

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Kotar, A., 2013. Vpliv podnebnih sprememb na visoke pretoke Vipave. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Brilly, M., somentor Vidmar, A.): 75 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



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

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

This is original version of final thesis.

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

Kotar, A., 2013. Vpliv podnebnih sprememb na visoke pretoke Vipave. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Brilly, M., co-supervisor Vidmar, A.): 75 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
HIDROTEHNIČNA SMER

Kandidatka:

ANJA KOTAR

**VPLIV PODNEBNIH SPREMEMB NA VISOKE
PRETOKE VIPAVE**

Diplomska naloga št.: 3357/HS

**CLIMATE CHANGE IMPACT ON HIGH FLOWS OF
VIPAVA RIVER**

Graduation thesis No.: 3357/HS

Mentor:

prof. dr. Mitja Brilly

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:

mag. Andrej Vidmar

Član komisije:

doc. dr. Andrej Kryžanowski

doc. dr. Simon Schnabl

Ljubljana, 19. 12. 2013

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako:

Vrstica z napako:

Namesto:

Naj bo:

IZJAVE

Podpisana Anja Kotar izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom »Vpliv podnebnih sprememb na visoke pretoke Vipave«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 1. 12. 2013

Anja Kotar

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	556.16(497.4)(043.2)
Avtor:	Anja Kotar
Mentor:	prof. dr. Mitja Brilly
Somentor:	mag. Andrej Vidmar
Naslov:	Vpliv podnebnih sprememb na visoke pretoke Vipave
Tip dokumenta:	diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	75 str., 26 pregl., 41 sl., 46 en., 3 pril.
Ključne besede:	površinski odtok, HBV model, PEST, kalibracija, porečje Vipave, vpliv podnebnih sprememb

Izvleček

V Sloveniji zaradi podnebnih sprememb v prihodnosti pričakujemo večje količine padavin v jesenskem času in posledično večji površinski odtok oziroma višje poplavne konice. Primerno orodje za simulacijo površinskega odtoka s povodij so hidrološki modeli. Pomembni fazi hidrološkega modeliranja sta kalibracija in validacija, če sta ustrezno izvedeni, lahko model uporabimo za simulacijo odtoka pri spremenjenih razmerah. V okviru diplomske naloge smo izdelali model porečja Vipave ter ovrednotili vpliv podnebnih sprememb na visoke pretoke v spodnjem toku reke.

V teoretičnem delu diplomske naloge je opisan konceptualni model za računanje površinskega odtoka HBV-light, njegovi parametri ter računski postopki, na katerih temelji. Podrobneje je opisano tudi delovanje programa za ocenjevanje parametrov PEST, ki se uporablja za avtomatizirano kalibracijo veliko vrst modelov.

V praktičnem delu smo model HBV-light implementirali na porečje reke Vipave, katerega smo razdelili na 7 podpovodij. Osnovni model je imel dnevni časovni korak, kalibracija pa je bila izvedena avtomatizirano s programom PEST na podlagi podatkov med leti 2005 in 2008. Osnovni model je bil preoblikovan v model z urnim časovnim korakom, ki pa je bil zaradi slabe simulacije pretokov v oktobru 2012 ponovno umerjen. Dva izmed izdelanih modelov smo uporabili za simulacijo vpliva podnebnih sprememb, ki smo jih upoštevali v obliki povečane količine padavin v jesenskem času. Obravnavali smo padavine z 20- in 100-letno povratno dobo, ki so napovedane za obdobja med leti 2011–2040, 2041–2070 ter 2071–2100. Skupaj z današnjim stanjem smo tako simulirali 8 scenarijev in analizirali povečanje maksimalnih simuliranih pretokov na iztoku iz porečja Vipave. S pomočjo verjetnostne analize smo določili tudi povečanje pretokov s 100-letno povratno dobo.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 556.16(497.4)(043.2)
Author: Anja Kotar
Supervisor: Prof. Mitja Brilly, Ph.D.
Cosupervisor: Andrej Vidmar, M.Sc.
Title: Climate change impact on high flows of Vipava river
Document type: Graduation Thesis – University studies
Scope and tools: 75 p., 26 tab., 41 fig., 46 eq., 3 ann.
Key words: Runoff, HBV model, PEST, calibration, Vipava river basin, climate change impact

Abstract

Due to climate change in Slovenia we expect greater autumn rainfall in the future which will consequently lead to higher flood peaks. Runoff from catchments can be simulated with hydrological models. Important phases of hydrological modeling are calibration and validation. If performed properly, the model can be used to simulate runoff under changed circumstances. In the graduation thesis a model of the Vipava river basin was used to evaluate the climate change impact on high flows in the lower reach of Vipava river.

The theoretical part of thesis contains a description of HBV-light, a conceptual hydrological model for continuous calculation of runoff. HBV-light can be coupled with parameter estimation program PEST, which can be used for automatic calibration of many types of models. The workings and mathematical foundation of PEST are also presented.

In the practical part we implemented the HBV-light model on the Vipava river basin, which was divided into seven subbasins. The basic model had a daily time step and the calibration was carried out automatically by PEST parameter estimation routine using the data between years 2005 and 2008. The basic model was transformed into a model with an hourly time step but it was re-calibrated due to poor performance in October 2012. Two of the constructed models were used to simulate the climate change impact on the runoff. We have taken into account the increased amounts of autumn rainfall with 20- and 100-years return period which are predicted for three periods: 2011–2040, 2041–2070 and 2071–2100. Along with today's situation we simulated 8 scenarios and analyze the increase of the maximum simulated flow at the outlet of the Vipava basin. We also determined the increase of the discharge with 100-year return period according to the probabilistic analysis.

ZAHVALA

Za pomoč in usmerjanje pri izdelavi diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Mitji Brillyju ter somentorju mag. Andreju Vidmarju.

Prav tako se zahvaljujem Agenciji Republike Slovenije za okolje za vse posredovane podatke.

Posebna zahvala gre moji družini in prijateljem, ki so mi v času študija stali ob strani.

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA.....	V
KAZALO VSEBINE	VI
KAZALO PREGLEDNIC	VIII
KAZALO SLIK.....	IX
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI.....	I
1 UVOD.....	1
2 POVRŠINSKI ODTOK	2
2.1 Splošno.....	2
2.2 Modeliranje površinskega odtoka	3
2.3 Vpliv podnebnih sprememb na padavine in površinski odtok	5
3 MODEL HBV	7
3.1 Splošen opis.....	7
3.2 Struktura modela.....	8
3.2.1 Račun akumulacije in taljenja snega.....	10
3.2.2 Račun vlage v tleh in evapotranspiracije.....	11
3.2.3 Generiranje odtoka.....	13
3.2.4 Transformacijska funkcija.....	15
3.3 Vhodni in izhodni podatki modela HBV-light	16
3.4 Tipi modela HBV-light	17
3.5 Kalibracija modela.....	18
4 PROGRAM PEST.....	21
4.1 Splošen opis.....	21
4.2 Delovanje programa PEST	21
4.2.1 Prepoznavanje in definiranje parametrov.....	22
4.2.2 Prepoznavanje in definiranje opazovanih vrednosti.....	22
4.2.3 Algoritem za ocenjevanje parametrov	23
4.2.4 Analiza napovedi.....	24
4.3 Gauss-Marquardt-Levenberg algoritem	24
4.4 Uporaba programa PEST	27
4.5 Izhodne datoteke programa PEST.....	28
4.6 Program TSPROC.....	29
5 POREČJE VIPAVE	32
5.1 Lega, relief in geološka sestava.....	32
5.2 Hidrografska mreža	33
5.2 Podnebje.....	34
5.3 Pretoki	35

5.4	Poplave na območju porečja Vipave	36
6	IMPLEMENTACIJA MODELA HBV-LIGHT NA POREČJE VIPAVE	38
6.1	Zgradba modela.....	38
6.1.1	Razdelitev porečja na podpovodja ter elevacijsko-vegetacijske enote	38
6.1.2	Merilna mesta.....	41
6.2	Kalibracija in validacija modela z dnevnim časovnim korakom.....	46
6.3	Prehod na model z urnim časovnim korakom	52
6.4	Kalibracija in validacija modela z urnim časovnim korakom	55
7	SIMULACIJA VPLIVA PODNEBNIH SPREMEMB	59
7.1	E-OBS in napovedi podnebnih sprememb.....	59
7.2	Model z dnevnim časovnim korakom	62
7.3	Model z urnim časovnim korakom	64
7.4	Verjetnostna analiza	66
8	ZAKLJUČKI.....	69
VIRI	71

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 5.1: Glavne geografske značilnosti porečja Vipave (Ulaga, 2003 cit. po Frantar et al., 2008, str. 27)	35
Preglednica 6.1: Razdelitev porečja Vipave na podpovodja	39
Preglednica 6.2: Razdelitev podpovodij na višinska in vegetacijska območja	40
Preglednica 6.3: Merilna mesta padavin	41
Preglednica 6.4: Uteži za izračun padavin na podpovodjih	42
Preglednica 6.5: Merilna mesta temperatur in evapotranspiracije	43
Preglednica 6.6: Uteži za izračun temperatur in evapotranspiracije na podpovodjih	44
Preglednica 6.7: Merilna mesta pretokov	45
Preglednica 6.8: Kontrolna mesta podpovodij	46
Preglednica 6.9: Vrednosti R_{eff} za obdobje kalibracije in validacije modela z dnevnim časovnim korakom	47
Preglednica 6.10: Analiza simuliranih in izmerjenih dnevnih pretokov	48
Preglednica 6.11: Razporeditev padavin na navadnih padavinskih postajah	52
Preglednica 6.12: Vrednosti R_{eff} modela z urnim časovnim korakom	53
Preglednica 6.13: Vrednosti R_{eff} za obdobje kalibracije modela z urnim časovnim korakom	55
Preglednica 6.14: Analiza simuliranih in izmerjenih urnih pretokov	57
Preglednica 7.1: Opis simuliranih scenarijev	59
Preglednica 7.2: Napoved povišanja temperature zraka na območju Slovenije	60
Preglednica 7.3: Napovedani dnevni prirastki jesenske količine padavin v mm za izbrana merilna mesta	60
Preglednica 7.4: Količine padavin v mm, uporabljene pri simulaciji scenarijev klimatskih sprememb	61
Preglednica 7.5: Prirastki količine padavin v %	61
Preglednica 7.6: Povečana dvodnevna količina padavin na podpovodjih v %	62
Preglednica 7.7: Analiza maksimalnih simuliranih dnevnih pretokov na postaji Miren I	64
Preglednica 7.8: Analiza maksimalnih simuliranih urnih pretokov na postaji Miren I	65
Preglednica 7.9: Povratne dobe simuliranih urnih pretokov	66
Preglednica 7.10: Srednje vrednosti in standardni odkloni za pretoke v prihodnosti	66
Preglednica 7.11: Pretoki z različnimi povratnimi dobami po Gumbelovi porazdelitvi	68

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Gibanje vode na Zemlji (prirejeno po Brilly in Šraj, 2005, str. 20)	2
Slika 2.2: Deleži posameznih odtokov na hidrogramu (prirejeno po McKillop, 2004, str. 16, prevod Brilly in Šraj, 2006, str. 34).....	3
Slika 2.3: Komponente hidrološkega modela	4
Slika 2.4: Vpliv podnebnih sprememb na porazdelitev padavin (Kajfež-Bogataj, 2008, str. 73).....	6
Slika 3.1: Okno modela HBV-light	8
Slika 3.2: Prikaz razdelitve povodja (Primožič, 2007, str. 9).....	8
Slika 3.3: Shematični prikaz računskih postopkov modela (HBV-light Help).....	9
Slika 3.4: Shema računskega postopka za sneg (prirejeno po Aghakouchak in Habib, 2010, str. 965).....	11
Slika 3.5: Razdelitev skupnega vnosa vode v tla po enačbi 3.4 (prirejeno po Bergström, 1995, str. 449).....	12
Slika 3.6: Vpliv velikosti parametra <i>BETA</i> na odtočni količnik <i>C</i> (prirejeno po Aghakouchak in Habib, 2010, str. 966)	12
Slika 3.7: Linearna redukcija evapotranspiracije (prirejeno po Bergström, 1995, str. 449).....	13
Slika 3.8: Standardni tip modela HBV-light z dvema rezervoarjema (HBV-light Help)	14
Slika 3.9: Transformacija odtoka s filter tehniko s trikotno porazdelitvijo uteži	16
Slika 3.10: Možni tipi modela HBV-light (HBV-light Help)	18
Slika 4.1: Iterativno izboljševanje vrednosti parametrov od začetnih proti takim, ki dajo globalni minimum ciljne funkcije na primeru problema z dvema parametroma (prirejeno po Doherty, 2005, str. 2-8).....	26
Slika 4.2: Shema PEST-ovega optimizacijskega procesa (prirejeno po Zhulu, 2010, str. 2)	27
Slika 4.3: Shematičen prikaz delovanja TSPROC-a v kombinaciji s PEST-om (prirejeno po Westenbroek, 2012, str. 5).....	31
Slika 5.1: Lega porečja Vipave v Sloveniji	32
Slika 5.2: Relief porečja Vipave.....	33
Slika 5.3: Hidrografska mreža porečja Vipave	34
Slika 5.4: Povprečne letne višine padavin na porečju Vipave v obdobju 1971–2000 (ARSO).....	35
Slika 6.1: Podpovodja z mrežo vodotokov	38
Slika 6.2: Višinska območja na porečju Vipave	39
Slika 6.3: Merilna mesta padavin s Thiessenovimi poligoni	42
Slika 6.4: Merilna mesta temperatur in evapotranspiracije s Thiessenovimi poligoni	44
Slika 6.5: Merilna mesta pretokov.....	45
Slika 6.6: Primerjava simuliranih in izmerjenih pretokov v obdobju kalibracije	49
Slika 6.7: Primerjava simuliranih in izmerjenih pretokov v obdobju validacije	50
Slika 6.8: Primerjava izmerjenih in simuliranih dnevnih pretokov v m ³ /s za izbrana podpovodja	51
Slika 6.9: Simulirani in korelacijsko določeni pretoki Vipave na vodomerni postaji Miren I med 6. in 30. 10. 2010.....	54
Slika 6.10: Časovni potek padavin na podpovodju Vipava III ter primerjava izmerjenih in simuliranih pretokov na postaji Miren I med 1. in 31. 10. 2012.....	54
Slika 6.11: Primerjava simuliranih in izmerjenih pretokov v obdobju kalibracije modela z urnim časovnim korakom	56
Slika 6.12: Časovni potek padavin na podpovodju Vipava III ter primerjava izmerjenih in simuliranih pretokov z umerjenim modelom z urnim časovnim korakom na postaji Miren I med 1. in 31. 10. 2012... ..	57

Slika 6.13: Primerjava izmerjenih in simuliranih urnih pretokov v m ³ /s za podpovodja Kras I, Kras II in Vogršček v obdobju kalibracije in za podpovodje Vipava III v obdobju validacije.....	58
Slika 7.1: Merilna mesta padavin, s katerih so bili pridobljeni podatki za E-OBS mrežo med leti 1950 in 2006 (Haylock et al., 2008, str. 3)	59
Slika 7.2: Simulirani dnevni pretoki na postaji Miren I kot posledica padavin z 20-letno povratno dobo.	63
Slika 7.3: Simulirani dnevni pretoki na postaji Miren I kot posledica padavin s 100-letno povratno dobo	63
Slika 7.4: Simulirani urni pretoki na postaji Miren I kot posledica padavin z 20-letno povratno dobo.....	64
Slika 7.5: Simulirani urni pretoki na postaji Miren I kot posledica padavin s 100-letno povratno dobo.....	65
Slika 7.6: Gumbelova porazdelitev pretokov na postaji Miren za štiri obravnavana obdobja.....	67
Slika 7.7 Gumbelova porazdelitev pretokov v verjetnostni mreži standardne normalne porazdelitve ..	67

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
ECA&D	European Climate Assessment & Dataset project
EVU	elevacijsko-vegetacijska enota
GAP	genetični algoritem in Powellova optimizacija
GML	Gauss-Marquardt-Levenberg algoritem
KNMI	Nizozemski kraljevi meteorološki inštitut
m n. v.	metri nadmorske višine
SMHI	Švedski meteorološki in hidrološki inštitut

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

Porečje Vipave se nahaja na stiku kraškega in flišnega površja v zahodni Sloveniji. Kraško zaledje Vipave je obsežno in zaradi njega gladina reke močno niha. Pred ukrepi v 70. in 80. letih 20. stoletja je večkrat poplavljala. Njene meandre v zgornjem in srednjem toku so z gradbenimi posegi izravnali in povečali pretočnost. Danes se zato v spodnjem toku pojavljajo poplave, ki jih prej ni bilo. Pretočni režim Vipave je dežno-snežni, z viškom pretokov novembra in marca (Posoški razvojni center).

Podnebje na Zemlji se spreminja, kar se odraža tudi v spremembi padavinskih režimov in posledično pretokih rek. Trendi kažejo, da je v Sloveniji vse več padavin jeseni in da se bomo v prihodnosti pogosteje srečevali z vremenskimi ekstremi. Izdelane so projekcije povečanih količin padavin do konca 21. stoletja, zato se je smiselno vprašati, kako bo spremenljivost podnebja vplivala na pretoke reke Vipave. Primerno orodje za ugotavljanje vpliva podnebnih sprememb na velikost odtoka so hidrološki modeli.

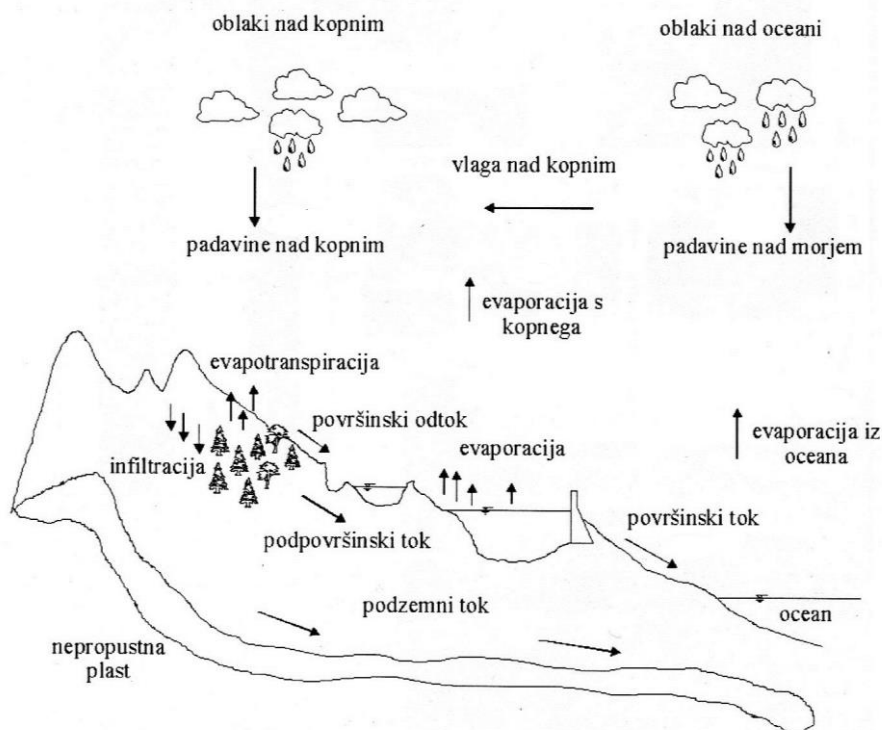
Velikost površinskega odtoka je odvisna od številnih dejavnikov, vsak poplavni val pa je enkraten in neponovljiv dogodek. Analiza površinskega odtoka je zato zahteven postopek. Obstajajo številni hidrološki modeli, s katerimi lahko simuliramo površinski odtok na podlagi padavin in lastnosti povodja. Konceptualni modeli temeljijo na parametrih, ki jih je potrebno pred uporabo modela umeriti. Umerjanje je ključna faza modeliranja, ki je lahko izvedena ročno ali avtomatizirano. Sledi ji validacija, s pomočjo katere ovrednotimo kvaliteto modela in se odločimo, ali je model ustrezen za simulacijo hipotetičnih situacij.

V diplomski nalogi je bil za simulacijo površinskega odtoka s porečja Vipave uporabljen konceptualni model HBV, kalibracija pa je bila izvedena avtomatizirano s programom za ocenjevanje parametrov PEST. Ker je to prvi primer uporabe programa PEST na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo, je podrobneje predstavljeno njegovo delovanje ter postopek povezave z želenim programom. Umerjen model porečja Vipave smo uporabili za simulacijo vpliva podnebnih sprememb na pretok Vipave v spodnjem toku.

2 POVRŠINSKI ODTOK

2.1 Splošno

Voda je na Zemlji prisotna v vseh treh agregatnih stanjih, njena skupna količina pa se tako rekoč ne spreminja. Zadržuje se v atmosferi, oceanih, površinskih in podpovršinskih vodah ter v obliki ledu ali snega in med temi oblikami kroži. Pojav in dinamiko kroženja vode v naravi imenujemo hidrološki krog (slika 2.1). Del hidrološkega kroga je tudi površinski odtok, ki ima velik pomen za okolje in gospodarstvo zaradi urejanja in izkoriščanja vodnega režima (Brilly in Šraj, 2005).

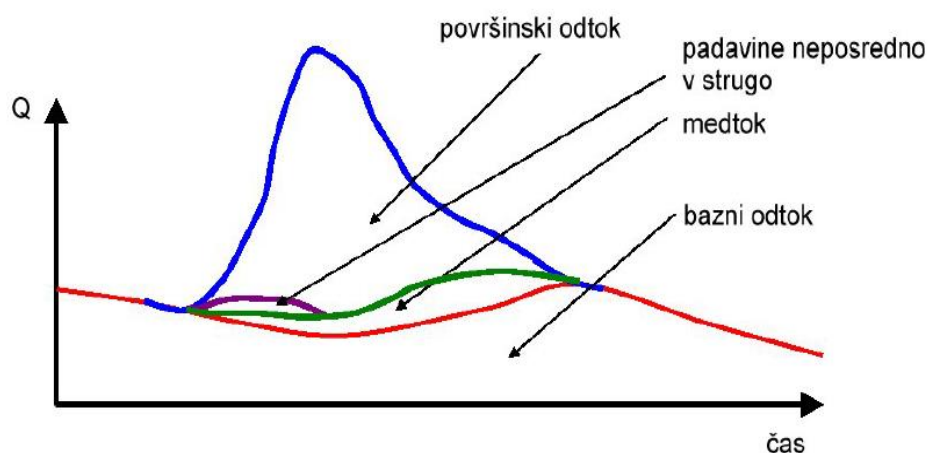


Slika 2.1: Gibanje vode na Zemlji (prirejeno po Brilly in Šraj, 2005, str. 20)

Površinski odtok imenujemo del padavin, ki padejo na Zemljino površje in ne izhlapijo ali se zadržijo na rastlinah ali v tleh, ampak površinsko ali podpovršinsko odtečejo v mrežo vodotokov. Pod vplivom gravitacije voda odteka proti najnižji točki padavinskega območja. Prispevna površina, s katere se voda steka v isto točko, je opredeljena s topografskimi in geološkimi lastnostmi (Brilly in Šraj, 2005).

