>	<b>150</b>	<b>100-300</b>
<b>LP</b>	<b>zgornja meja potencialne evaporacije</b>	<b>1</b>	<b>0.5-1</b>
<b>BETA</b>	<b>eksponent v enačbi za računanje odtoka vode iz tal</b>	<b>1</b>	<b>1-4</b>
<b>CFLUX</b>	<b>maksimalni kapilarni tok (mm/dan)</b>	<b>0</b>	<b>0-2</b>
CEVPFO	korekcijski faktor za potencialno evaporacijo v gozdnih območjih	1.15	
<b>K4</b>	<b>recesijski koeficient za spodnji rezervoar</b>	<b>0.01</b>	<b>0.001-0.1</b>
<b>PERC</b>	<b>kapaciteta pronicanja (mm/dan)</b>	<b>0.5</b>	<b>0.01-6</b>
<b>KHQ</b>	<b>recesijski koeficient za zgornji rezervoar</b>	<b>0.09</b>	<b>0.005-0.5</b>
<b>HQ</b>	<b>vrednost pretoka pri KHQ</b>	<b>Se izračuna po enačbi 10</b>	
<b>ALFA</b>	<b>recesijski parameter</b>	<b>0.9</b>	<b>0.5-1.1</b>
<b>MAXBAS</b>	<b>število dni v transformacijski funkciji</b>	<b>1</b>	<b>1-5</b>
RECSTEP	število računskih korakov	999	

Parametri, označeni krepko so potrebni umerjanja. Vrednosti v preglednici so dane kot začetne vrednosti. Parametri se v modelu umerjajo po naslednjem vrstnem redu:

1. volumen: SFCF in RFCF
2. taljenje snega in akumulacija: TT, DTTM, TTINT in CFMAX
3. vlaga v tleh: FC, LP, BETA in CFLUX
4. oblika hidrograma: KHQ, HQ, ALFA, K4, PERC in MAXBAS

## PRILOGA B: SEZNAM IZHODNIH SPREMENLJIVK MODELA HBV-96

Izhodna spremenljivka	Pomen
prec	ploskovne padavine brez korekcije z nadmorsko višino (mm)
temp	povprečna temperatura brez korekcije z nadmorsko višino (°C)
cprec	ploskovne padavine korigirane z nadmorsko višino (mm)
ctemp	povprečna temperatura korigirana z nadmorsko višino (°C)
pcorr	korekcija padavin
tcorr	korekcija temperatura
humid	relativna vlažnost zraka (ulomek od 1)
sp	zmrznjeni del snežne odeje (mm)
wc	vsebnost tekoče vode v snežni odeji (mm)
snow	celotna vsebnost vode v snežni odeji (mm)
snowcor	delež povodja, pokrit s snegom
insoil	dotok iz snega v tla (mm)
cmelt	staljeni sneg (mm)
ic	prestrežene zaloge (mm)
sm	vlaga v tleh (mm)
rc	koeficient odtoka
evap	dejanska evapotranspiracija (mm)
uz	vsebina zgornjega odzivnega rezervoarja (mm)
lz	vsebina spodnjega odzivnega rezervoarja (mm)
outuz	iztok iz zgornjega odzivnega rezervoarja (mm)
perc	pronicanje iz zgornjega v spodnji rezervoar (mm)
outlz	iztok iz spodnjega odzivnega rezervoarja (mm)
qcloc	izračunani pretok za podpovodje (m <sup>3</sup> /s)
qrloc	lokalni opazovani pretok (m <sup>3</sup> /s)
accdloc	lokalna akumulirana razlika (mm)
qcount	celoten izračunani pretok (m <sup>3</sup> /s)
qrout	celoten opazovani pretok (m <sup>3</sup> /s)
accdout	skupna razlika pretokov (mm)