Površinski odtok se začne šele, ko padavine nasičijo tla z vodo. Kratkotrajne in intenzivne ali dolgotrajne in manj intenzivne padavine lahko v celoti prestreže vegetacija ali pa poniknejo, torej nimajo takojšnjega vpliva na pretok v vodotoku. Kmalu po pojavu večjih padavin pa začne pretok vode v vodotoku naglo naraščati, doseže maksimum in nato postopoma upada. Če dalj časa ni padavin, zaznamo v strugi le bazni odtok, ki je posledica izcejanja podzemnih voda. Na zelo prepustnih površinah kot je kras, padavine skoraj v celoti poniknejo in povečujejo bazni odtok. Na slabo prepustnih površinah pa padavine večinoma odtečejo površinsko (Brilly in Šraj, 2005).

Diagram časovnih sprememb pretoka v vodotoku imenujemo hidrogram. Glavni deli hidrograma so površinski odtok, podpovršinski odtok (medtok) in bazni odtok (slika 2.2). Oblika hidrograma je odvisna od gostote hidrografske mreže, smeri potovanja padavin ter lastnosti prispevne površine kot so predhodna namočenost, velikost, oblika, nagib, hrapavost, raba tal (Brilly in Šraj, 2006).



Slika 2.2: Deleži posameznih odtokov na hidrogramu (prirejeno po McKillop, 2004, str. 16, prevod Brilly in Šraj, 2006, str. 34)

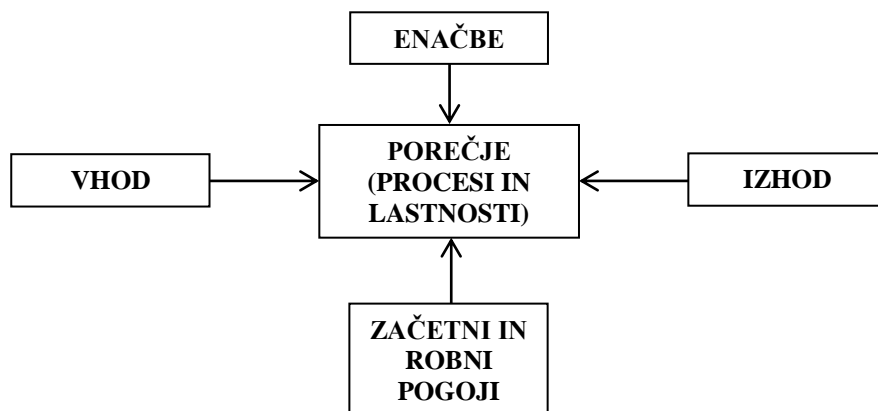
Pojav površinskega odtoka je zapleten in zato zahteven za analizo. Voda se namreč giblje po nešteti površinskih in podpovršinskih tokovnicah, vodno telo se hitro spreminja v prostoru in času, vsak poplavni val pa je enkraten in neponovljiv dogodek. Po nastopu padavin se del vode tudi zadrži pod površino in odteče kasneje, torej lahko ta del zaznamo pri naslednjem poplavnem valu (Brilly in Šraj, 2005).

Razmerje med odtekle in padlo vodo oziroma med efektivnimi in bruto (izmerjenimi) padavinami imenujemo koeficient odtoka, njegova vrednost pa je odvisna od lastnosti povodja, intenzivnosti in trajanja padavin, vlažnosti zemljišča itd. Določamo ga s pomočjo podatkov iz literature, meritev ali empiričnih enačb. Na razliko med padlo in odtekle vodo najbolj vpliva infiltracija padavin. Izhlapenje vpliva posredno, preko vpliva na vlažnost zemljine pred pojavom padavin (Brilly in Šraj, 2006).

2.2 Modeliranje površinskega odtoka

V hidrologiji ni mogoče izmeriti vseh spremenljivk, ki nastopajo v hidrološkem sistemu, predvsem zaradi izjemne heterogenosti ter omejitev merilnih tehnik. Te omejitve skupaj s potrebo po ekstrapolaciji merjenih točkovnih podatkov tako v prostoru kot času so razlog za obstoj hidroloških modelov. Ti so uporabni pri napovedovanju poplav, simulaciji vplivov klimatskih sprememb in sprememb rabe tal, modeliranju kvalitete vode, načrtovanju porabe vodnih virov itd. (Pechlivanidis et al., 2011).

Hidrološki modeli obstajajo v različnih oblikah in so razviti za različne namene. Singh (1995) definira več vrst klasifikacij hidroloških modelov, in sicer glede na opis procesov, časovno in prostorsko merilo ter metodo reševanja. Vsak model sestavlja pet komponent: karakteristike in procesi porečja, vhod, enačbe za opis fizikalnih pojavov, začetni in končni pogoji ter izhod (slika 2.3).



Slika 2.3: Komponente hidrološkega modela

Hidrološki modeli so lahko distribuirani ali točkovni. Matematične funkcije, ki so vgrajene v hidrološke modele, so običajno zvezne, vendar z izjemo zelo preprostih primerov nimajo analitičnih rešitev. Zato se poslužujemo numeričnih metod, kot so metoda končnih razlik, končnih elementov in robnih elementov. V splošnem to vključuje diferencialne enačbe v treh prostorskih dimenzijah in času. Če prostorskih odvodov ne upoštevamo, je model točkoven. V nasprotnem primeru je distribuiran in je rešitev funkcija prostora in časa (Singh in Woolhiser, 2002).

Modele lahko delimo tudi na konceptualne in empirične ter deterministične in stohastične. Empirični modeli temeljijo na izrazih, ki nimajo jasne naravne razlage (black-box modeli). Konceptualni modeli pa so zasnovani na znanih naravnih zakonitostih in vsebujejo parametre, ki imajo naraven (fizikalen) pomen. Model je stohastičen, če vsebuje slučajne spremenljivke, v nasprotnem primeru je determinističen in za enak vhod vedno dobimo enak izhod iz sistema (Brilly in Šraj, 2006). Večina hidroloških modelov je determinističnih, čeprav nekateri vsebujejo stohastične elemente (Singh in Woolhiser, 2002).

Vsak konceptualni model ima parametre, ki nastopajo kot koeficienti ali eksponenti v matematičnih enačbah. Vrednosti parametrov morajo biti ocenjene za vsako enoto modela. Obstajata dva glavna pristopa k ocenjevanju parametrov. Lahko se osredotočimo na njihov fizikalen pomen in jih določimo z meritvami v naravi ali pa jih prilagodimo tako, da se rezultati modela kar se da ujemajo z realnimi opazovanji. Drugi pristop je znan pod imenom kalibracija oziroma umerjanje. Če je na voljo dovolj kvalitetnih podatkov, se hidrologi raje odločijo zanj (Schaake, 2003).

Kalibracija je kompleksen proces zaradi omejitev modela, kvalitete vhodnih in izhodnih podatkov, nepopolnega znanja o lastnostih povodja, matematične strukture modela ter omejene zmožnosti uporabnika pri izražanju merila za ujemanje rezultatov modela in opazovanj. Zaradi vseh teh omejitev ni jasno, ali obstaja ustrezen unikatni set parametrov za obravnavano povodje. Obstaja tudi negotovost glede izbire »najboljših« parametrov (Schaake, 2003).

Postopek kalibracije je sestavljen iz dveh delov. Najprej se moramo odločiti, s katerim kriterijem bomo presojali, ali je nek set parametrov boljši kot drug. Drugi del pa predstavlja iskanje optimalnega seta parametrov in uporaba le tega v modelu. Do iskanih vrednosti lahko pridemo ročno, avtomatizirano s tehnikami optimizacije ali s kombinacijo teh dveh načinov (Schaake, 2003).

Kalibracija hidrološkega modela je torej proces sistematičnega prilagajanja parametrov, katerega rezultat je set parametrov, pri katerem model najbolje simulira opazovani pretok. Če je izvedena

ročno, modelar nastavi vrednosti parametrov, požene model, pregleda rezultate in ponovno nastavi vrednosti parametrov, če pa je avtomatizirana, optimizacijski algoritem požene model več stokrat ali tisočkrat, vsakič z različnim setom parametrov (Vaze et al., 2012).

Ročno kalibriranje postane težavno pri veliki količini parametrov, zanj je potrebno več časa in napora, rezultati pa so subjektivni. Za avtomatizirano kalibracijo potrebujemo ustrezno programsko opremo, vendar je ponovljiva ter relativno lahka in hitra. Paziti moramo, da se parametri ne ujamejo pri mejnih vrednostih, saj v tem primeru ni nujno, da je rezultat res optimalen set parametrov (Vaze et al., 2012).

Pri ročni kalibraciji je kriterij ujemanja običajno vizualna primerjava simuliranih in izmerjenih pretokov ter rezultati statistične analize. Pri avtomatizirani metodi pa je kriterij tako imenovana ciljna funkcija, ki z eno številko opiše razliko med simuliranimi in izmerjenimi vrednostmi. S tem je omogočena primerjava rezultatov zaporednih pogojev modela (Vaze et al., 2012).

Ko je model umerjen, potrdimo njegovo kvaliteto s simulacijo pojavov, ki jih nismo upoštevali pri umerjanju (Brilly in Šraj, 2006). Ta postopek se imenuje validacija. V primeru modeliranja površinskega odtoka uporabimo kalibrirane parametre za simulacijo odtoka v neodvisnem obdobju, ki ni bilo uporabljeno pri kalibraciji. Tako ugotovimo, ali z umerjenim modelom lahko simuliramo različne klimatske scenarije. Zato je validacija eden najpomembnejših korakov pri hidrološkem modeliranju (Vaze et al., 2012).

V raziskovalnih študijah je običajno, da podatke, ki jih imamo na voljo, pred umerjanjem razdelimo na dva dela in en del (na primer 2/3 podatkov) uporabimo za kalibracijo, preostali del (1/3) pa za validacijo. Pri tem lahko naletimo na problem, da daje model dobre rezultate v obdobju kalibracije, a slabše v obdobju validacije. Če na voljo ni dovolj podatkov, obstaja alternativna možnost uporabe celotnega obdobja za kalibracijo in validacija na posameznih krajših nizih znotraj tega obdobja (Vaze et al., 2012).

2.3 Vpliv podnebnih sprememb na padavine in površinski odtok

Podnebje na Zemlji se stalno spreminja, bodisi zaradi naravnih vzrokov ali človeških dejanj. Nekatere negativne posledice podnebnih sprememb že čutimo tudi v Sloveniji, pogostejši so vročinski valovi, suše ter poplave. Na podnebne spremembe se bo potrebno prilagoditi, pri pripravi strategij prilagajanja pa je ključnega pomena dobro poznavanje pretekle spremenljivosti podnebja. Obsežna zbirka podatkov iz preteklih let je osnova za projekcije podnebnih sprememb. Natančnega stanja sicer ne moremo napovedati, lahko pa ob raznih predpostavkah okvirno ocenimo spremenljivost podnebja (Bergant, 2010).

Podnebne spremembe se odražajo v povišani povprečni temperaturi zraka in oceanov, taljenju polarnega ledu in ledenikov ter dvigu morske gladine. Meritve in analize meteoroloških parametrov kažejo, da se spreminjajo tudi padavinski vzorci ter količine in intenzitete padavin (Kobold, 2009).

Toplejša atmosfera lahko sprejme več vodne pare, ki je kasneje vir padavinske vode. Izhlapevanje globalno naraste za približno 7 % z vsakim povišanjem temperature zraka za 1 °C. Po nekaterih napovedih naj bi se skupni volumen padavin globalno povečal za 1–2 % na povišano °C. Verjetno je, da se bo večja količina padavin sprostila v pogostejših, krajših in bolj intenzivnih padavinskih dogodkih, kar vodi v povečanje nevarnosti pojava poplav (Clark, 2011).

Slovenija ima raznolike padavinske režime in intenzitete padavin. Časovne spremembe letne količine padavin na večini območij države niso statistično značilne. Opazno je upadanje količine padavin v prvi polovici leta in naraščanje v drugi polovici. Večkrat nas prizadenejo obilna deževja, kratkotrajni močni nalivi in suše. Meritve kažejo, da vse večji delež padavin pade v obliki intenzivnih padavin (Kobold, 2009).

Glede na napovedi naj bi se v Sloveniji temperatura zraka do konca 21. stoletja dvignila za približno 3 °C v hladni polovici leta in za 3.5 °C v topli polovici. Poleg tega gre pričakovati povečanje intenzitete padavin ter zmanjšanje skupne količine padavin v topli polovici leta in povečanje v hladni polovici. Vremenske ujme bodo čedalje pogostejše in močnejše. Slika 2.4 prikazuje vpliv podnebnih sprememb na porazdelitev padavin. Nova porazdelitev je v primerjavi s staro običajno premaknjena in razpotegnjena, kar pomeni, da se spremeni povprečna velikost padavin in verjetnost pojava ekstremov (Kajfež-Bogataj, 2008).



Slika 2.4: Vpliv podnebnih sprememb na porazdelitev padavin (Kajfež-Bogataj, 2008, str. 73)

Največji odziv na intenzivnejše padavine pričakujemo v alpskem in predalpskem svetu, kjer naj bi se visokovodne konice odtokov povečale za 30 %, najmanjši do 10 % pa pri kraških vodotokih zaradi podzemnih akumulacij vode (Kobold, 2007a, cit. po Kobold, 2009).

Primerno orodje za ugotavljanje vplivov podnebnih sprememb na hidrološki režim in oceno odtoka so konceptualni hidrološki modeli (Kobold, 2009). Na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo je že bila izvedena študija vpliva klimatskih sprememb na pretoke reke Save (Brilly et al., 2012), v kateri je bilo ugotovljeno, da se bodo viški pretokov v primeru 100-letnih padavin do leta 2100 povečali za 16–79 %.

3 MODEL HBV

3.1 Splošen opis

Model HBV je konceptualni hidrološki model, ki omogoča simulacijo odtoka na podlagi časovnih serij podatkov o padavinah, temperaturi zraka in potencialni evapotranspiraciji. Razvit je bil na Švedskem meteorološkem in hidrološkem inštitutu (SMHI) v Norrköping-u. Prvi uspešen zagon je doživel leta 1972 in po 20 letih postal standardno orodje za simulacijo odtoka v nordijskih državah ter bil uporabljen v več kot 30 ostalih državah (Bergström, 1995).

Model HBV temelji na enačbi vodne bilance:

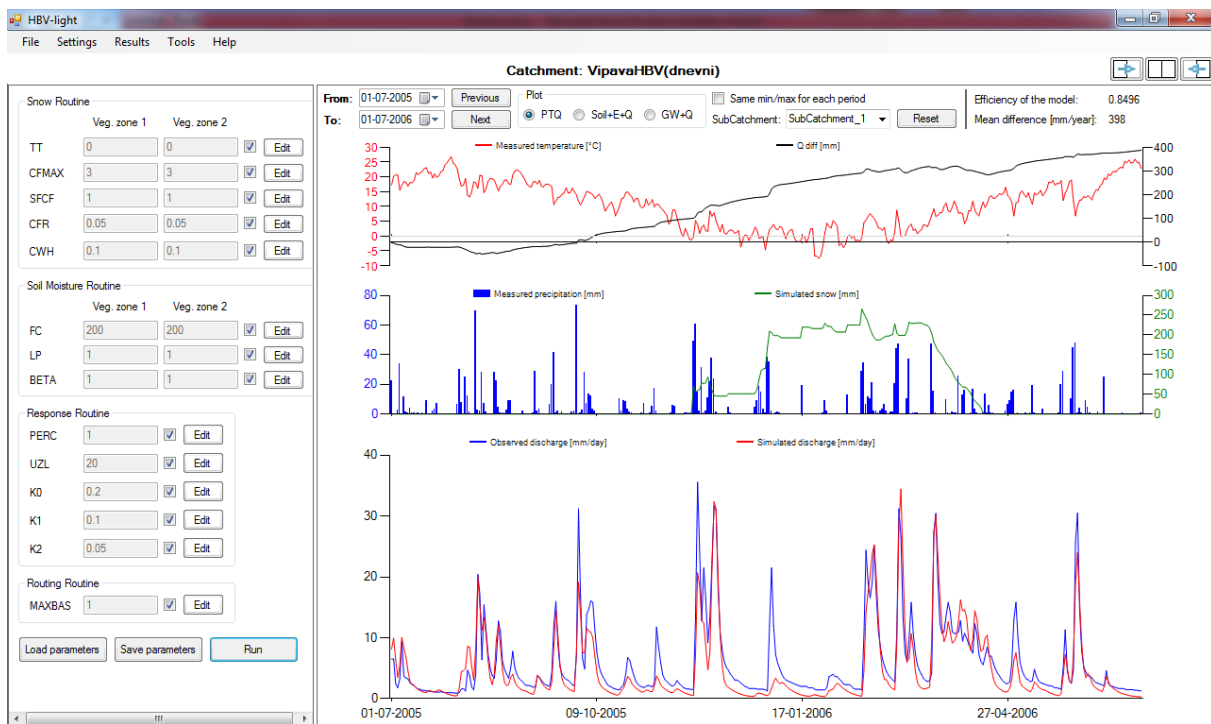
$$P - E - Q = \frac{d}{dt}(SP + SM + UZ + LZ + lakes), \quad (3.1)$$

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

Prvotno je bil model HBV namenjen napovedovanju odtoka, do danes pa se je področje njegove uporabe razširilo in zajema tudi simulacijo vpliva klimatskih sprememb, kontrolo kvalitete podatkov, simulacijo odzivov podzemne vode, napovedovanje poplavnih valov v povezavi z varnostjo pregrad in delovanjem zadrževalnikov, študije vodne bilance, dopolnjevanje manjkajočih podatkov o pretokih, raziskovanje vpliva sprememb v povodjih in simulacijo odtoka s povodij brez merilnih mest (Bergström, 1995, Seibert, 2005).

HBV model danes obstaja v več različicah, ki se razlikujejo po kompleksnosti in uporabnosti (Aghakouchak in Habib, 2010). Na SMHI so osnovni točkovni model razvili v distribuiranega, njihova zadnja verzija pa je HBV-96 (Lindström et al., 1997). Razvoj programa je tekel tudi drugje, na Univerzi v Uppsali je bil leta 1993 z uporabo programskega jezika Microsoft Visual Basic izdelan HBV-light (Seibert in Vis, 2012). V diplomski nalogi je uporabljena najnovejša verzija programa HBV-light, ki je bila razvita na Univerzi v Zürich-u. Glavna motivacija za njen nastanek je bila zagotoviti uporabniku prijazen model, namenjen predvsem izobraževanju študentov na višjih ravneh študija in uporabi v raziskovalnih projektih (Seibert in Vis, 2012). Grafični vmesnik modela HBV-light je prikazan na sliki 3.1.

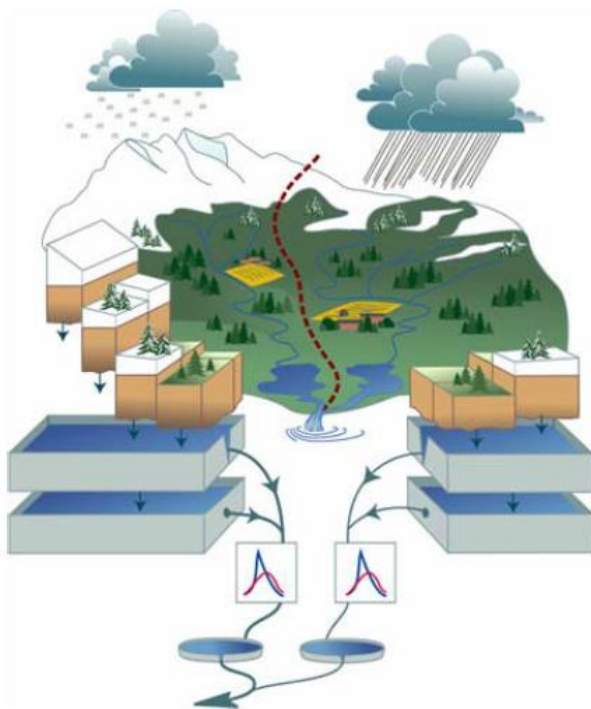
Model HBV-96 je že bil implementiran v slovenskem prostoru. V okviru razvoja evropskega poplavnega prognostičnega sistema sta bila umerjena del porečja Save in porečje Savinje (Kobold et al., 2003), na porečju Savinje je bila izdelana tudi analiza občutljivosti modela HBV na vhodne padavinske podatke (Kobold in Sušelj, 2005). Reko Savo na območju Slovenije je v diplomski nalogi umeril Primožič (2007), model HBV pa je bil tudi orodje pri študiji vpliva klimatskih sprememb na rečni režim celotnega porečja Save (Brilly et al., 2012).



Slika 3.1: Okno modela HBV-light

3.2 Struktura modela

Model HBV opišemo kot delno distribuiran model, kar pomeni, da povodje lahko razdelimo na več podpovodij, vsako podpovodje pa še na različna višinska in vegetacijska območja. Velika jezera znatno vplivajo na dinamiko odtoka, zato jih modeliramo posebej (Lindstöm et al., 1997). Primer razdelitve povodja je prikazan na sliki 3.2.



Slika 3.2: Prikaz razdelitve povodja (Primožič, 2007, str. 9)

HBV-light omogoča razdelitev podpovodja na največ 3 vegetacijska in 20 višinskih območij. Možno je tudi upoštevati pokritost tal z jezeri ali ledeniki. Vegetacijska in višinska območja definiramo z deleži površin, ki jih posamezne elevacijsko-vegetacijske enote zavzemajo.

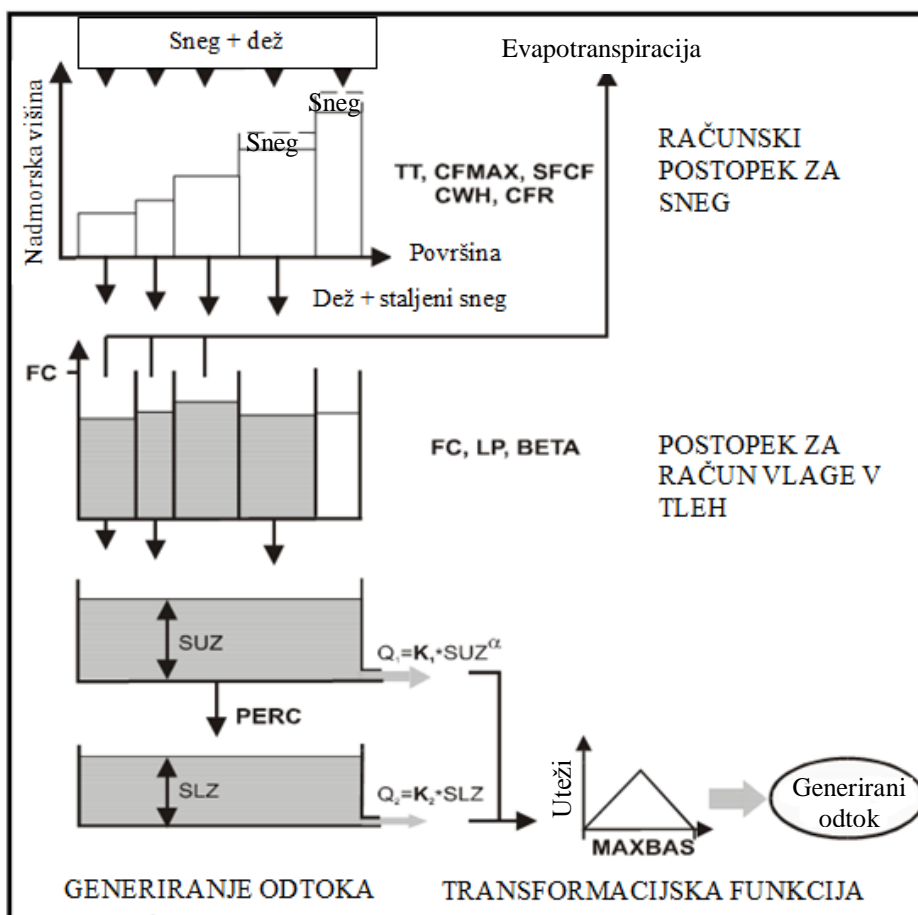
Od osnovne verzije se HBV-light razlikuje predvsem v začetku simulacije. Pri HBV-96 modelu je uporabnik definiral začetne vrednosti spremenljivk, HBV-light pa uporablja »ogrevalno obdobje«, v katerem se standardne začetne vrednosti razvijejo do ustreznih vrednosti glede na meteorološke in pogoje in vrednosti parametrov (Seibert in Beven, 2009). V večini primerov zadošča, če je »ogrevalno obdobje« dolgo eno leto (Seibert in Vis, 2012).

Vhodni podatki v model so časovne serije padavin in temperatur zraka ter ocene potencialne evapotranspiracije. Časovni korak za padavine in temperature je običajno en dan, vendar je možna tudi uporaba krajših časovnih korakov (IHMS 1999, Bergström 1995). Za umerjanje modela potrebujemo še časovne serije merjenih pretokov na iztoku iz podpovodij.

Model HBV je sestavljen iz štirih glavnih računskih postopkov (IHMS, 1999):

- računa akumulacije in taljenja snega,
- računa vlage v tleh,
- generiranja odtoka in
- transformacijske funkcije.

Shematični prikaz strukture modela z računskimi postopki in parametri modela je prikazan na sliki 3.3.



Slika 3.3: Shematični prikaz računskih postopkov modela (HBV-light Help)

V nadaljevanju so opisani računski postopki in parametri modela HBV-light, kot jih predstavi Seibert (2005, 2012).

3.2.1 Račun akumulacije in taljenja snega

Vhodni podatki pri računskem postopku za sneg so padavine in temperatura zraka, izhodni pa snežna odeja in staljeni sneg. Nastopajo naslednji parametri:

- TT [°C] ... temperaturni prag, pod katerim se predpostavi, da so padavine snežne
- $CFMAX$ [mm/Δt/°C] ... faktor taljenja snega
- $SFCF$ [-] ... korekcijski faktor za sneg
- CFR [-] ... faktor zmrzovanja
- CWH [-] ... kapaciteta vode v snegu

Sneg se računa za vsako vegetacijsko območje posebej. Računski postopek temelji na predpostavki, da so padavine snežne, če je temperatura zraka nižja od TT , v nasprotnem primeru pa so padavine dežne. TT se zato običajno giblje okrog 0 °C. Količina padavin, ki se smatrajo za sneg, se množi s parametrom $SFCF$, s katerim kompenziramo napake pri meritvi količine snega ter zajamemo vpliv izhlapevanja iz snežne odeje, ki sicer ni eksplicitno simulirano.

Ko temperatura zraka naraste nad mejno vrednost TT , nastopi taljenje snega (M). Faktor $CFMAX$ določa količino staljenega snega v časovnem intervalu, ki jo povzroči zvišanje temperature zraka za 1°C nad TT :

$$M(t) = CFMAX (T(t) - TT). \quad (3.2)$$

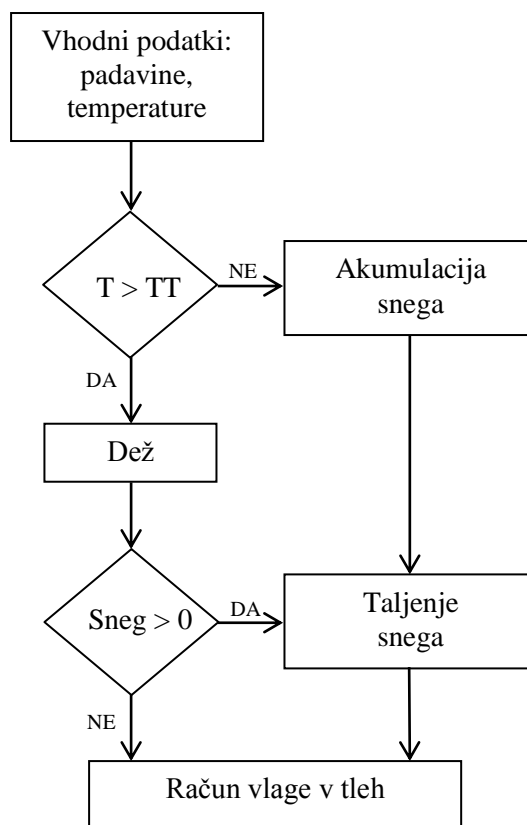
$CFMAX$ se v nekaterih verzijah HBV lahko upošteva kot spremenljiv parameter, za primere, ko dež pada na že obstoječo snežno odejo in je zaradi dodatne toplote v toplejšem dežju količina staljenega snega večja (Aghakouchak in Habib, 2010). V verziji HBV-light je parameter $CFMAX$ konstantne vrednosti.

Staljeni sneg in dež se zadržujeta v snežni odeji dokler ne presežeta določenega deleža vodnega ekvivalenta snežne odeje. Delež določa vrednost faktorja CWH , ki je običajno 0.1. Če temperatura zraka ponovno pade pod TT , se izračuna količina ponovno zamrznjene vode (R) s pomočjo koeficienta CFR :

$$R(t) = CFR (TT - T(t)). \quad (3.3)$$

Model omogoča tudi upoštevanje vpliva severno in južno orientiranih pobočij na taljenje snega. Vpliv je zajet v parametru $CFslope$, s katerim se $CFMAX$ pomnoži v primeru južnih pobočij in deli v primeru severnih. V porečjih z ledeniki lahko simuliramo tudi taljenje ledenikov, in sicer s parametrom $CFGlacier$. Računski postopek je podoben kot pri taljenju snega, le da se $CFMAX$ pomnoži še z vrednostjo $CFGlacier$, ki poveča količino staljene vode.

Shema računskega postopka za sneg je prikazana na sliki 3.4. Računskemu postopku za sneg sledi račun vlage v tleh.



Slika 3.4: Shema računskega postopka za sneg (prirejeno po Aghakouchak in Habib, 2010, str. 965)

3.2.2 Račun vlage v tleh in evapotranspiracije

Vhodni podatki za račun so potencialna evapotranspiracija, padavine in staljeni sneg, izhodni pa dejanska evapotranspiracija, vlaga tal in učinkovite padavine. Postopek temelji na treh parametrih:

- FC [mm] ... največja količina vode v tleh oz. poljska kapaciteta
- LP [-] ... faktor redukcije potencialne evapotranspiracije
- $BETA$ [-] ... parameter oblike, ki določa prispevek k odtoku

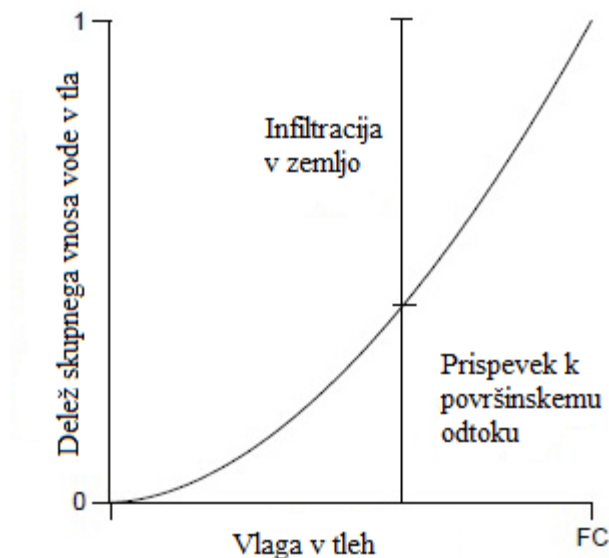
Vsota dežnih padavin (P) in staljenega snega (M) predstavlja skupni vnos vode v tla, ki se razdeli na dva dela (slika 3.5). En del se infiltrira v zemljo, preostanek pa prispeva k površinskemu odtoku in je znan tudi pod imenom učinkovite padavine (P_{eff}). Velikost odtoka je v modelu izračunana na podlagi razmerja med trenutno vlago v tleh (SM) in poljsko kapaciteto (FC):

$$\frac{P_{eff}(t)}{(P(t)+M(t))} = \left(\frac{SM(t)}{FC}\right)^{BETA}. \quad (3.4)$$

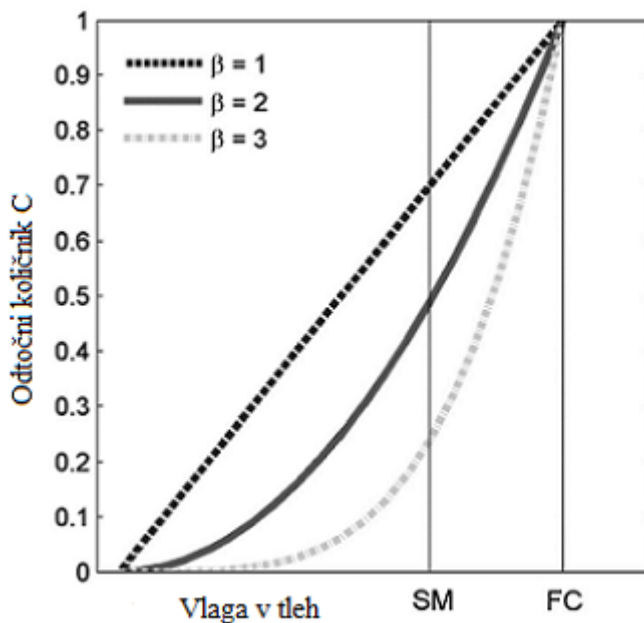
Pri neki vrednosti vlage v tleh parameter $BETA$, imenovan tudi koeficient oblike, določa delež vode, ki prispeva k odtoku. Na sliki 3.6 je prikazan vpliv velikosti parametra $BETA$ na odtočni količnik, ki je definiran kot razmerje med učinkovitim padavinami in skupnim vnosom vode v tla:

$$C = \frac{P_{eff}}{P+M}. \quad (3.5)$$

Večja vrednost $BETA$ pomeni manjši odtočni količnik oziroma manjši odtok. Opazimo tudi, da z naraščanjem količine vlage v tleh odtočni količnik narašča, ker tla ne morejo več sprejeti enake količine vode (Aghakouchak in Habib, 2010).



Slika 3.5: Razdelitev skupnega vnosa vode v tla po enačbi 3.4 (prirejeno po Bergström, 1995, str. 449)

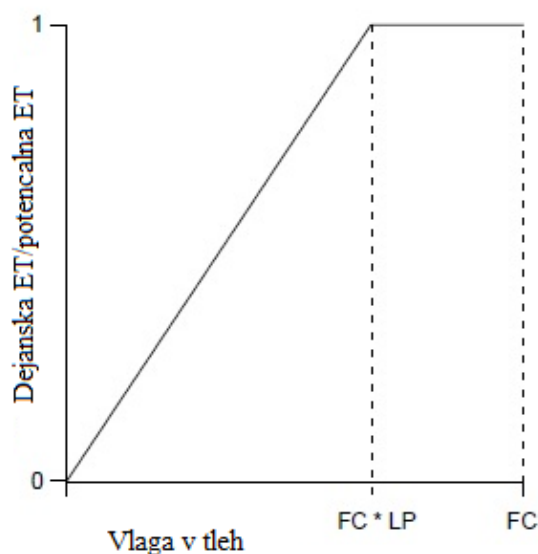


Slika 3.6: Vpliv velikosti parametra $BETA$ na odtočni količnik C (prirejeno po Aghakouchak in Habib, 2010, str. 966)

Na sliki 3.7 je prikazana vloga parametra LP . Če je trenutna vlaga v tleh večja od zmnožka FC in LP , je dejanska evapotranspiracija ET_{act} enaka potencialni ET_{pot} . V nasprotnem primeru je uporabljena linearna redukcija potencialne evapotranspiracije:

$$ET_{act} = ET_{pot} \frac{SM}{FC LP} \quad (3.6)$$

Dejanska evapotranspiracija je torej odvisna od namočenosti tal in je manjša od potencialne, če so tla suha.



Slika 3.7: Linearna redukcija evapotranspiracije (prirejeno po Bergström, 1995, str. 449)

Ker je potencialna evapotranspiracija običajno podana s povprečnimi dnevnimi vrednostmi za vsak mesec, je potencialna evapotranspiracija za določen dan v mesecu izračunana glede na odstopanje temperature zraka od dolgoletnega povprečja:

$$ET_{pot}(t) = (1 + CET (T(t) - T_M)) ET_{pot,M}, \quad (3.7)$$

pri čemer je CET korekcijski faktor, T_M dolgoletna povprečna temperatura zraka, $ET_{pot,M}$ pa povprečna dnevna vrednost evapotranspiracije za izbrani mesec. Pri tem obstaja še omejitev:

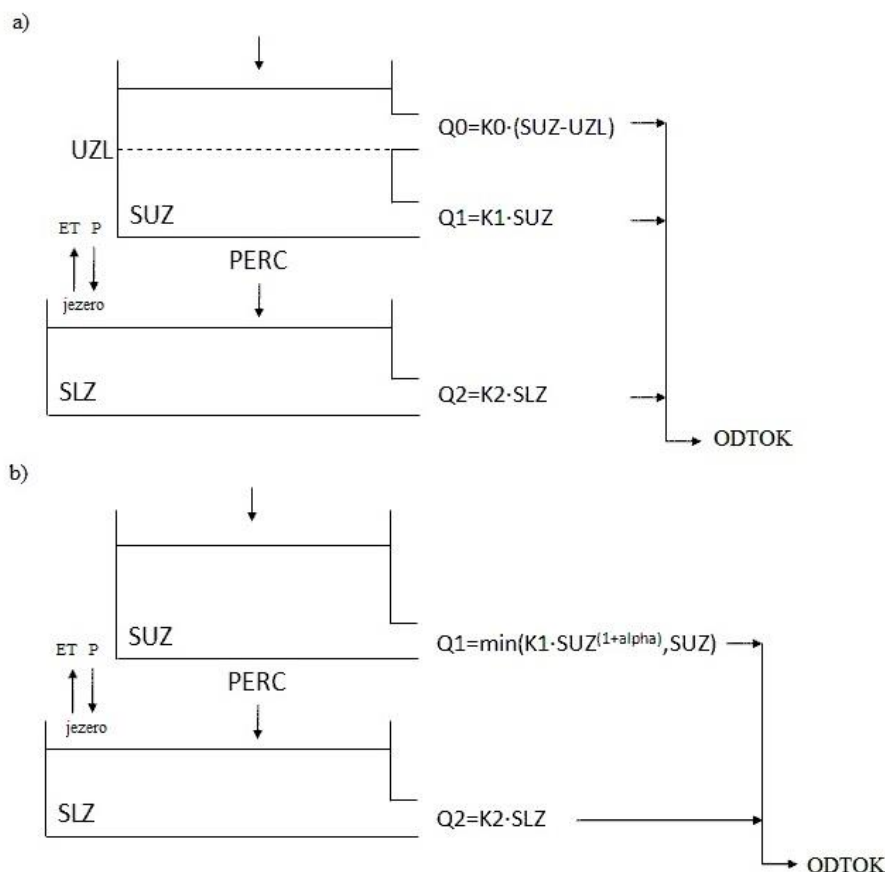
$$0 \leq ET_{pot}(t) \leq 2 ET_{pot}. \quad (3.8)$$

3.2.3 Generiranje odtoka

Vhodni podatki za račun odtoka so učinkovite padavine iz predhodnega računskega postopka in potencialna evapotranspiracija, izhodni pa odtok in višina podzemne vode. Parametri, ki določajo generiranje odtoka, so:

- $PERC$ [mm/ Δt] ... maksimalno pronicanje v spodnji rezervoar
- $ALPHA$ [-] ... koeficient nelinearnosti
- UZL [mm] ... mejna vrednost v zgornjem rezervoarju
- $K0$ [Δt^{-1}] ... recesijski koeficient za zgornji del zgornjega rezervoarja
- $K1$ [Δt^{-1}] ... recesijski koeficient za spodnji del zgornjega rezervoarja
- $K2$ [Δt^{-1}] ... recesijski koeficient za spodnji rezervoar

Sistem za računanje odtoka je sestavljen iz dveh rezervoarjev, ki se nahajata eden nad drugim in sta med seboj povezana (slika 3.8). Zgornji rezervoar simulira hitrejšo komponento odtoka oziroma direktni odtok, spodnji pa počasnejši bazni odtok. Pri računu se upošteva tudi vpliv direktnih padavin in izhlapevanja z jezer in drugih mokrih območij, če so definirana v modelu.



Slika 3.8: Standardni tip modela HBV-light z dvema rezervoarjema (HBV-light Help)

Efektivne padavine iz predhodnega računskega postopka se dodajo k zalogi v zgornjem rezervoarju, iz katerega voda pronica v spodnjega s konstantno vrednostjo parametra $PERC$. Spodnji rezervoar ima en sam iztok Q_2 , katerega velikost določa recesijski parameter K_2 . Ta iztok predstavlja bazni odtok. Pri visokih vsebnostih vlage v tleh samo pronicanje ne zagotavlja popolnega praznjenja zgornjega rezervoarja, zato se pojavi tudi iztok iz zgornjega rezervoarja. SUZ je zaloga vode v zgornjem rezervoarju, SLZ pa zaloga vode v spodnjem.

Možni sta dve različici zgornjega rezervoarja, linearna in nelinearna. Pri linearni različici (slika 3.8a) ima zgornji rezervoar dva iztoka (Q_0 in Q_1). Zgornji je aktiviran, če zaloga vode preseže mejno vrednost UZL , njegova velikost pa je določena z recesijskim parametrom K_0 . Velikost spodnjega iztoka določa recesijski parameter K_1 . Končni rezultat odtoka je vsota pretokov iz vseh treh iztokov:

$$Q(t) = Q_2 + Q_1 + Q_0 = K_2 SLZ + K_1 SUZ + K_0 \max(SUZ - UZL, 0). \quad (3.9)$$

Najvišji iztok predstavlja najhitrejši odtok, najnižji pa najpočasnejšega, kar v modelu zagotovimo z ustreznimi velikostmi recesijskih koeficientov:

$$K_0 > K_1 > K_2. \quad (3.10)$$

Viški pretokov se torej simulirajo kot vsota $Q_0 + Q_1 + Q_2$, srednji pretoki kot vsota $Q_1 + Q_2$, ob nizkih pretokih pa je aktiviran le iztok iz spodnjega rezervoarja Q_2 .

Pri drugi različici linearna iztoka iz zgornjega rezervoarja nadomestimo z enim nelinearnim (slika 3.8b). V tem primeru sta parametra UZL in KO nadomeščena s koeficientom nelinearnosti $ALPHA$, ki poleg recesijskega koeficienta $K1$ določa velikost odtoka iz zgornjega rezervoarja $Q1$:

$$Q1 = K1 SUZ^{1+ALPHA}. \quad (3.11)$$

Skupni odtok tako znaša:

$$Q(t) = Q2 + Q1 = K2 SLZ + K1 SUZ^{1+ALPHA}. \quad (3.12)$$

Računski postopek za generiranje odtoka temelji na metodi linearnega rezervoarja, kjer je odtok s povodja proporcionalen zalogi vode:

$$Q(t) = k S(t), \quad (3.13)$$

pri čemer je S zaloga vode, Q odtok, t čas in k recesijski koeficient.

Enačba vodne bilance povodja se glasi:

$$P(t) = ET(t) + Q(t) + \frac{dS(t)}{dt}. \quad (3.14)$$

Če zanemarimo padavine P in evapotranspiracijo ET , dobimo:

$$0 = Q(t) + \frac{dS(t)}{dt}. \quad (3.15)$$

Z upoštevanjem enačbe 3.13 dobimo diferencialno enačbo 3.16:

$$0 = \frac{d}{dt} \frac{Q(t)}{k} + Q(t), \quad (3.16)$$

katere rešitev je:

$$Q(t) = Q(t_0) e^{(t-t_0)k}. \quad (3.17)$$

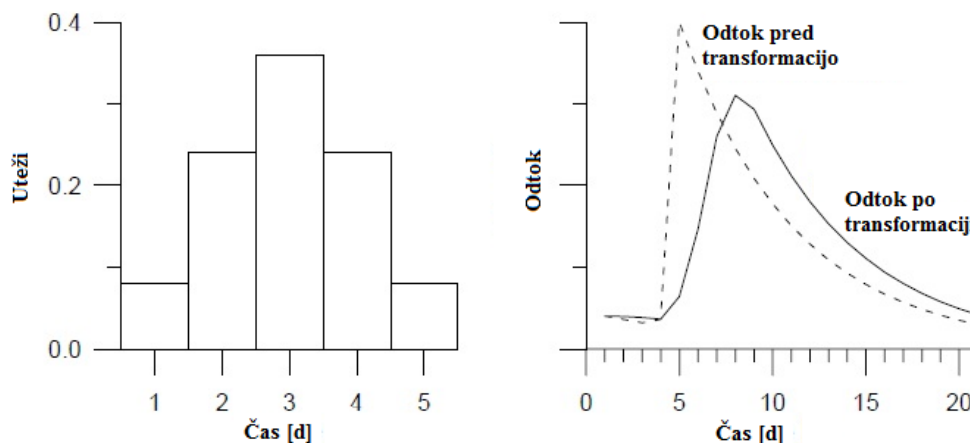
3.2.4 Transformacijska funkcija

Odtok je izračunan za vsako podpovodje posebej. Da na koncu dobimo hidrogram bolj pravilne oblike, je uporabljena transformacijska funkcija oziroma preprosta filter tehnika s trikotno porazdelitvijo uteži (slika 3.9). V računu nastopa parameter $MAXBAS$ [Δt], ki predstavlja trajanje funkcije uteži:

$$Q_{sim}(t) = \sum_{i=1}^{MAXBAS} c(i) Q(t - i + 1), \quad (3.18)$$

pri čemer velja:

$$c(i) = \int_{i-1}^i \frac{2}{MAXBAS} - \left| u - \frac{MAXBAS}{2} \right| \frac{4}{MAXBAS^2} du. \quad (3.19)$$



Slika 3.9: Transformacija odtoka s filter tehniko s trikotno porazdelitvijo uteži

3.3 Vhodni in izhodni podatki modela HBV-light

Za simulacijo pretokov v programu HBV-light so obvezne časovne serije padavin, temperatur zraka, potencialne evapotranspiracije in pretokov za vsa podpovodja. Časovni korak mora biti enak za vse serije podatkov, razen za evapotranspiracijo.

Padavine, ki jih vnesemo v model, izračunamo kot uteženo povprečje izmerjenih padavin s postaj na izbranem območju:

$$P = \sum P_i c_i, \quad (3.20)$$

pri čemer so uteži c_i določene na podlagi Thiessenovih poligonov. Vsaka utež predstavlja razmerje med površino prispevnega območja, ki jo pokriva Thiessenov poligon izbrane postaje in celotno površino prispevnega območja.

Temperature zraka so pomembne v območjih s snegom, saj nastopajo pri računu akumulacije in taljenja snega. Izračunane so na enak način kot padavine, s pomočjo Thiessenovih poligonov.

Temperatura in količina padavin se spreminjata z nadmorsko višino, kar v modelu opišemo s parametroma $PCALT$ in $TCALT$, ki sta lahko konstanti ali pa se s časom spreminjata. Običajno pri povečanju nadmorske višine za 100 m temperatura zraka pade za 0.6 °C, količina padavin pa naraste za 10–20 %.

Evapotranspiracijo lahko podamo na 3 načine: z 12 povprečnimi dnevnimi vrednostmi posameznih mesecev, s 365 povprečnimi dnevnimi vrednostmi ali za vsak časovni korak posebej. Običajno podajamo povprečne vrednosti za vsak mesec, dnevne vrednosti pa so linearno interpolirane.

V primeru, da je povodje sestavljeno iz podpovodij, je potrebno definirati še povezave med podpovodji. Odtok z vseh podpovodij se mora steči v eno končno podpovodje.

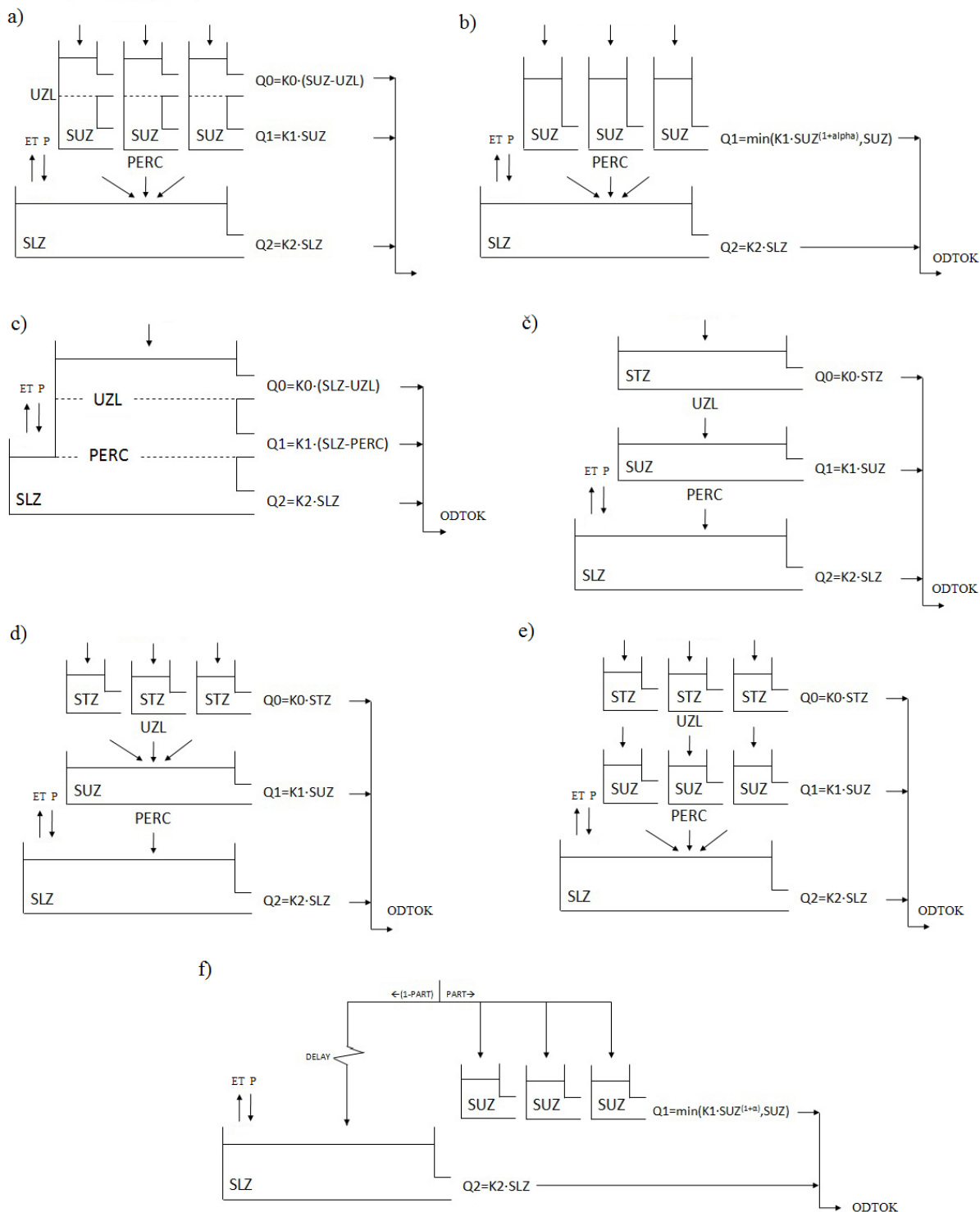
Izhodni podatki modela so simulirani pretoki, potencialna in dejanska evapotranspiracija, višina snežne odeje, vlaga v tleh, zaloga vode v zgornjem in spodnjem rezervoarju ter pretoki skozi posamezne iztoke rezervoarjev za vsak časovni korak in vsako podpovodje. Model izračuna še nekatere statistične vrednosti ter vsoto posameznih členov vodne bilance. Na grafih v grafičnem

vmesniku pa lahko opazujemo primerjavo simuliranega in izmerjenega pretoka, časovno porazdelitev padavin in simuliranega snega, temperaturo zraka, potencialno in dejansko evapotranspiracijo, vlago v zemlji, zalogo vode v zgornjem in spodnjem rezervoarju ter kumulativno vsoto odstopanj simuliranih pretokov od izmerjenih.

3.4 Tipi modela HBV-light

Glede na računski postopek generiranja odtoka obstaja 8 tipov modela HBV-light, ki so prikazani na sliki 3.10. Standardni tip modela z dvema rezervoarjema lahko nadomestimo z enim (slika 3.10c) ali tremi (slika 3.10č), prav tako lahko za vsako elevacijsko-vegetacijsko enoto uporabimo svoj rezervoar (sliki 3.10a in 3.10b). Za porečja s podzemnimi tokovi na večjih globinah je primeren tip, pri katerem del odtoka iz postopka računa vlage v tleh direktno napaja spodnji rezervoar, drug del pa se enakomerno porazdeli čez določen čas trajanja in napaja zgornji rezervoar (slika 3.10f).

Z različnimi tipi modela določamo, ali se računski postopki izvršijo za celotno (pod)povodje ali pa ločeno za vsako elevacijsko-vegetacijsko enoto. Splošnih navodil glede izbire modela ni, prav tako ne glede izbire števila višinskih pasov (Seibert in Vis, 2012).



Slika 3.10: Možni tipi modela HBV-light (HBV-light Help)

3.5 Kalibracija modela

IHMS (1999) priporoča vsaj 5 do 10 let podatkov za kalibracijo modela HBV. Kalibracija je lahko ročna ali avtomatizirana. Pri presojanju ustreznosti modela lahko upoštevamo naslednje kriterije:

- vizualno primerjavo simuliranih in izmerjenih hidrogramov,
- kumulativno vsoto odstopanj simuliranih pretokov od opazovanih,
- statistične kriterije.

Model HBV-light na podlagi izmerjenih (Q_{obs}) in simuliranih (Q_{sim}) pretokov izračuna naslednje statistične vrednosti, ki so nam v pomoč pri vrednotenju kvalitete modela (Seibert, 2005):

- koeficient učinkovitosti oziroma Nash-Sutcliffov kriterij:

$$R_{eff} = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}, \quad (3.21)$$

- koeficient učinkovitosti z upoštevanjem uteži w :

$$R_{eff,weighted} = 1 - \frac{\sum w Q_{obs} (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum w Q_{obs} (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}, \quad (3.22)$$

- koeficient učinkovitosti glede na logaritme pretokov:

$$\log R_{eff} = 1 - \frac{\sum(\ln Q_{obs} - \ln Q_{sim})^2}{\sum(\ln Q_{obs} - \ln \overline{Q_{obs}})^2}, \quad (3.23)$$

- koeficient determinacije:

$$r^2 = \frac{(\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}}))^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2}, \quad (3.24)$$

- povprečno letno odstopanje simuliranih pretokov od opazovanih:

$$meandiff = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})}{\text{število dni}} \quad 356. \quad (3.25)$$

Koeficient učinkovitosti R_{eff} primerja napoved modela s povprečno vrednostjo izmerjenih pretokov. Pri popolnem ujemanju simuliranih in izmerjenih pretokov bi R_{eff} zavzel vrednost 1, vrednost 0 pomeni, da je simulacija tako dobra (ali slaba), kot bi bila napoved s konstantno vrednostjo, negativne vrednosti R_{eff} pa so značilne za zelo slabo umerjen model. Ta kriterij je pogosto uporabljen kot glavno merilo učinkovitosti hidroloških modelov, uvedla pa sta ga Nash in Sutcliffe (1970, cit. po Bergström, 1995). Če so vhodni podatki dobri, lahko v praksi dosežemo vrednosti R_{eff} med 0.8 in 0.95 (IHMS, 1999).

V model HBV-light sta vgrajeni dve orodji za avtomatično kalibracijo, Monte Carlo in GAP (angl. *Genetic Algorithm and Powell optimization*) (Seibert in Vis, 2012). Pri Monte Carlo metodi se izvede veliko število simulacij z naključno izbranimi vrednostmi parametrov znotraj izbranih mej (definiranih s strani uporabnika). Med simulacijami nato izberemo tisto z najvišjo vrednostjo kriterija učinkovitosti modela. GAP algoritem pa je sestavljen iz dveh korakov (Seibert, 2000). Najprej je z genetskim algoritmom iz naključno izbranih začetnih vrednosti parametrov dobljen set optimiziranih parametrov. Genetski algoritmi temeljijo na posnemanju evolucije, parametri se iz začetnih n setov med seboj namreč kombinirajo v nove, boljše generacije. V drugem delu pa je optimiziran set parametrov še fino umerjen s pomočjo Powellove konvergentne metode.

Kalibracija modela HBV je bila tradicionalno izvedena ročno z uporabo tehnike poskušanja in napak (Bergström, 1995). Metodi Monte Carlo in GAP ta postopek avtomatizirata, vendar imata tudi slabosti. Predvsem Monte Carlo je zaradi naključnega izbiranja parametrov časovno zamudna metoda,

še posebno pri velikem številu parametrov. Število potrebnih poskusov namreč narašča eksponentno glede na število parametrov (Solomatine et al., 2009).

Ker je HBV-light možno poganjati preko komandne vrstice, je združljiv s programom za ocenjevanje parametrov PEST, ki je eden bolj učinkovitih načinov za avtomatizirano kalibracijo.

4 PROGRAM PEST

4.1 Splošen opis

PEST je programska oprema za ocenjevanje parametrov, ki temelji na Gauss-Marquardt-Levenberg (GML) algoritmu. Njegovo ime je okrajšava za »*Parameter ESTimation*«. Uporaben je na področju kalibracije modelov, saj izpopolni iterativni postopek iskanja najboljšega seta parametrov (Doherty, 2005).

PEST prilagodi parametre modela tako, da so razlike med generiranimi vrednostmi modela in pripadajočimi izmerjenimi vrednostmi zmanjšane na minimum. To naredi tako, da prevzame kontrolo nad modelom in ga požene tolikokrat, kot je potrebno za določitev optimalnega seta parametrov. Naloga uporabnika je določiti lokacije parametrov v vhodnih datotekah modela in generiranih vrednosti v izhodnih datotekah. PEST pred vsakim zagonom modela zamenja vrednosti parametrov in napiše nove vhodne datoteke, nato požene model in rezultate modela primerja z vrednostmi iz resničnega sveta, ki jih prav tako predhodno definira uporabnik. Sledi izračun odstopanj med temi vrednostmi in izbira novih vrednosti parametrov. Celoten postopek se ponavlja, dokler niso odstopanja zmanjšana na minimum (Doherty, 2005).

Bistvena prednost PEST-a je ta, da temelji na relativno grobem optimizacijskem algoritmu in je bolj učinkovit kot naključno izbiranje različnih vrednosti parametrov. Poleg tega sta program in dokumentacija prosto dostopna. Za kalibracijo HBV modela je že bil uporabljen na Norveškem direktoratu za vodne vire in energijo (Lawrence et al., 2009).

PEST je univerzalno uporaben, saj deluje v povezavi s katerim koli modelom, katerega vhodne in izhodne datoteke so tekstovnega (ASCII) tipa. PEST se tako lahko prilagodi široki paleti modelov, naj bodo to preprosti, ki temeljijo na analitičnih rešitvah fizičnega problema, semi-empirični modeli naravnih pojavov ali pa prefinjeni numerični modeli za reševanje kompleksnih problemov z mejnimi vrednostmi (Doherty, 2005).

Da lahko PEST upravlja z modelom, morajo biti izpolnjeni nekateri pogoji (Doherty, 2005).

- Parametri, ki jih želimo optimizirati, se morajo nahajati v vhodnih datotekah tekstovnega tipa, ostale vhodne datoteke so lahko binarne.
- Izhodne datoteke, v katerih se nahajajo rezultati za primerjavo z izmerjenimi vrednostmi, morajo biti tekstovnega tipa, ostale izhodne datoteke so lahko binarne.
- Model mora biti mogoče poganjati preko ukazne vrstice in se mora izvršiti do konca, ne da bi bilo potrebno posredovanje uporabnika.
- PEST za oceno parametrov uporablja tehniko znano kot Gauss-Marquant-Levenberg algoritem. Ta v primerjavi z drugimi metodami zahteva manj zagonov modela, vendar pa mora biti izpolnjen pogoj, da je funkcija odvisnosti simuliranih vrednosti od parametrov modela zvezno odvedljiva.

4.2 Delovanje programa PEST

Doherty (2005), ki je program razvil, delovanje PEST-a razdeli na tri dele: prepoznavanje in definiranje parametrov, prepoznavanje in definiranje opazovanih vrednosti (simuliranih z modelom) ter algoritem za nelinearno ocenjevanje parametrov in analizo napovedi.

4.2.1 Prepoznavanje in definiranje parametrov

Prepoznavanje in definiranje parametrov poteka s pomočjo preproste datoteke, imenovane predloga (angl. *template file*), s končnico ».tpl.«. Izdelamo jo tako, da v vhodni datoteki modela nadomestimo prostor, kjer se nahajajo parametri, s posebnimi nizi znakov, ki definirajo imena in dolžine parametrov. V ta prostor PEST pred vsakim pogonom modela zapiše nove vrednosti parametrov.

Če želimo, lahko določenemu parametru pripišemo konstantno vrednost, v tem primeru je definiran kot fiksen (angl. *fixed*) parameter in PEST ne bo iskal njegove optimizirane vrednosti. Če pa je parameter odvisen od drugega, je definiran kot vezan (angl. *tied*) in bo dejansko optimiziran le matični parameter, vrednosti vezanega pa bodo določene s pomočjo odvisnosti od matičnega. Za vse parametre, ki niso fiksni ali vezani, je potrebno določiti zgornjo in spodnjo mejo, zato da PEST ne izbira nerealnih vrednosti.

V veliko primerih se je izkazalo, da vrednosti parametrov hitreje skonvergirajo, če so optimizirani logaritmi parametrov namesto dejanskih vrednosti parametrov. Zato PEST omogoča tako transformacijo izbranih parametrov. Možna je tudi linearna transformacija, ki je uporabna na primer pri parametrih, ki zavzamejo samo negativne vrednosti. Če te negiramo, lahko nato uporabimo še logaritmično transformacijo za doseganje boljše učinkovitosti optimizacijskega postopka.

Včasih imamo že pred iskanjem optimalnih vrednosti parametrov na voljo podatke o tem, kakšne vrednosti naj bi nekateri parametri zavzeli, ali pa na primer poznamo vsoto ali razliko dveh parametrov. Tudi take »predhodne informacije« se da vključiti v proces optimizacije.

4.2.2 Prepoznavanje in definiranje opazovanih vrednosti

Pojem opazovane vrednosti se nanaša na rezultate modela, ki jih želimo primerjati z vrednostmi iz realnega sveta. Lahko je to le ena vrsta podatkov v množici izračunanih vrednosti v izhodnih datotekah modela.

Da lahko PEST prebere opazovane vrednosti iz izhodnih datotek modela, mu je potrebno podati navodila za iskanje. Na žalost tu ne deluje enak princip kot pri predlogi, saj je lahko oblika izhodnih datotek odvisna od vrednosti parametrov in se spreminja od zagona do zagona. Kljub temu je računalnik sposoben najti lokacije opazovanih vrednosti na podlagi preprostega niza navodil, ki se morajo nahajati v posebni datoteki (angl. *instruction file*) s končnico ».ins«.

Ko je PEST povezan z modelom, je njegova naloga na minimum zmanjšati vrednost utežene vsote kvadratov razlik med vrednostmi, generiranimi z modelom ter izmerjenimi vrednostmi na terenu ali v laboratoriju. Vsota kvadratov uteženih razlik med generiranimi in izmerjenimi vrednostmi se imenuje ciljna funkcija (angl. *objective function*). Z uporabo uteži je mogoče nekaterim izmerjenim vrednostim pripisati večjo pomembnost oziroma večji vpliv pri postopku optimizacije. To je uporabno, če katerim izmerjenim vrednostim bolj zaupamo kot drugim ali v primeru, da so opazovane vrednosti različnega velikostnega reda. Ker ne želimo, da bi opazovane vrednosti le zaradi svoje velikosti v večji ali manjši meri vplivale na velikost ciljne funkcije, jih primerno utežimo in tako zagotovimo, da so vse opazovane vrednosti enako pomembne. Utež ima lahko tudi vrednost 0, če ne želimo, da bi določena opazovana vrednost vplivala na optimizacijski postopek.

4.2.3 Algoritem za ocenjevanje parametrov

PEST temelji na Gauss-Marquardt-Levenberg algoritmu. Pri linearnih modelih, to je modelih, kjer so opazovane vrednosti izračunane s pomočjo matrike enačb s konstantnimi koeficienti, je optimizacija dosežena v enem koraku. Vendar pa večina modelov obravnava nelinearne probleme, pri katerih je optimizacijski postopek iterativen proces. Na začetku vsake iteracije je s pomočjo Taylorjeve vrste določena linearna odvisnost med parametri modela in generiranimi opazovanimi vrednostmi. V ta namen morajo biti izračunani odvodi vseh opazovanih vrednosti po vsakem parametru. Rešitev lineariziranega problema je nov, boljši set parametrov, ki je uporabljen pri ponovnem zagonu modela. Glede na izboljšanje vrednosti ciljne funkcije v primerjavi z izboljšanjem v prejšnji iteraciji se PEST odloči, ali je vredno izvesti še eno iteracijo ali pa je optimizacijski postopek končan.

Na začetku prve iteracije so kot vrednosti parametrov uporabljene začetne vrednosti, ki jih definira uporabnik. Število iteracij lahko zmanjšamo, če z uporabo logaritmične transformacije parametrov prevedemo zelo nelinearen problem v bolj linearnega.

Odvodi opazovanih vrednosti po parametrih so izračunani po metodi končnih razlik. Med vsako iteracijo je model pognan enkrat za vsak parameter, pri čemer je ta povečan za majhen prirastek, definiran s strani uporabnika. Pri računu odvodov opazovanih vrednosti so le te deljene s prirastkom. Postopek je ponovljen za vsak parameter.

Odvodi, izračunani na tak način, so le približni, kvaliteta približkov pa se zmanjša, če so prirastki preveliki ali premajhni. Ker se s tem poslabša učinkovitost optimizacije, PEST omogoča tudi račun odvodov po metodi centralnih razlik. Pri tem tipu metode končnih razlik sta potrebna dva zagona modela za vsak parameter, v prvem zagonu je trenutna vrednost parametra povečana za prirastek, v drugem zagonu pa zmanjšana. Tako imamo za izračun na voljo tri pare parametrov in pripadajočih opazovanih vrednosti. Odvodi so nato lahko izračunani na podlagi parabole ali ravne linije, ki se najboljše prilega trem točkam, ali pa sta uporabljeni dve točki in prej opisani tip metode končnih razlik. V novejši verziji PEST-a je dodana še možnost izračuna odvodov s pomočjo petih točk (Doherty, 2012). Običajno je najbolje, če je uporabljena bolj ekonomična prva metoda, ki se zamenja z metodo centralnih razlik, ko je to potrebno. PEST avtomatično zamenja metodo glede na kriterij, ki ga določi uporabnik.

Med procesom optimizacije PEST dela tudi analizo občutljivosti parametrov. Pri problemih z veliko parametri je namreč zelo verjetno, da nekateri parametri bolj vplivajo na opazovane vrednosti, torej so bolj občutljivi kot drugi, katerih spremembe nimajo tako velikega vpliva. Če presodimo, da spreminjanje vrednosti najmanj občutljivih parametrov zavira proces optimizacije, jih lahko začasno omejimo na konstantno vrednost in bo PEST lažje optimiziral ostale parametre. Tako aktivno sodelujemo pri procesu optimizacije, lahko pa se odločimo tudi za avtomatiziran postopek (angl. *automatic user intervention*).

Ko iščemo najustreznejši set parametrov, mora PEST teči v načinu za ocenjevanje parametrov (angl. *parameter estimation mode*). Rezultat procesa so optimizirane vrednosti parametrov s 95% intervalom zaupanja.

4.2.4 Analiza napovedi

Na žalost pogosto obstaja več takih setov parametrov, pri katerih je ciljna funkcija zmanjšana na minimum ali na vrednost blizu minimuma. Model se smatra za dobro umerjenega pri vsakem takem setu parametrov. Zato se poraja vprašanje, ali bo model pri različnih setih enako dobro napovedoval ključne vrednosti. Odgovor najdemo, če PEST poženemo v načinu za analizo napovedi (angl. *predictive analysis mode*). Pri tem načinu definiramo najvišjo vrednost ciljne funkcije, pri kateri smatramo, da je model dobro umerjen. Običajno je ta vrednost malenkost nad minimumom, določenim s pogonom PEST-a v načinu za ocenjevanje parametrov. Določiti moramo tudi, kateri rezultati modela so ključni pri napovedovanju. PEST nato najde tisti set parametrov, pri katerem je vrednost napovedi maksimalna ali minimalna.

4.3 Gauss-Marquardt-Levenberg algoritem

Gauss-Marquardt-Levenberg algoritem je standardna metoda za reševanje nelinearnih problemov najmanjših kvadratov. Problem najmanjših kvadratov nastopi, ko želimo nizu izmerjenih podatkov prilagoditi parametrizirano funkcijo tako, da minimiziramo vsoto kvadratov razlik med izmerjenimi in funkcijskimi vrednostmi (Gavin, 2011). V Doherty (2005) in Skahill in Doherty (2006) je na kratko predstavljen postopek za ocenjevanje parametrov linearnih modelov in prehod na ocenjevanje parametrov nelinearnih modelov.

Predpostavimo, da linearen model lahko opišemo z linearno enačbo:

$$\mathbf{X} \mathbf{b} = \mathbf{c}, \quad (4.1)$$

kjer je \mathbf{b} vektor n parametrov, \mathbf{c} vektor m opazovanih vrednosti, generiranih z modelom, \mathbf{X} pa matrika dimenzij $m \times n$ s konstantnimi členi, neodvisnimi od členov vektorja \mathbf{b} .

Ciljna funkcija Φ , ki služi kot merilo ujemanja rezultatov modela z izmerjenimi vrednostmi, je definirana kot:

$$\Phi = (\mathbf{c} - \mathbf{X} \mathbf{b})^T \mathbf{Q} (\mathbf{c} - \mathbf{X} \mathbf{b}), \quad (4.2)$$

pri čemer je \mathbf{c} sedaj vektor, ki vsebuje izmerjene vrednosti v laboratoriju ali na terenu. Matrika \mathbf{Q} je diagonalna matrika dimenzij $m \times m$, kjer vsak člen q_{ii} na diagonali predstavlja kvadrat uteži i -te opazovane vrednosti. V matriki \mathbf{Q} je torej zajet vpliv uteži, ki jih pripišemo opazovanim vrednostim. Minimum ciljne funkcije Φ je dosežen pri:

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{c}. \quad (4.3)$$

Če je število opazovanih vrednosti m večje od števila parametrov n , je rešitev \mathbf{b} unikatna. Ker \mathbf{c} v enačbi 4.3 vsebuje izmerjene vrednosti, je \mathbf{b} iz enačbe 4.3 v resnici ocena vektorja \mathbf{b} iz enačbe 4.1. Negotovost ocene lahko izrazimo s kovariantno matriko vektorja \mathbf{b} :

$$C(\mathbf{b}) = \sigma_r^2 (\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X})^{-1}. \quad (4.4)$$

Enačba 4.4 je uporabljena pri izračunu intervalov zaupanja parametrov. σ_r^2 predstavlja varianco elementov vektorja \mathbf{c} (predpostavimo, da so elementi neodvisni) in je proporcionalna minimumu ciljne funkcije:

$$\sigma_r^2 = \frac{\Phi_{min}}{m-n}. \quad (4.5)$$

Razlika med številom opazovanih vrednosti in številom parametrov predstavlja število prostostnih stopenj problema ocenjevanja parametrov.

Pri nelinearnih modelih se razmerje med parametri in opazovanimi vrednostmi ne izraža z enačbo 4.1 in iskanje minimuma ciljne funkcije postane iterativen proces.

Naj funkcija M slika n -dimenzijski prostor parametrov v m -dimenzijski prostor opazovanih vrednosti. Potem se niz opazovanih vrednosti \mathbf{c}_0 , generiranih z modelom, lahko izrazi z začetnim setom parametrov \mathbf{b}_0 :

$$\mathbf{c}_0 = M(\mathbf{b}_0). \quad (4.6)$$

Niz opazovanih vrednosti \mathbf{c} , ki pripada vektorju parametrov \mathbf{b} , le malenkost različnemu od \mathbf{b}_0 , lahko po Taylorjevem teoremu zapišemo s približkom:

$$\mathbf{c} = \mathbf{c}_0 + \mathbf{J}(\mathbf{b} - \mathbf{b}_0), \quad (4.7)$$

kjer je \mathbf{J} Jacobijeva matrika dimenzij $m \times n$, ki vsebuje odvode opazovanih vrednosti po vseh parametrih. Člen j_{ij} v matriki \mathbf{J} je odvod i -te opazovane vrednosti po j -tem parametru.

Ciljna funkcija je v primeru nelinearnih modelov definirana kot:

$$\Phi = (\mathbf{c} - \mathbf{c}_0 - \mathbf{J}(\mathbf{b} - \mathbf{b}_0))^T \mathbf{Q} (\mathbf{c} - \mathbf{c}_0 - \mathbf{J}(\mathbf{b} - \mathbf{b}_0)). \quad (4.8)$$

Enačbi 4.2 in 4.8 sta si podobni, zato lahko uporabimo zgoraj predstavljeno teorijo za izračun vektorja $(\mathbf{b} - \mathbf{b}_0)$, ki ga imenujemo vektor nadgradnje \mathbf{u} (angl. *upgrade vector*). Enačbo 4.3 preoblikujemo v:

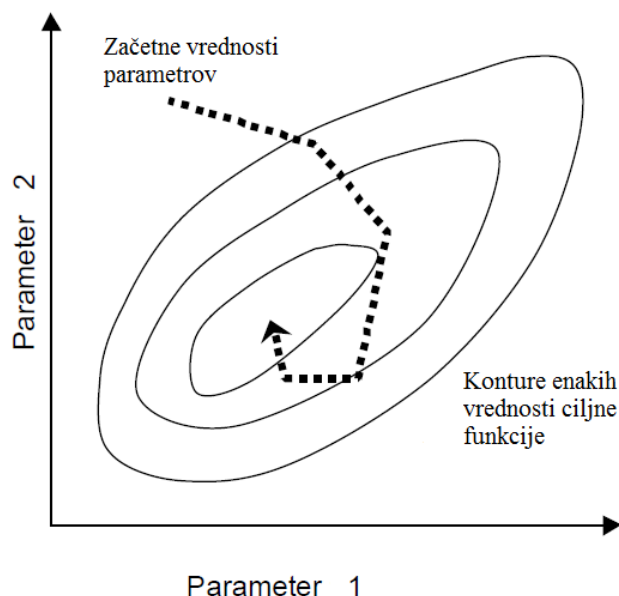
$$\mathbf{u} = (\mathbf{J}^T \mathbf{Q} \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{Q} (\mathbf{c} - \mathbf{c}_0), \quad (4.9)$$

enačbo 4.4 pa v:

$$C(\mathbf{b}) = \sigma_r^2 (\mathbf{J}^T \mathbf{Q} \mathbf{J})^{-1}. \quad (4.10)$$

Ker je enačba 4.7 le približno pravilna, enako velja za enačbo 4.9. Zato ne moremo trditi, da je vrednost ciljne funkcije najmanjša pri vektorju \mathbf{b} , ki ga dobimo, če vektor trenutnih vrednosti parametrov \mathbf{b}_0 povečamo za vektor \mathbf{u} . Zato je vektor \mathbf{b} v naslednji iteraciji uporabljen kot začetni vektor \mathbf{b}_0 , s katerim ponovno definiramo vektor \mathbf{u} in se tako postopoma približujemo minimumu ciljne funkcije. Primer konvergence je prikazan na sliki 4.1.

Pred procesom ocenjevanja parametrov pri nelinearnih modelih je torej nujno definirati začetne vrednosti parametrov.



Slika 4.1: Iterativno izboljševanje vrednosti parametrov od začetnih proti takim, ki dajo globalni minimum ciljne funkcije na primeru problema z dvema parametroma (prirejeno po Doherty, 2005, str. 2-8)

Enačba 4.9 je temelj nelinearnega ocenjevanja parametrov pri problemih najmanjših kvadratov. Lahko jo zapišemo kot:

$$\mathbf{u} = (\mathbf{J}^T \mathbf{Q} \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{Q} \mathbf{r}, \quad (4.11)$$

kjer je \mathbf{r} vektor razlike ($\mathbf{c} - \mathbf{c}_0$) pri trenutnem setu parametrov.

Naj bo vektor \mathbf{g} gradient ciljne funkcije Φ v prostoru parametrov. i -ti element vektorja \mathbf{g} je torej odvod ciljne funkcije po i -tem parametru b_i :

$$g_i = \frac{\partial \Phi}{\partial b_i}. \quad (4.12)$$

Vektor $-\mathbf{g}$ definira smer najbolj strmega zmanjševanja ciljne funkcije, zato je koristno prilagoditi vektor nadgradnje \mathbf{u} tako, da na začetku optimizacijskega procesa sledi smeri $-\mathbf{g}$. To dosežemo z uvedbo tako imenovanega »Marquardt-ovega parametra« α v enačbo 4.11:

$$\mathbf{u} = (\mathbf{J}^T \mathbf{Q} \mathbf{J} + \alpha \mathbf{I})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{Q} \mathbf{r}, \quad (4.13)$$

pri čemer je \mathbf{I} enotska matrika dimenzij $n \times n$.

Pri problemih, ki vključujejo opazovane vrednosti in parametre različnih velikostnih redov, se tudi elementi Jacobijeve matrike \mathbf{J} razlikujejo po velikosti, kar vodi v napake pri računu vektorja \mathbf{u} . Enačbo 4.13 zato preoblikujemo v:

$$\mathbf{S}^{-1} \mathbf{u} = ((\mathbf{J} \mathbf{S})^T \mathbf{Q} \mathbf{J} \mathbf{S} + \alpha \mathbf{S}^T \mathbf{S})^{-1} (\mathbf{J} \mathbf{S})^T \mathbf{Q} \mathbf{r}, \quad (4.14)$$

pri čemer je \mathbf{S} matrika dimenzij $n \times n$, ki ima samo diagonalne člene. i -ti člen diagonale se zapiše kot:

$$S_{ii} = (\mathbf{J}^T \mathbf{Q} \mathbf{J})_{ii}^{-1/2}. \quad (4.15)$$

Največji element matrike $\alpha \mathbf{S}^T \mathbf{S}$ je definiran kot »Marquardt-ova lambda« λ .

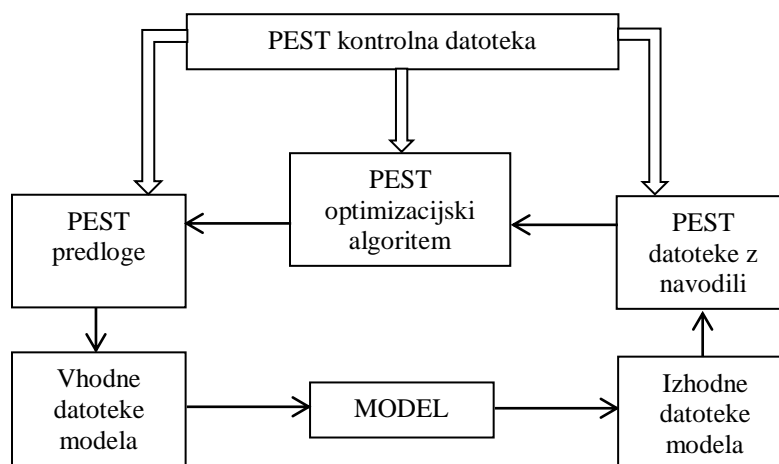
PEST računa vektor nadgradnje \mathbf{u} s pomočjo Marquardt-ovih lambda po enačbi 4.14. V prvi iteraciji optimizacijskega postopka je uporabljena začetna vrednost lambda, ki jo določi uporabnik. PEST prilagodi parametre glede na vektor \mathbf{u} in ovrednoti vrednost ciljne funkcije. Nato začetno vrednost lambda zmanjša za faktor, definiran s strani uporabnika ter ponovno določi vektor \mathbf{u} , nove parametre in pripadajočo ciljno funkcijo. Če se ciljna funkcija zmanjša, lambda ponovno zmanjša, v nasprotnem primeru pa začetno vrednost lambda poveča in ponovi postopek. Iskanje lambda se zaključi z izpolnitvijo kriterija, podanega s strani uporabnika. V naslednji iteraciji je za začetno vrednost lambda uporabljena lambda iz predhodne iteracije, ki je dala najmanjšo ciljno funkcijo ali pa je ta vrednost še zmanjšana.

Običajno je potrebno preizkusiti 1–4 lambda v vsaki iteraciji, kar zahteva nekaj pogonov modela več, vendar je na ta način postopek bolj grob in numerično bolj stabilen. Običajno se lambda med postopkom zmanjšujejo, zato je priporočljivo izbrati visoko začetno vrednost, na primer med 1 in 10.

Slabost gradientnih metod kot je GML je ta, da je globalni minimum ciljne funkcije težje najti, če ima ciljna funkcija tudi lokalne minimume. Lahko se zgodi, da je rezultat optimizacijskega postopka set parametrov, ki da le lokalni minimum ciljne funkcije, ne pa tudi globalnega in parametri sploh niso najbolj optimalni (Skahill in Doherty, 2006). Končne vrednosti parametrov so v tem primeru odvisne od začetnih, zato je pametno izbrati take začetne vrednosti parametrov, za katere mislimo, da so blizu iskanim vrednostim. Iskanje globalnega minimuma olajša tudi upoštevanje predhodnih informacij, s čimer se zmanjša tudi čas, potreben za optimizacijo (Doherty, 2005). Lahko pa PEST uporabimo tudi večkrat z različnimi začetnimi vrednostmi in tako preverimo, ali je končni set parametrov res optimalen (Lawrence et al., 2006).

4.4 Uporaba programa PEST

Za delovanje PEST-a so potrebni trije tipi vhodnih datotek: predloge z definiranimi parametri (angl. *template file*), navodila za iskanje opazovanih vrednosti (angl. *instruction file*) in kontrolna datoteka (angl. *control file*), ki povezuje oziroma nadzoruje celoten sistem (slika 4.2).



Slika 4.2: Shema PEST-ovega optimizacijskega procesa (prirejeno po Zhulu, 2010, str. 2)

Kontrolna datoteka ima končnico ».pst«, v njej pa se mora obvezno nahajati 7 sklopov podatkov, ki se začnejo z zvezdico in imenom sklopa:

- Kontrolni podatki (angl. *control data*) s spremenljivkami, ki se nanašajo na implementacijo Gauss-Marquant-Levenburg algoritma
- Skupine parametrov (angl. *parameter groups*), kjer definiramo način računanja odvodov. Običajno se nekateri parametri obnašajo podobno in jih lahko združimo v skupine. Tako nam prirastka in metode za račun odvoda ni potrebno določati za vsak parameter posebej, ampak le za vsako skupino. Če želimo, pa seveda lahko vsak parameter uvrstimo v svojo skupino.
- Podatki o parametrih (angl. *parameter data*), kjer določamo, ali so parametri fiksni, vezani, logaritmično transformirani, njihove začetne in mejne vrednosti, kateri skupini pripadajo itd.
- Skupine opazovanih vrednosti (angl. *observation groups*), kjer so našeta imena skupin. Tudi opazovane vrednosti namreč glede na njihovo vrsto združujemo v skupine. Na začetku optimizacijskega postopka PEST izračuna prispevke posameznih skupin k velikosti ciljne funkcije. Če želimo, da vse skupine enakovredno vplivajo na ciljno funkcijo, lahko nato ustrezno določamo uteži za posamezne opazovane vrednosti.
- Podatki o opazovanih vrednostih (angl. *observation data*), kjer vsaki opazovani vrednosti, definirani v datoteki z navodili, pripišemo izmerjeno vrednost v laboratoriju ali na terenu, kateri se mora v procesu optimizacije čim bolj približati. Poleg tega tu tudi določimo uteži opazovanih vrednosti ter skupine, katerim pripadajo.
- Ukazna vrstica za pogon modela (angl. *model command line*), ki je preprosto lahko ime izvršljive (».exe«) datoteke modela ali pa ime »batch« datoteke z zaporedjem več ukazov.
- Vhodni in izhodni podatki (angl. *model input/output*), kjer povežemo PEST-ove predloge z vhodnimi datotekami modela ter navodila za iskanje opazovanih vrednosti z izhodnimi datotekami modela.

Struktura kontrolne datoteke in pomen posameznih spremenljivk sta podrobneje razložena v prilogi A.

4.5 Izhodne datoteke programa PEST

Poleg datoteke z optimiziranimi vrednostmi parametrov in intervali zaupanja so pomembnejše izhodne datoteke programa še datoteka občutljivosti parametrov, datoteka občutljivosti opazovanih vrednosti ter datoteka z razlikami.

Analiza občutljivosti parametrov je zelo pomemben del pri izdelovanju modela. Pripomore k preprostosti modela, saj razkrije parametre, ki nimajo bistvenega učinka na rezultat. Je tudi orodje za določanje sodelovanja med komponentami modela in parametri (Bergström, 1991).

Z analizo občutljivosti parametrov ugotavljamo, kako velik je vpliv spreminjanja posameznih parametrov na opazovane vrednosti. Nekateri parametri se morajo spremeniti v veliki meri, da je zaznati zmanjšanje ciljne funkcije. Ker je velikost spreminjanja parametrov v eni iteraciji omejena, se pri veliki spremembi nekaterih parametrov drugi (bolj občutljivi) ne morejo veliko spremeniti, kar lahko pomeni, da se ciljna funkcija ne zmanjšuje. Optimizacijski proces je tako zelo upočasnen, z veliko nepotrebnimi zagoni modela. Takim situacijam se izognemo, če vključimo avtomatiziran postopek, pri katerem PEST drži neobčutljive parametre pri konstantni vrednosti in se posveti optimiziranju ostalih (Doherty, 2005).

Večina časa pri vsaki iteraciji je namenjena računu Jacobijeve matrike. Model se pri tem požene vsaj tolikokrat, kolikor je parametrov, ki niso fiksni ali vezani. Na podlagi vsebine Jacobijeve matrike PEST izračuna občutljivost vsakega parametra glede na vse opazovane vrednosti. Sestavljena občutljivost parametra i je definirana kot:

$$s_i = \frac{(\mathbf{J}^T \mathbf{Q} \mathbf{J})_{ii}^{1/2}}{m}, \quad (4.16)$$

pri čemer je \mathbf{J} Jacobijeva matrika, \mathbf{Q} matrika kvadratov uteži, m pa število opazovanih vrednosti z neničelnimi utežmi. Sestavljena občutljivost določenega parametra je torej normalizirana velikost (glede na število opazovanih vrednosti) stolpca Jakobijeve matrike, ki pripada temu parametru, pri čemer je vsak element stolpca pomnožen z utežjo pripadajoče opazovane vrednosti. Kot je že bilo omenjeno, je posamezen stolpec Jacobijeve matrike sestavljen iz odvodov vseh opazovanih vrednosti po določenem parametru (Doherty, 2005).

Potrebno se je zavedati, da so občutljivosti odvisne od transformacije parametrov. Če je parameter logaritmično transformiran, je občutljivost izračunana za logaritem parametra (Doherty, 2005).

Vrednosti sestavljene občutljivosti se po vsaki iteraciji optimizacijskega procesa zapišejo v posebno izhodno datoteko s končnico ».sen«. Na koncu procesa pa PEST zapiše še skupne občutljivosti glede na »najboljšo« Jacobijevo matriko. Za »najboljšo« matriko se pri načinu za ocenjevanje parametrov smatra tista, pri kateri je ciljna funkcija najmanjša. To je lahko v zadnji iteraciji ali pa v kateri od predhodnih, če v zadnjih ni prišlo do uspešnega izboljšanja. V vsakem primeru je skupna občutljivost dober pokazatelj občutljivosti končnih, optimiziranih vrednosti parametrov (Doherty, 2005).

Poleg občutljivosti parametrov PEST računa tudi občutljivosti posameznih opazovanih vrednosti, ki so definirane kot:

$$s_j = \frac{(\mathbf{Q}(\mathbf{J}\mathbf{J}^T))_{jj}^{1/2}}{n}. \quad (4.17)$$

Sestavljena občutljivost opazovane vrednosti o_j je torej velikost j -te vrstice Jacobijeve matrike pomnožena z utežjo, ki pripada opazovani vrednosti in normirana glede na število parametrov n . Občutljivosti opazovanih vrednosti so sicer lahko uporabne, vendar nam o optimizacijskem procesu vseeno povedo precej manj kot občutljivosti parametrov. Sestavljene občutljivosti opazovanih vrednostih se nahajajo v datoteki s končnico ».seo« (Doherty, 2005).

Še ena pomembna izhodna datoteka PEST-a je datoteka razlik, ki ima končnico ».res«. V njej so tabelirana imena opazovanih vrednosti, skupine, ki jim pripadajo, izmerjene in simulirane vrednosti, razlike med njimi, utežene izmerjene in simulirane vrednosti, utežene razlike, standardni odkloni in »naravne« uteži (Doherty, 2005).

4.6 Program TSPROC

TSPROC je programska oprema, ki z uporabo preprostega skriptnega jezika obdeluje in analizira časovne serije podatkov. Njegovo ime je kratica za »*Time Series PROC*essor«. Prvenstveno je bil razvit kot pripomoček pri kalibraciji modelov, tudi hidroloških, saj med drugim računa volumne ter

sezonske in letne statistike. Poleg tega pa ga lahko uporabimo tudi za izdelavo vhodnih datotek programa za ocenjevanje parametrov PEST (Westenbroek et al., 2012).

Modeli površinskih voda so običajno sposobni simulirati dnevne pretoke na več lokacijah in skozi daljša časovna obdobja. Rezultat je velika količina podatkov, ki jih morda želimo pred kalibracijo obdelati, da jih lažje primerjamo z izmerjenimi vrednostmi, ki jih imamo na voljo. TSPROC je zelo uporabno orodje za tako delo, saj zna na časovnih serijah podatkov izvajati različne računske operacije (Westenbroek et al., 2012).

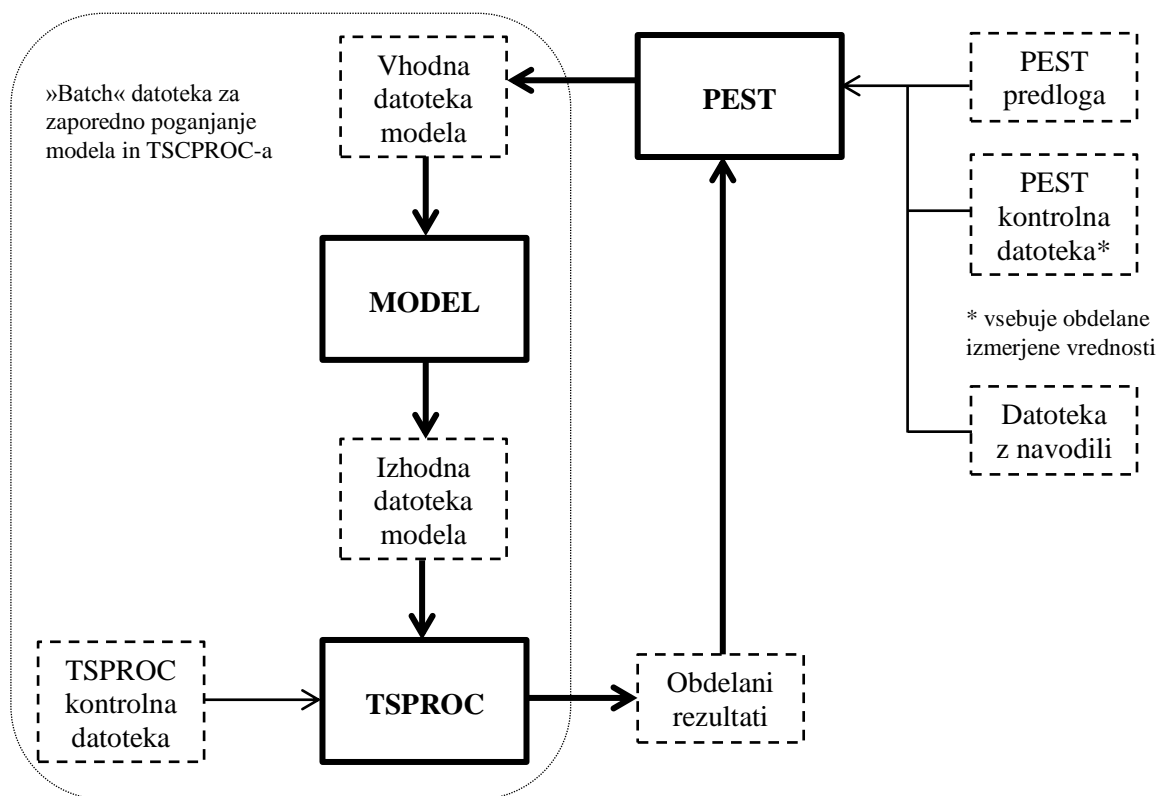
Nekatere funkcije, ki jih ponuja TSPROC so (Westenbroek et al., 2012):

- interpolacija ene časovne serije podatkov na datum in čas druge serije, kar je uporabno, če seriji, ki ju primerjamo, nimata enakega časovnega koraka
- filtriranje serij in ločevanje glede na visoke, srednje in nizke frekvence pojavljanja
- račun akumuliranih volumnov in mas za izbran časovni interval
- račun časa, v katerem vrednosti, simulirane z modelom, presegajo neko izbrano vrednost
- račun statističnih vrednosti kot so povprečje, vsota, minimum, maksimum, standardna variacija za izbran časovni interval
- transformacije serij podatkov, na primer logaritemska
- račun hidroloških statistik kot so velikost, pogostost in trajanje visokih, srednjih ter nizkih pretokov
- izdelava PEST-ove kontrolne datoteke in datoteke z navodili za iskanje opazovanih vrednosti

TSPROC lahko poganjamo kot samostojen program, še posebej pa je uporaben, če ga PEST poganja v kombinaciji z modelom. Postopek je shematično prikazan na sliki 4.3. PEST najprej določi nove vrednosti parametrov, jih zapiše v vhodne datoteke modela in požene model. Ta rezultate simulacije zapiše v izhodne datoteke, ki so hkrati vhodne datoteke za TSPROC. TSPROC obdela časovne serije podatkov na način, ki ga določimo v posebni kontrolni datoteki, in jih zapiše v novo izhodno datoteko. PEST nato obdelane podatke primerja z želenimi vrednostmi, ki so zapisane v njegovi kontrolni datoteki in izračuna nove vrednosti parametrov. Ta postopek se ponavlja, dokler PEST ne določi optimiziranega seta parametrov (Westenbroek et al., 2012).

Kontrolna datoteka za TSPROC je sestavljena iz blokov, pri čemer vsak blok vsebuje navodila za izvajanje ene vrste računske operacije. TSPROC procesira bloke v enakem zaporedju, kot so zapisani v kontrolni datoteki. Bloki imajo podobno strukturo, vsak se začne s ključno besedo START in imenom bloka, ki določa operacijo, ki se bo izvedla. Obstaja 21 vrst blokov, lahko pa seveda blok z istim imenom uporabimo večkrat. Blok se zaključi s ključno besedo END in imenom bloka, vmes pa v predpisani obliki zapisujemo ostale obvezne in neobvezne informacije (Zhulu, 2010).

Preko druge vrstice bloka, ki se vedno začne s ključno besedo CONTEXT, določamo, ali se bo posamezen blok izvedel ali ne. Vrstica deluje kot gumb za vklop/izklop blokov, saj se posamezen blok izvede le v primeru, da je beseda, ki sledi ključni besedi CONTEXT, enaka besedi v prvem bloku. To je uporabno, kadar želimo isto kontrolno datoteko uporabiti tako za izdelavo PEST vhodnih datotek kot tudi za obdelavo rezultatov po vsakem zagonu modela. Najprej v prvem bloku izberemo kontekst, pri katerem se upoštevajo bloki za izdelavo vhodnih datotek, nato pa ga zamenjamo tako, da se izvajajo le ostali bloki. Če je kontekst v nekem bloku »all«, se bo ta blok izvedel v vsakem primeru, ne glede na kontekst v prvem bloku (Zhulu, 2010).



Slika 4.3: Shematičen prikaz delovanja TSPROC-a v kombinaciji s PEST-om (prirejeno po Westenbroek, 2012, str. 5)

Pred začetkom ocenjevanja parametrov s PEST-om je potrebno pripraviti kontrolno datoteko in datoteko z navodili, kar se lahko pri veliki količini podatkov spremeni v zamudno delo. Za vsako opazovano vrednost je namreč potrebna ena vrstica v vhodnih datotekah in če umerjamo model na desetletju podatkov je potrebno napisati več kot 3650 vrstic. TSPROC nam to delo lahko olajša, če v njegovi kontrolni datoteki zapišemo ukaz za izvedbo PEST datotek (Zhulu, 2010).

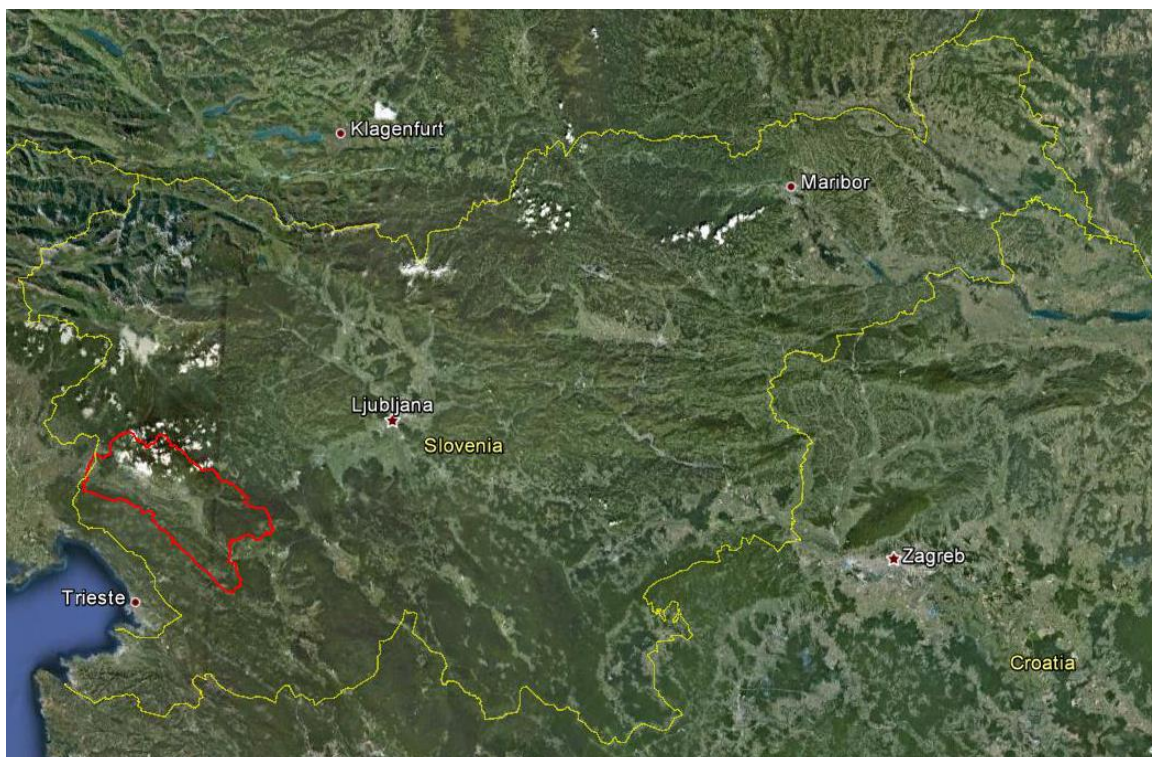
Če želimo, da TSPROC izdela PEST kontrolno datoteko, moramo podati še dve vhodni datoteki s podatki o skupinah parametrov in o samih parametrih, torej podamo vsebino drugega in tretjega sklopa PEST kontrolne datoteke. Ostale dele TSPROC zapiše sam, kot tudi datoteko z navodili za iskanje opazovanih vrednosti (Zhulu, 2010).

5 POREČJE VIPAVE

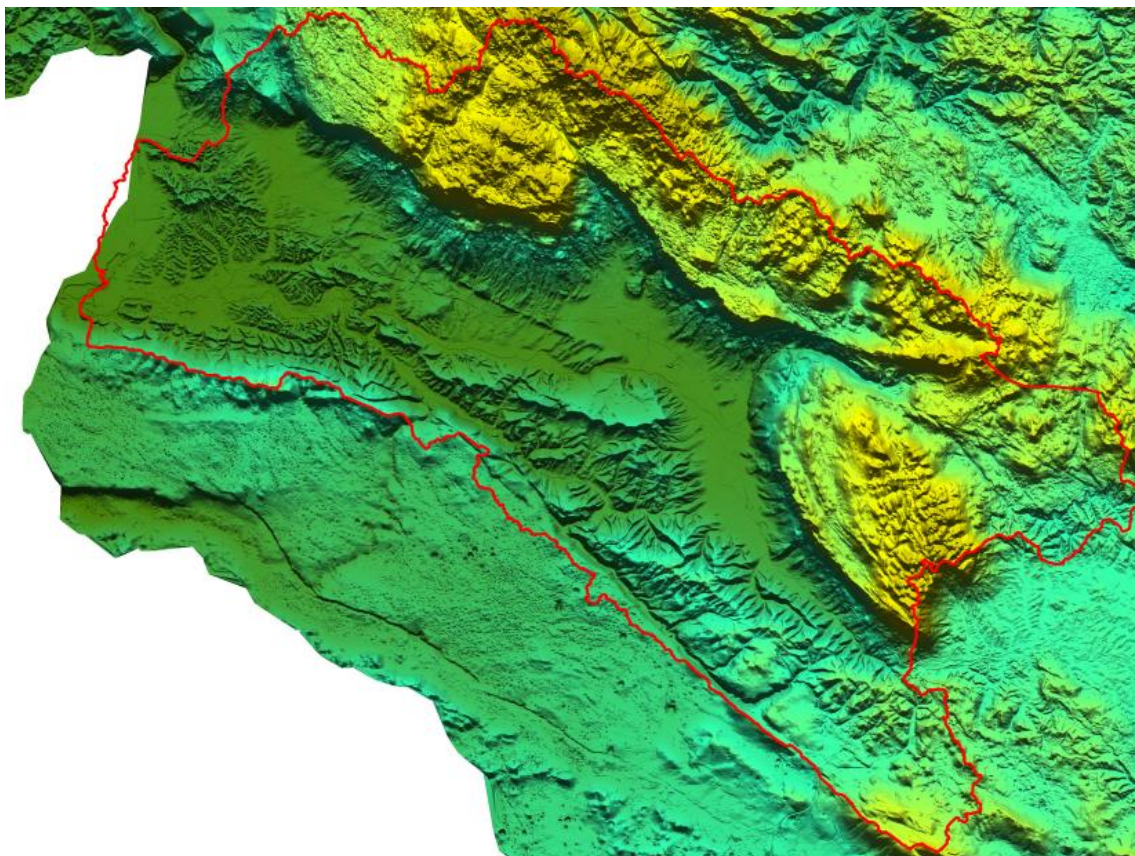
5.1 Lega, relief in geološka sestava

Porečje Vipave zavzema približno 600 km² na zahodu Slovenije (slika 5.1) in je del porečja reke Soče. Meja porečja delno poteka po grebenih visokih dinarskih planot – Trnovskega gozda na severu ter Hrušice in Nanosa na vzhodu. Na jugu porečje meji na pokrajino Kras, od katere je ločeno z dolino reke Branice. Osrednji del porečja predstavlja Vipavska dolina, obsega pa še Goriško polje, Vipavska Brda in greben Vrhe (Atlas okolja).

Porečje sestavljajo kamnine iz kvartarja, terciarja, krede ter jure. Na območju je prisotno tako flišno kot kraško površje. Med nizko planoto Krasa in visokimi kraškimi planotami Nanosa in Trnovskega gozda je nižje flišno ozemlje, v katerem zavzema gričevje okoli $\frac{3}{4}$ površja, preostalo $\frac{1}{4}$ pa ravnina. Vipavska dolina in Goriško polje spadata med flišne regije Submediteranske Slovenije. Fliš kot skupek peščenjaka, ilovic, glin, skrilavcev in vložkov apnenčastih pol je za mehanično razpadanje manj odporna in za vodo manj prepustna kamnina ter je zato nosilec gričevnatega reliefa. Ravnine je več pod Trnovskim gozdom na prodnih vršajih potokov in vzdolž reke Vipave. Med reko Vipavo in Krasom se Vipavsko gričevje dviga v hribovita Vipavska Brda. Trnovski gozd, Nanos in Hrušica so robne visoke dinarske planote, kjer prevladujejo apnenci. Z nadmorsko višino nad 400 m so prva ovira vlažnim zahodnim, jugozahodnim in južnim vetrovom (Gams, 1996). Relief porečja je prikazan na sliki 5.2.



Slika 5.1: Lega porečja Vipave v Sloveniji



Slika 5.2: Relief porečja Vipave

5.2 Hidrografska mreža

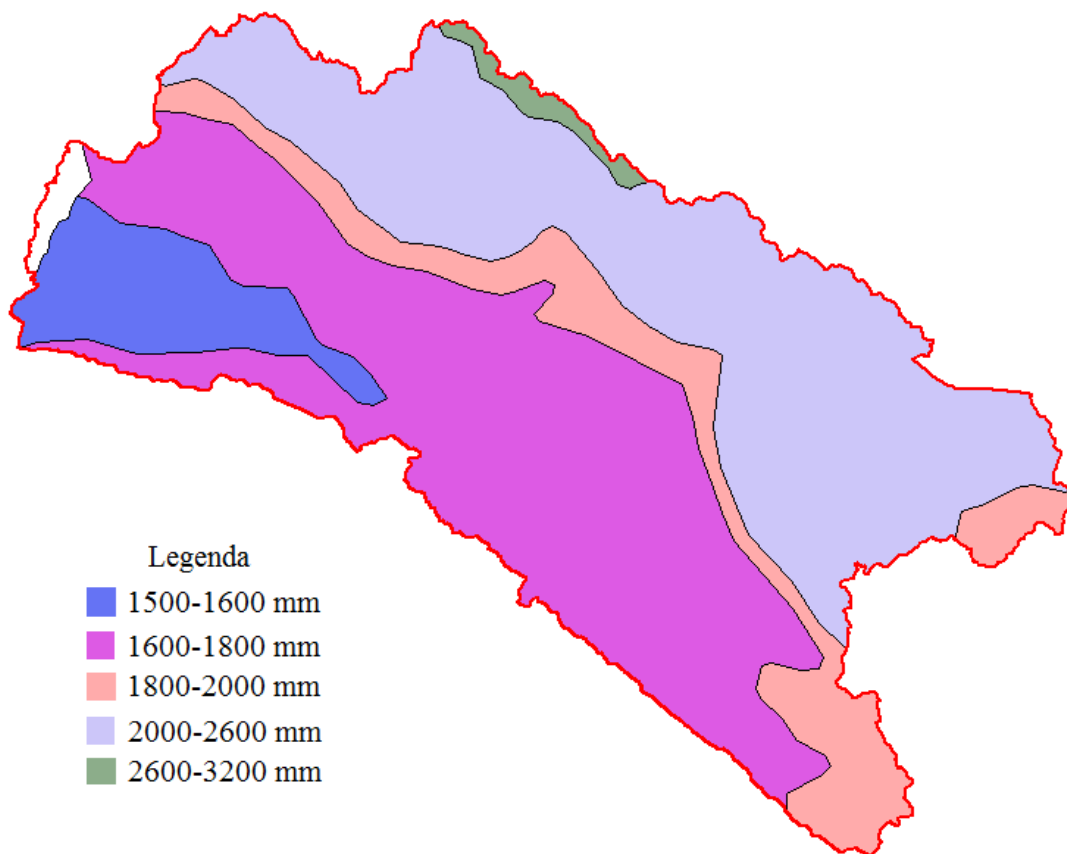
Reka Vipava je dolga 49 km, od tega se v Sloveniji nahaja 44 km. Izvira izpod zahodnega pobočja Nanosa, na stiku flišnih tal in nariva krednih apnencev, ki gradijo Nanos. Vipava ima več kraških izvirov, katerih število je odvisno od padavin v kraškem zaledju. Hidrografsko zaledje Vipave je obsežno, saj reka zbira vodo tudi z zakraselega obrobja, s pobočja Nanosa in Hrušice. Desna pritoka Vipave v zgornjem toku sta potok Močilnik, ki izvira na začetku Vipavske doline, in kraški hudournik Hubelj, ki izvira tik nad Ajdovščino in prinaša s seboj vode z vzhodnega dela Trnovske planote. Kot levi pritok se v Vipavo v Soteskah pri Saksidu izliva reka Branica. Še nižje se zbranim vodam z desne pridruži Lijak, ki prinaša vode z zahodnega dela Trnovske planote. V Lijak se izliva tudi potok Vogršček, na katerem je vodni zadrževalnik s prostornino 3.7 milijonov m³, namenjen namakanju okoliških sadovnjakov. Vipava je v spodnjem toku zaradi nasipavanja reke Soče odrinjena na južni rob Goriškega polja in si pot utira ob vznožju Krasa. Zasip Soče pri Biljah naj bi Vipavi zaprl pot, zato se je ob njenem spodnjem toku ustvarila ravnina z debelimi plastmi gline (Renške dobrane). Tu Vipava teče s počasnim tokom, neznatnim strmecem in izrazitimi meandri, njena struga pa je v površje poglobljena od 2 pa do 10 m pri Biljah. Vipava pri kraju Miren prečka državno mejo in se v bližini naselja Sovodnje kot levi pritok izljuje v Sočo (Posoški razvojni center). Hidrografska mreža porečja Vipave je prikazana na sliki 5.3.



Slika 5.3: Hidrografska mreža poreĀja Vipave

5.2 Podnebje

Na poreĀju Vipave je podnebje submediteransko, z znaĀilnimi toplejšimi jesenmi in zimami. NajveĀ padavin je v jesenskih mesecih, med oktobrom in marcem pa pade vsaj polovica letnih padavin (Gams, 1996). Geografska razporeditev padavin je moĀno povezana z razgibanostjo reliefa. Trnovski gozd in Nanos dobita letno preko 2000 mm padavin, zgornji del Vipavske doline med 1800 in 2000 mm, manj kot 1800 in nad 1600 mm padavin letno pa pade v osrednji Vipavski dolini. Najmanj padavin ima spodnja Vipavska dolina, okoli 1500 mm (Frantar, 2008c). PovpreĀna letna koliĀina padavin je prikazana na sliki 5.4.



Slika 5.4: Povprečne letne višine padavin na porečju Vipave v obdobju 1971–2000 (ARSO)

5.3 Pretoki

Dejavniki, ki vplivajo na velikost pretokov, so: lega, relief, podnebje, kamnine, prsti, rastlinstvo in človek (Frantar et al., 2008). V preglednici 5.1 so zbrane glavne geografske značilnosti porečja Vipave, ki vplivajo na vodno bilanco.

Preglednica 5.1: Glavne geografske značilnosti porečja Vipave (Ulaga, 2003 cit. po Frantar et al., 2008, str. 27)

Nadmorska višina [m]	Povprečna	152.8
	Najmanjša	43
	Največja	1144
Naklon [°]	Povprečni	9.9
	Najmanjši	0
	Največji	55
Padavine [mm]	Povprečje za porečje	1940
Izhlapevanje [mm]	Povprečje za porečje	736
Poroznost [%]	Mešana	0
	Razpoklinska	50.95
	Medzrnska	37.48
	Kraška	11.57

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 5.1

Tip prsti [%]	Psevdooglejene	20.15
	Oglejene	17.51
	Rjave pokarbonatne	27.46
	Rendzine	0.56
	Distrične rjave	0
	Evtrične rjave	34.32
	Akrična tla, šotna tla	0
Gozdne površine [%]	Gozd	61.4
	Negozd	38.6
Tip gozda [%]	Listavci	100
	Iglavci	0
	Mešani	0

V nadaljevanju so opisane značilnosti pretokov Vipave in njenih pritokov glede na podatke Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO) iz obdobja med 1971 in 2000.

Pretočni režim je pokazatelj povprečnega nihanja pretoka reke preko leta. V Sloveniji so pretočni režimi odvisni predvsem od letne razporeditve padavin in temperatur ter od trajanja snežne odeje. Vipava spada v skupino rek z dinarskim dežno-snežnim režimom. Pri tej skupini so spomladanski in jesenski viški dokaj izenačeni, razlike med zimskimi in poletnimi nižki pa zelo izrazite. Nadpovprečna količina vode je običajno med oktobrom in decembrom ter marca in aprila, podpovprečna pa med majem in septembrom. Januarja in februarja se pretoki močno približajo letnemu povprečju (Frantar in Hrvatin, 2008).

Specifični odtok nam pove količino vode, ki odteče v določenem časovnem intervalu na enoto površine. Povprečni specifični odtok med 40 in 50 l/s/km² ima vzhodni in zahodni del južnega roba Trnovskega gozda in Nanosa (zaledje kraških povirij Vipave in Lijaka). Med 20 in 30 l/s/km² odteče z osrednjega dela porečja Vipave ter Močilnika. Majhen specifični odtok med 10 in 20 l/s/km² pa ima osrednja Vipavska dolina (Frantar, 2008b).

Odtočni količnik na območju Vipavske doline z zaledji Vipave (razen povirij): Lijaka, Branice in Močilnika znaša med 0.45 in 0.6. Povirje Vipave ima odtočni količnik med 0.6 in 0.7. Odtočni količnik je izračunan na podlagi rastrskih kart padavin in izhlapevanja (Frantar, 2008a).

5.4 Poplave na območju porečja Vipave

Vipava je kraška reka, takšna sta tudi njena večja desna pritoka Hubelj in Lijak. Zaradi kraškega značaja je razmerje med minimalnim, srednjim in maksimalnim pretokom približno 1:10:100. Reka ima tudi majhen povprečni strmec (1.5 ‰), zato so bile v preteklosti poplave pogoste in nasploh je bila prst v Vipavski dolini mokrotna in zamočvirjena. V 80. letih 20. stoletja so z obsežnimi melioracijami uredili 9000 ha kmetijskih zemljišč, del osušili z omrežjem odvodnih kanalov, del pa uredili za umetno namakanje (Komac et al., 2008). Z gradbenimi posegi so izravnali meandre v zgornjem in srednjem toku reke in tako povečali njihovo pretočnost. Vendar pa se zato danes pojavljajo poplave v spodnjem toku. Tudi večina potokov v Vipavski dolini je zaradi izboljšanja kmetijskih zemljišč reguliranih. Pred ukrepi so vijugali v ozkih in plitvih strugah ter poplavljali

travnike. Visoke vode so v povprečju vsakih 20 let poplavlile okoli 700 ha zemljišč. (Posoški razvojni center).

Poplave najpogosteje nastanejo po dolgotrajnem, večdnevnem zmernem deževju ali pa zaradi lokalno omejenih kratkotrajnih in močnih nalivov. Poleg količine padavin na obseg poplav vplivata tudi časovna razporeditev in intenziteta padavin. Padavine z maksimumom proti koncu dogodka povzročijo bistveno večje konice odtoka od padavin z maksimumom na začetku. Zelo pomembna je tudi količina vlage v tleh ali predhodna namočenost. Čim večja je predhodna vlažnost tal, tem večja količina vode odteče površinsko (Kobold, 2009). V diplomski nalogi smo pri simulaciji pretokov Vipave zajeli večje visokovodne dogodke iz zadnjih let. Sledi kratek opis hidroloških situacij.

29. in 30. 3. 2009 je v zahodni Sloveniji padlo do 200 mm padavin. Voda je največ škode naredila na Vipavskem in Goriškem, kjer je najbolj poplavljalna reka Vipava. Na vodomerni postaji Miren je bil izmerjen največji pretok $378 \text{ m}^3/\text{s}$, ki ustreza 50–100-letni povratni dobi. V zgornjem toku je imela Vipava pretok z 10-letno povratno dobo. Poplavljali so tudi Branica na Goriškem, Močilnik v Podnanosu in Lijak. Tudi pretok na izviru Hublja je bil izredno velik (ARSO, 2009b).

Od 23. do 27. 12. 2009 so prehodi nekaj ciklonskih območij ter narivanje vlažnih zračnih mas povzročili obline padavine predvsem v zahodni polovici države. Poplavljala je Vipava, v Dolenju je bil največji izmerjen pretok v opazovanem obdobju. Visokovodne konice so imele 10 in več letno povratno dobo. Hkrati z Vipavo so močno narasli tudi njeni pritoki, izjemno vodnat je bil izvir Hubelj (ARSO, 2009a).

Med 17. in 19. 9. 2010 so Slovenijo zajele močne in obsežne padavine, ki so povzročile močan porast rek in razlivanja vodotokov po celi državi. Največ padavin je padlo na območju med Ajdovščino in Idrijo, lokalno prek 500 mm. V Dolenju je pretok Vipave dosegel 100-letno povratno dobo. Na postaji v Mirnu so bili zapisi uničeni, ker je bila poplavljena (ARSO, 2010a).

Med 6. in 9. 12. 2010 je območje zajela odjuga z dežjem, zaradi česar je Vipava poplavljala. Šlo je za dogodek z 10-letno povratno dobo. Ponovno je prišlo do povišanja pretokov med 20. in 25. 12. 2010. V Vipavski dolini je bilo izmerjeno okoli 100 mm padavin, nastopila je tudi odjuga. Vipava je dosegla 2-letno povratno dobo (ARSO, 2010b in ARSO, 2010c).

Od 26. do 28. 10. 2012 je vlažen jugozahodni veter prinašal obilne padavine, ki so povzročile naraščanje rek, predvsem na Vipavskem. Vipava s pritoki je dosegla pretoke s povratno dobo do 100 let. Največje poplave so bile ob Vipavi in na nekaterih njenih pritokih (Lijak). V Dolenju, Dornberku in Mirnu so izmerili največji pretok v času delovanja postaj. Branica je dosegla pretok s povratno dobo 25-50 let (ARSO, 2012).

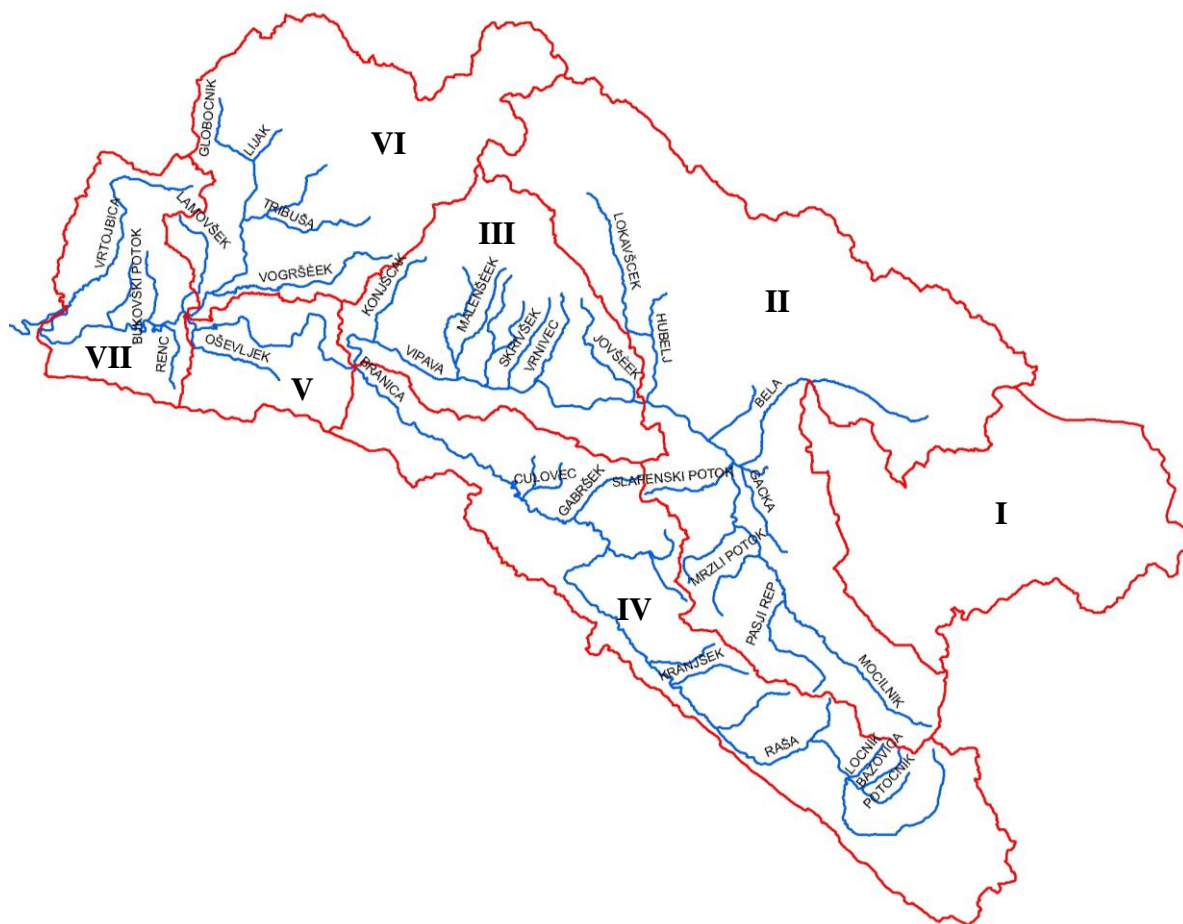
6 IMPLEMENTACIJA MODELA HBV-LIGHT NA POREČJE VIPAVE

6.1 Zgradba modela

Osnovo HBV-light modela z dnevnimi podatki je predstavljal model HBV-96 porečja Vipave, ki je bil izdelan na Katedri za splošno hidrotehniko (Primožič in Brilly, 2012). Uporabljeni so enaki vhodni podatki, ki pa se pri novejši verziji modela podajajo na drugačen način. Izbrana je bila linearna različica standardnega HBV-light modela z dvema rezervoarjema in dvema iztokoma iz zgornjega rezervoarja, ki je prikazan na sliki 3.8a.

6.1.1 Razdelitev porečja na podpovodja ter elevacijsko-vegetacijske enote

Porečje Vipave je glede na orografske razvodnice razdeljeno na 7 podpovodij (slika 6.1), ki so oštevilčena in z izjemo prvih dveh podpovodij poimenovana po glavnem vodotoku na območju, bodisi je to pritok Vipave ali pa odsek Vipave med pritoki. Prvo podpovodje predstavlja kraško zaledje Vipave brez površinskih vodotokov, drugo podpovodje pa pripada izvirom Vipave ter pritokom Močilniku, Hublju in Beli. V preglednici 6.1 je prikazan seznam podpovodij s pripadajočimi površinami. Zaporedne številke podpovodij predstavljajo tudi vrstni red računanja v modelu.

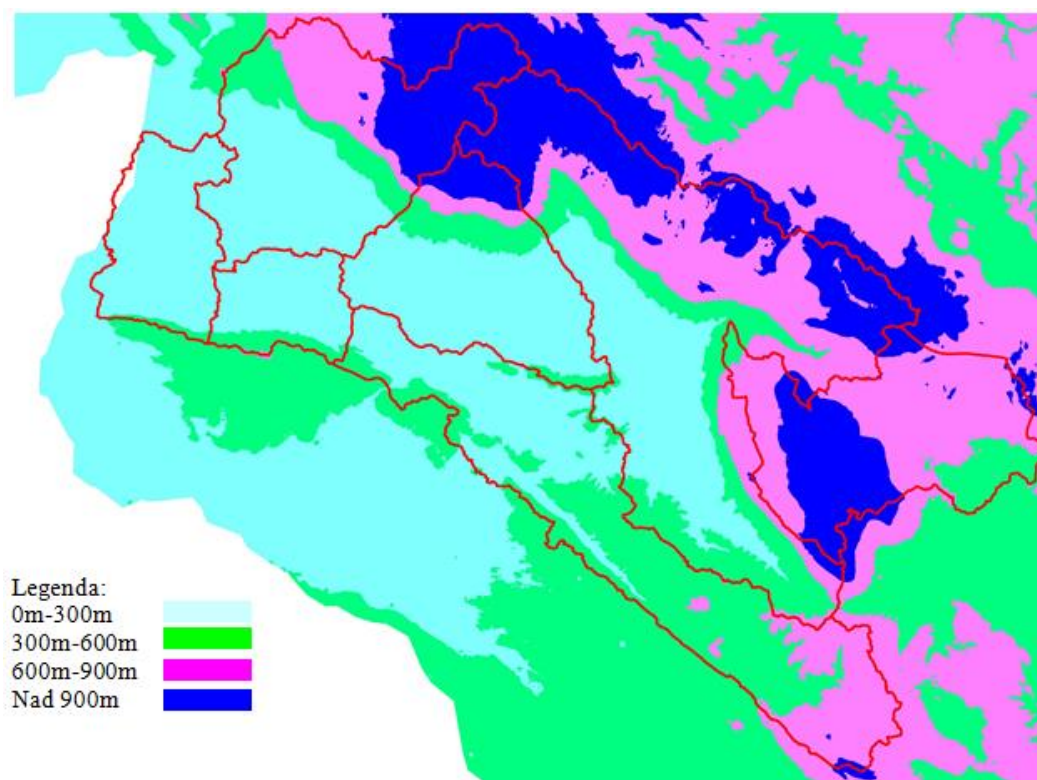


Slika 6.1: Podpovodja z mrežo vodotokov

Preglednica 6.1: Razdelitev porečja Vipave na podpovodja

Št. podpovodja	Ime podpovodja	Glavni vodotok	Površina [km ²]
I	Kras I	/	90.93
II	Kras II	Močilnik, Bela	215.23
III	Vipava I	Vipava	76.28
IV	Branica	Branica	128.91
V	Vipava II	Vipava	27.11
VI	Vogršček	Lijak, Vogršček	104.48
VII	Vipava III	Vipava	42.59
Vsota			685.53

Posamezno podpovodje je potrebno razdeliti na elevacijsko-vegetacijske enote (EVU). Glede na relief območja je bila izbrana delitev na 4 višinske pasove s korakom 300 m nadmorske višine (slika 6.2). Površina višinskega pasu v podpovodju predstavlja eno višinsko območje, ki se nadalje deli na elevacijsko-vegetacijske enote glede na rabo tal. Model HBV-96 dopušča le delitev na dve vegetacijski območji, in sicer na površino, pokrito z gozdom, in preostalo površino. Čeprav je v HBV-light modelu možno definirati več vegetacijskih območij, je bila izbrana enaka delitev. Račun akumulacije in taljenja snega ter račun vlage v tleh se izvedeta ločeno za posamezno območje, kar pomeni, da lahko vsakemu območju pripišemo svoje vrednosti parametrov. V preglednici 6.2 so zbrani deleži posameznih višinskih območij ter elevacijsko-vegetacijskih enot. Površine, pokrite z gozdom, so označene s črko F, preostale površine pa s črko N. V model HBV-light moramo podati deleže elevacijsko-vegetacijskih enot iz zadnjega stolpca preglednice 6.2 ter površine posameznih podpovodij.



Slika 6.2: Višinska območja na porečju Vipave

Preglednica 6.2: Razdelitev podpovodij na višinska in vegetacijska območja

Št. podpovodja	Ime podpovodja	Višinski pas [m n.v.]	Delež višinskega območja	Raba tal	Delež EVU glede na površino višinskega območja	Delež EVU glede na površino podpovodja
I	Kras I	300 - 600	0.118	F	0.37	0.044
				N	0.63	0.074
		600 - 900	0.555	F	0.70	0.389
				N	0.30	0.167
		900 -	0.327	F	0.95	0.310
				N	0.05	0.016
Skupaj	1		Skupaj	1		
II	Kras II	0 - 300	0.267	F	0.10	0.027
				N	0.90	0.240
		300 - 600	0.195	F	0.60	0.117
				N	0.40	0.078
		600 - 900	0.270	F	0.50	0.135
				N	0.50	0.135
		900 -	0.268	F	0.80	0.214
				N	0.20	0.054
		Skupaj	1		Skupaj	1
		III	Vipava I	0 - 300	0.703	F
N	0.87					0.612
300 - 600	0.150			F	0.59	0.088
				N	0.41	0.062
600 - 900	0.053			F	0.81	0.043
				N	0.19	0.010
900 -	0.094			F	0.73	0.069
				N	0.27	0.025
Skupaj	1				Skupaj	1
IV	Branica			0 - 300	0.348	F
		N	0.68			0.237
		300 - 600	0.453	F	0.38	0.172
				N	0.62	0.281
		600 - 900	0.199	F	0.65	0.129
				N	0.35	0.070
Skupaj	1		Skupaj	1		
V	Vipava II	0 - 300	0.837	F	0.17	0.142
				N	0.83	0.694
		300 - 600	0.163	F	0.80	0.131
				N	0.20	0.033
Skupaj	1		Skupaj	1		

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 6.2

VI	Vogršček	0 - 300	0.427	F	0.30	0.128
				N	0.70	0.299
		300 - 600	0.127	F	0.70	0.089
				N	0.30	0.038
		600 - 900	0.190	F	0.75	0.142
				N	0.25	0.048
900 -	0.256	F	0.95	0.243		
		N	0.05	0.013		
Skupaj		1		Skupaj	1	
VII	Vipava III	0 - 300	0.966	F	0.35	0.338
				N	0.65	0.628
		300 - 600	0.034	F	0.80	0.027
				N	0.20	0.007
Skupaj		1		Skupaj	1	

6.1.2 Merilna mesta

Podatki o količini padavin so bili pridobljeni z 12 meteoroloških postaj Agencije RS za okolje, ki se nahajajo na porečju Vipave ali v bližini. Večina postaj je padavinskih, kar pomeni, da meritve in opazovanja izvaja opazovalec enkrat dnevno ob 7. uri po srednjeevropskem času. Štiri izmed izbranih postaj so avtomatske, na njih meritve padavin potekajo avtomatično na 5 minut. V preglednici 6.3 so označene z *.

Preglednica 6.3: Merilna mesta padavin

Številka merilnega mesta	Ime merilnega mesta	Nadmorska višina [m]
78	Mrzla Rupa	930
81	Črni vrh nad Idrijo	683
83	Otlica	840
86	Lokve	955
97	Bilje*	51
98	Zalošče	67
99	Šempas	104
107	Godnje*	335
136	Postojna*	501
141	Razdrto	577
144	Podkraj*	799
145	Hrušica pri Colu	872

* postaja je avtomatska

Izmerjeno dnevno količino padavin ob 7. uri nekega dne smo pripisali predhodnemu dnevu. Meritve padavin so točkovne, model HBV-light pa kot vhodni podatek zahteva skupno količino padavin na posameznem podpovodju. Za pretvorbo točkovnih vrednosti v ploskovne je bila uporabljena metoda Thiessenovih poligonov, pri kateri predpostavimo, da na celotnem območju Thiessenovega poligona posameznega merilnega mesta pade enaka količina padavin. Količino padavin na posameznem

podpovodju nato izračunamo s pomočjo uteži, ki predstavljajo razmerje med površino podpovodja, ki jo pokriva Thiessenov poligon izbranega merilnega mesta ter celotno površino podpovodja. Merilna mesta padavin in Thiessenovi poligoni, ki jim pripadajo, so prikazana na sliki 6.3, uteži pa v preglednici 6.4.



Slika 6.3: Merilna mesta padavin s Thiessenovimi poligoni

Preglednica 6.4: Uteži za izračun padavin na podpovodjih

Št. podpovodja	Ime podpovodja	Št. postaje	Utež
I	Kras I	136	0.04
		141	0.17
		144	0.39
		145	0.41
II	Kras II	78	0.04
		81	0.07
		83	0.44
		86	0.01
		107	0.04
		141	0.15
		144	0.24

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 6.4

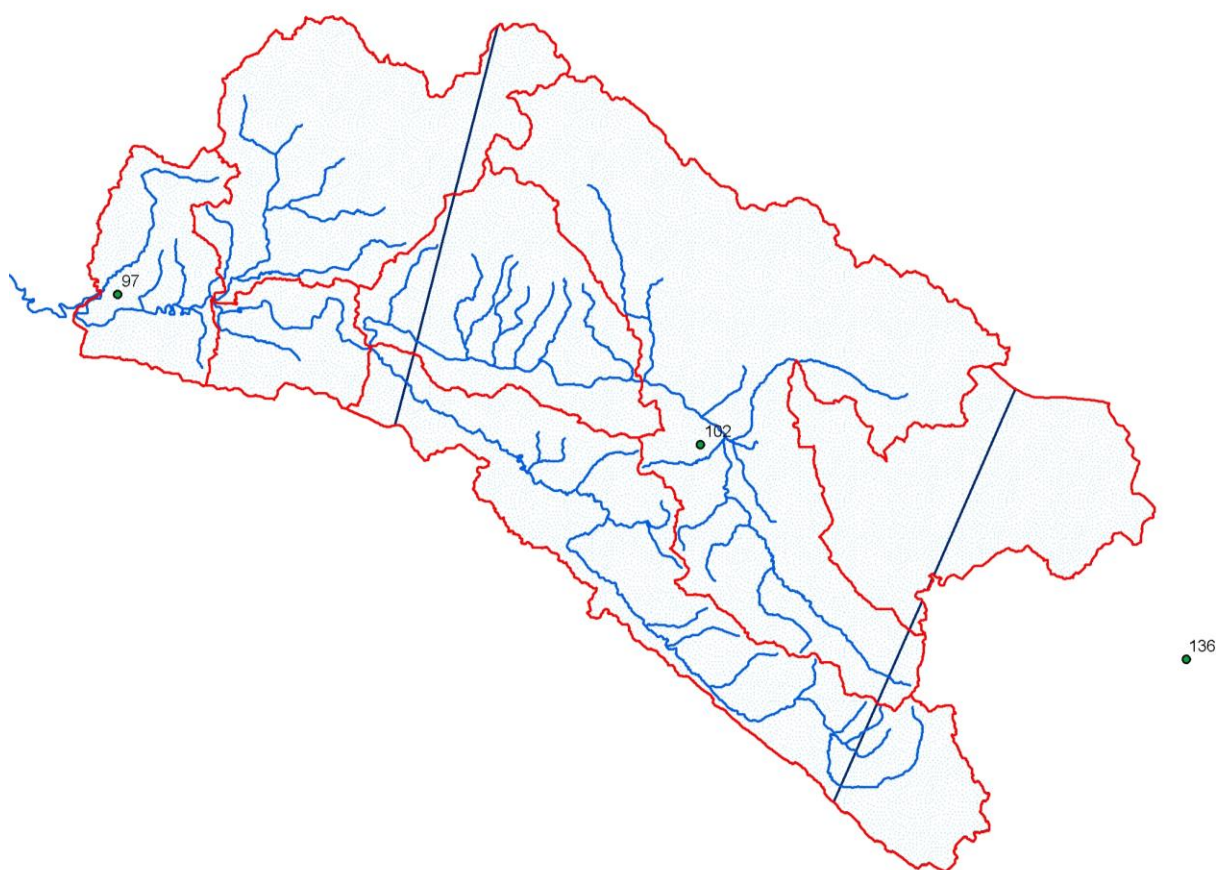
III	Vipava I	83	0.46
		98	0.49
		99	0.05
IV	Branica	83	0.04
		98	0.17
		107	0.38
		141	0.41
V	Vipava II	97	0.09
		98	0.91
VI	Vogršček	78	0.03
		86	0.22
		97	0.02
		98	0.05
		99	0.68
VII	Vipava III	97	0.92
		99	0.08

Podatki o povprečni dnevni temperaturi zraka in potencialni evapotranspiraciji so bili pridobljeni s 3 meteoroloških postaj Agencije RS za okolje (preglednica 6.5). Ponovno je bila za izračun ploskovnih vrednosti uporabljena metoda Thiessenovih poligonov. Merilna mesta s pripadajočimi Thiessenovimi poligoni so prikazana na sliki 6.4, uteži pa v preglednici 6.6.

Temperatura zraka sicer ni bistvenega pomena, saj nastopa le pri računskem postopku za sneg. Evapotranspiracija v modelu ni odvisna od temperature zraka, ker kot vhodni podatek nismo podali datoteke z dolgoletnimi povprečnimi vrednostmi temperature in zato velikost evapotranspiracije ni korigirana glede na odstopanje temperature od povprečja ter vrednost parametra *CET*. Postaja Slap je leta 2007 prenehala delovati, zato so manjkajoči podatki o temperaturi zraka izračunani glede na korelacijo s postajo Bilje. Potencialna evapotranspiracija je bila v model HBV-light vnesena v obliki 12 povprečnih dnevni vrednosti za posamezen mesec v letu. Povprečja so bila izračunana na podlagi podatkov o dnevni vrednosti potencialne evapotranspiracije v letih 1989, 1995, 1998, 2003 in 2010 (oziroma 2006 v primeru postaje Slap). Za izračun potencialne evapotranspiracije na merilnih mestih na ARSO uporabljajo Penman-Monteithovo metodo, ki upošteva naslednje meteorološke spremenljivke: temperaturo zraka, relativno zračno vlago, hitrost vetra in sončno sevanje (ARSO).

Preglednica 6.5: Merilna mesta temperatur in evapotranspiracije

Številka merilnega mesta	Ime merilnega mesta	Nadmorska višina [m]
97	Bilje	51
102	Slap	133
136	Postojna	501



Slika 6.4: Merilna mesta temperatur in evapotranspiracije s Thiessenovimi poligoni

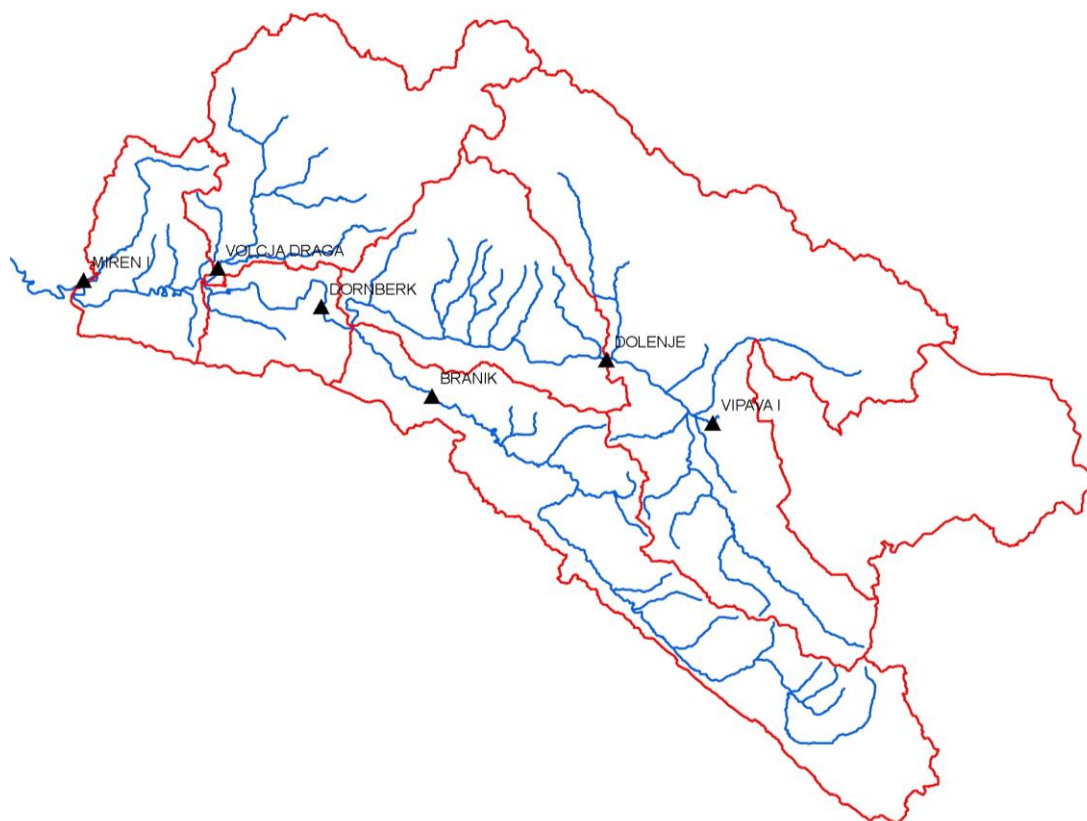
Preglednica 6.6: Uteži za izračun temperatur in evapotranspiracije na podpovodjih

Št. podpovodja	Ime podpovodja	Št. postaje	Utež
I	Kras	102	0.52
		136	0.48
II	Kras II	102	0.99
		136	0.01
III	Vipava I	102	0.86
		97	0.14
IV	Branica	97	0.04
		102	0.73
		136	0.23
V	Vipava II	97	1.00
VI	Vogršček	97	0.87
		102	0.13
VII	Vipava III	97	1.00

Za primerjavo simuliranih pretokov z izmerjenimi so bili uporabljeni podatki s 6 vodomernih postaj Agencije RS za okolje (preglednica 6.7, slika 6.5). Ker model simulira pretoke na iztoku iz podpovodij, je zaželeno, da se merilna mesta nahajajo čim bližje tem mestom. Pri podpovodjih Kras II, Vogršček in Vipava III je temu pogoju zadoščeno, tudi za podpovodje Kras I je ustrezna postaja Vipava I na izviru Vipave. Na Branici sicer obstaja vodomerna postaja Branik, vendar je precej oddaljena od iztoka v Vipavo. Zato smo za kontrolo iztoka iz podpovodja Branica izmerjene vrednosti s postaje Branik pomnožili s faktorjem 1.1 ter tako predpostavili, da se pretok Branice med postajo Branik in iztokom v Vipavo poveča za 10 %. Postaja Dornberk se nahaja dolvodno od iztoka Branice v Vipavo, torej je v meritvah zajet tudi pretok Branice. Zato smo za kontrolo iztoka iz podpovodja Vipava I izmerjene vrednosti s postaje Dornberk zmanjšali za predpostavljeni pretok Branice pri izlivu v Vipavo. Podpovodje Vipava II nima ustreznega kontrolnega mesta. Kontrolna mesta posameznih podpovodij so prikazana v preglednici 6.8. Enota za pretoke v programu HBV-light je mm/ Δt , zato je bilo potrebno med pripravo vhodnih podatkov izmerjene vrednosti z merilnih mest ustrezno pretvoriti in pri tem upoštevati površino zbirne površine.

Preglednica 6.7: Merilna mesta pretokov

Številka merilnega mesta	Ime merilnega mesta
8560	Vipava I
8565	Dolenje
8590	Dornberk
8601	Miren I
8640	Branik
8660	Volčja Draga



Slika 6.5: Merilna mesta pretokov

Preglednica 6.8: Kontrolna mesta podpovodij

Št. podpovodja	Ime podpovodja	Kontrolno mesto
I	Kras I	8560
II	Kras II	8565
III	Vipava I	8590 – 8640 * 1.1
IV	Branica	8640 * 1.1
V	Vipava II	/
VI	Vogršček	8660
VII	Vipava III	8601

6.2 Kalibracija in validacija modela z dnevni časovnim korakom

HBV-light model porečja Vipave je bil umerjen na obdobju od 1. 1. 2005 do 31. 12. 2008, pri čemer smo prvega pol leta uporabili kot »ogrevalno obdobje« za določitev začetnega stanja. Kalibracija je bila izvedena avtomatizirano s programom za ocenjevanje parametrov PEST. Pri izbranem tipu modela HBV-light z dvema vegetacijskima območjema odtok s posameznega podpovodja določa 22 parametrov, ki jih je bilo potrebno umeriti. Umerjanje je bilo izvedeno za vsako podpovodje posebej, v enakem zaporedju kot so podpovodja oštevilčena. Pri umerjanju podpovodij št. II, III in VII, ki ne pripadajo pritokom Vipave, smo upoštevali parametre predhodno umerjenih podpovodij. Podpovodja št. V ni bilo mogoče umeriti, ker zanj ne obstaja kontrolno merilno mesto pretokov. Parametri so določeni tako, da se izmerjene in simulirane vrednosti pretokov v obdobju od 1. 7. 2005 do 31. 12. 2008 kar se da ujemajo.

Za vsako podpovodje, ki smo ga želeli umeriti, je bilo potrebno pripraviti tri PEST vhodne datoteke: predlogo z definiranimi lokacijami parametrov, datoteko z navodili za iskanje opazovanih vrednosti ter kontrolno datoteko.

Vsi parametri modela HBV-light se nahajajo v datoteki Parameter.xml. Njihove vrednosti si sledijo v določenem zaporedju, za vsako podpovodje so zbrane v svojem sklopu. Za predlogo smo uporabili datoteko z enako strukturo, le mesta z vrednostmi parametrov podpovodja, ki smo ga želeli umeriti, smo zamenjali z ustreznimi znaki in s tem omogočili PEST-u, da je na ta mesta v optimizacijskih iteracijah zapisoval različne vrednosti, ki jih je model HBV-light nato uporabil pri simulaciji pretokov.

Rezultati simulacije modela HBV-light se za vsako podpovodje nahajajo v ločeni datoteki, vendar imajo vse datoteke enako strukturo. Datoteka z navodili za iskanje opazovanih vrednosti je tako enaka za vsa podpovodja, spreminja pa se ime izhodne datoteke modela, v kateri PEST poišče rezultate simulacij. Število opazovanih vrednosti oziroma simuliranih pretokov je 1280.

Primer kontrolne datoteke za umerjanje podpovodja Vipava III se nahaja v prilogi B. Vrednosti spremenljivk, ki definirajo izvajanje GML algoritma, smo določili glede na priporočene vrednosti (Doherty, 2005) ter vrednosti, ki so bile uporabljene v študiji Norveškega direktorata za vodne vire in energijo (Lawrence et al., 2009). Pred umerjanjem porečja Vipave smo jih preizkusili na sintetičnem primeru, pri čemer so se izkazale za ustrezne. Parametre smo glede na način računanja odvodov združili v 15 skupin z različnimi vrednostmi prirastkov. Pri nekaterih parametrih smo uporabili logaritmično transformacijo, s katero naj bi dosegli boljše rezultate optimizacije. Mejne in začetne vrednosti parametrov smo določili glede na podatke iz literature (Lawrence et al., 2009, Seibert in Vis, 2012). V primeru, da je PEST kot rezultat optimizacijskega postopka podal mejno vrednost nekega

parametra, smo meje povečali in PEST ponovno pognali. S tem smo preverili, ali obstaja ustrežnejši set parametrov z vrednostmi izven prvotnih meja. Izmerjeni pretoki, s katerimi PEST primerja opazovane vrednosti, so podani v petem sklopu kontrolne datoteke. Ker so opazovane vrednosti enake vrste in velikostnega reda, jih nismo utežili. Vse torej pripadajo isti skupini in v enaki meri vplivajo na velikost ciljne funkcije. Kontrolne datoteke za umerjanje posameznih podpovodij so si precej podobne, razlikujejo se le v stolpcu z izmerjenimi vrednostmi pretokov, imenu predloge ter imenu izhodne datoteke modela HBV-light, v kateri se nahajajo simulirani iztoki iz izbranega podpovodja.

Osnovo za datoteko z navodili za iskanje opazovanih vrednosti in osnovo kontrolnih datotek smo izdelali s pomočjo programa TSPROC, ki je določil ustrezno število vrstic in strukturo datotek. Med samim postopkom optimizacije s PEST-om pa programa TSPROC nismo uporabili, saj smo želeli primerjati simulirane pretoke z izmerjenimi. Ker so oboji že podani v izhodnih datotekah modela HBV-light, rezultatov simulacije ni bilo potrebno nadalje obdelovati in z uporabo programa TSPROC ne bi nič pridobili, le postopek optimizacije bi bil bolj zamuden.

Za validacijo modela HBV-light porečja Vipave smo uporabili podatke iz obdobja med 1. 1. 2009 in 31. 12. 2010. Vodomerne postaje Branik na Branici v tem času nima podatkov o pretokih, zato validacije za podpovodji Vipava I in Branica ni bilo mogoče izvesti. Vrednosti Nash-Suttclifovega kriterija R_{eff} za obdobji kalibracije in validacije so prikazane v preglednici 6.9.

Preglednica 6.9: Vrednosti R_{eff} za obdobje kalibracije in validacije modela z dnevним časovnim korakom

Št. podpovodja	Ime podpovodja	R_{eff} za obdobje kalibracije	R_{eff} za obdobje validacije
I	Kras I	0.7812	0.8973
II	Kras II	0.7863	0.8600
III	Vipava I	0.8350	/
IV	Branica	0.2124	/
V	Vipava II	/	/
VI	Vogršček	0.4933	0.7037
VII	Vipava III	0.8024	0.8456

Najvišji R_{eff} v obdobju kalibracije imata podpovodji Vipava I in Vipava III, lahko ju smatramo za dobro umerjeni, ker vrednost Nash-Suttclifovega kriterija presega 0.8. Podpovodji Kras I in Kras II v obdobju kalibracije sicer ne dosežata zelene vrednosti R_{eff} , vendar pa je simulacija iztoka iz teh dveh podpovodij zelo dobra v obdobju validacije, za podpovodje Kras I se vrednost R_{eff} celo približa 0.9. Pri umerjanju podpovodij št. IV in VII se je izkazalo, da dobre simulacije ne moremo doseči. V primeru Branice je možen vzrok način, na katerega smo upoštevali izmerjene pretoke s postaje Branik. Te smo namreč zaradi lokacije postaje pomnožili s faktorjem 1.1, kar je lahko napačna ocena. Drugi razlog za slabo obnašanje modela pa je lahko kraško površje na območju podpovodja Branica, zaradi katerega nekaj vode ponikne ter podzemno odteče proti Italiji. To pomeni, da postaja Branik ne izmeri celotnega odtoka s prispevne površine, česar v modelu ne moremo upoštevati. V primeru podpovodja št. VII pa na izmerjene pretoke vpliva tudi delovanje zadrževalnika Vogaršček, zato se simulirani in izmerjeni pretok ne ujemata najbolje. V obdobju validacije vrednost R_{eff} za podpovodje Vogaršček sicer naraste na 0.7. Ker sta podpovodji Branica in Vogaršček zelo slabo umerjeni, rezultati simulacij v nadaljevanju niso prikazani. Podpovodju Vipava II, ki nima kontrolnega mesta pretokov, smo pri umerjanju pripisali podobne vrednosti parametrov, kot jih imajo ostala umerjena podpovodja.

Od vseh podpovodij je najbolj pomembna kvaliteta simulacije pretoka v zadnjem podpovodju, ker predstavlja iztok iz porečja Vipave. Vrednosti R_{eff} za podpovodje Vipava III so ustrezne tako v obdobju kalibracije kot v obdobju validacije. V splošnem je obnašanje modela v obdobju validacije boljše kot v obdobju kalibracije, s čimer smo potrdili, da model lahko dobro simulira pretoke tudi na podlagi neodvisne serije podatkov. Vrednosti parametrov umerjenega modela z dnevnim časovnim korakom so prikazane v prilogi C.

Slika 6.6 prikazuje primerjavo simuliranih in izmerjenih pretokov v mm/dan za obdobje kalibracije, slika 6.7 pa za obdobje validacije za podpovodja Kras I, Kras II in Vipava III. Na sliki 6.8 so prikazani pari simuliranih in izmerjenih pretokov v m^3/s ter regresijske premice. Regresijska premica najbolje opisuje linearno odvisnost med izmerjenimi in simuliranimi pretoki. Enačba regresijske premice je definirana kot:

$$y = A + Bx, \quad (6.1)$$

pri čemer sta A in B parametra regresijske premice. Odstopanje točk od regresijske premice merimo s standardnim odklonom SD , ki je definiran z enačbo:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - (A + B x_i))^2}{N-2}}, \quad (6.2)$$

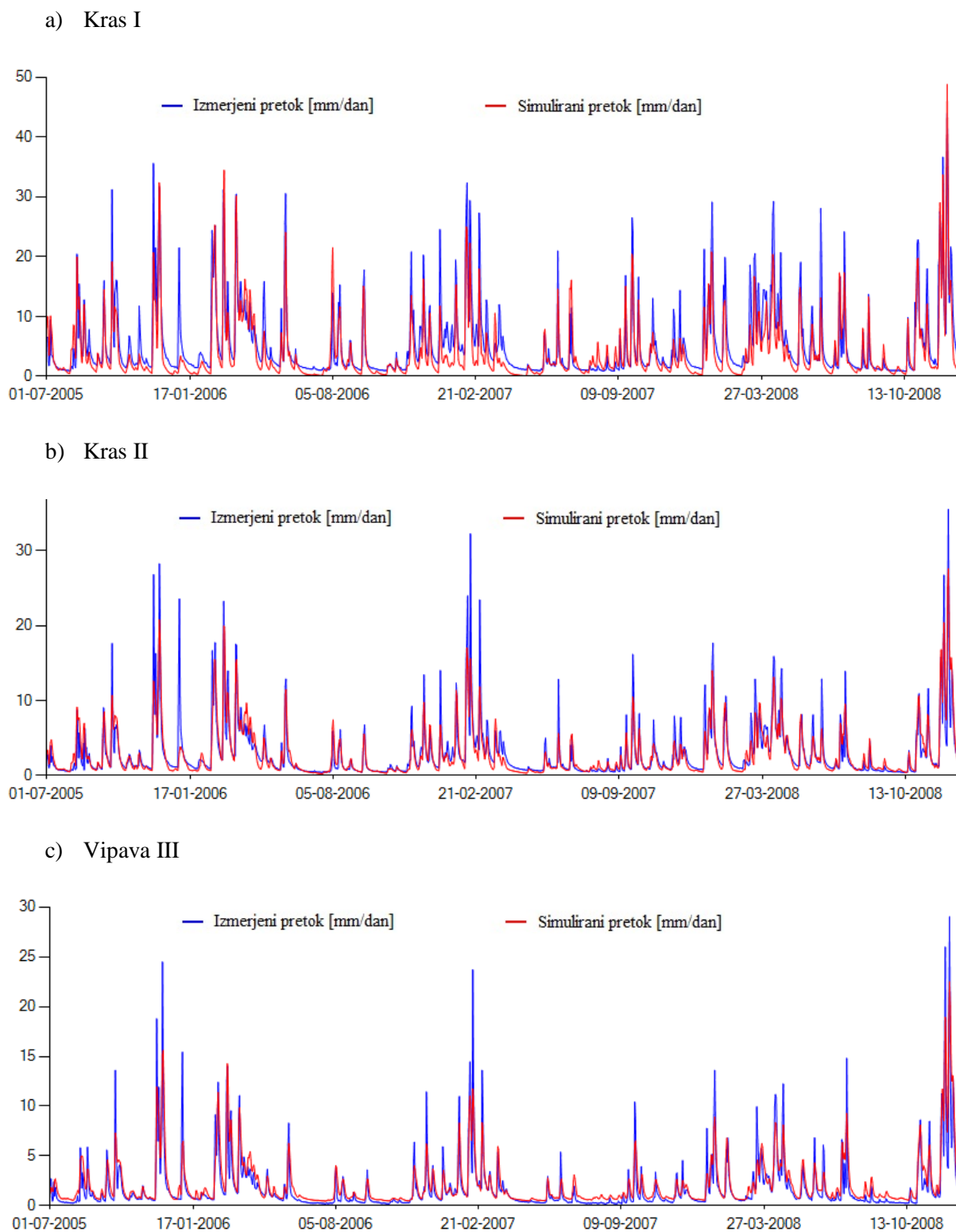
v kateri je N število točk, x_i in y_i pa so vrednosti simuliranih in izmerjenih pretokov.

V preglednici 6.10 so zbrane enačbe regresijskih premic ter standardni odkloni za pretoke podpovodij Kras I, Kras II in Vipava III v m^3/s za obdobje kalibracije in validacije modela.

Preglednica 6.10: Analiza simuliranih in izmerjenih dnevnih pretokov

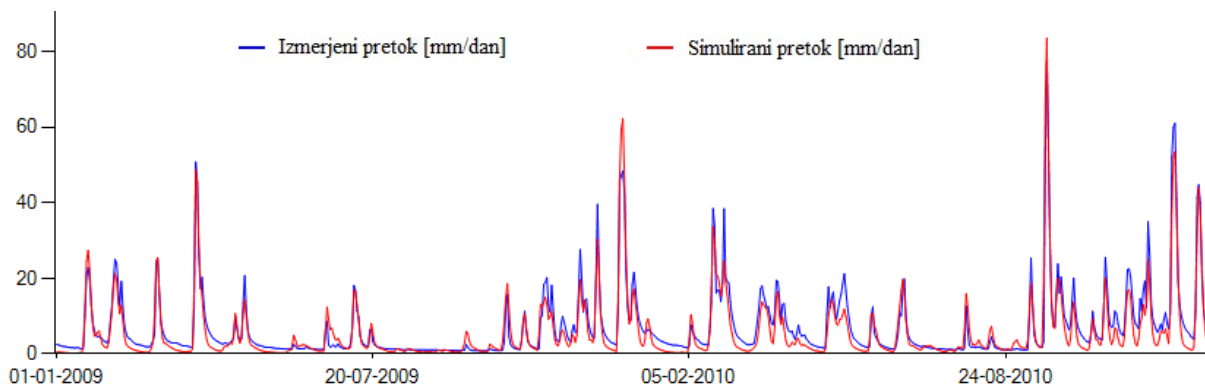
Št. podpovodja	Ime podpovodja	Obdobje	Enačba regresijske premice	SD [m^3/s]
I	Kras I	kalibracije	$y = 1.0009 x + 1.1393$	2.7078
I	Kras I	validacije	$y = 0.9732 x + 1.3208$	2.8591
II	Kras II	kalibracije	$y = 0.9894 x + 0.4423$	6.2301
II	Kras II	validacije	$y = 1.1335 x - 1.5510$	9.6211
VII	Vipava III	kalibracije	$y = 1.0098 x - 2.8365$	9.4739
VII	Vipava III	validacije	$y = 1.0145 x - 5.3770$	16.2064

Pri umerjanju modela s PEST-om rezultat niso le optimizirane vrednosti parametrov, pač pa si je vredno ogledati tudi izhodno datoteko z občutljivostmi parametrov. S pomočjo njene vsebine lahko identificiramo tiste parametre modela, katerih spremembe najbolj vplivajo na vrednosti simuliranih pretokov oziroma na ujemanje simuliranih in izmerjenih pretokov. PEST izračuna sestavljene občutljivosti parametrov modela po enačbi 4.16 za vsako iteracijo optimizacijskega procesa ter za celoten proces. Po pregledu rezultatov umerjanja vseh podpovodij smo ugotovili, da sta bistvena parametra modela regresijska koeficienta $K0$ in $K1$, ki predstavljata iztok iz zgornjega rezervoarja ter tako določata velikosti konic pretokov. Pomemben je tudi parameter $K2$, ki določa velikost baznega odtoka. Daleč najmanjši vpliv na simulirane pretoke pa ima faktor zmrzovanja CFR .

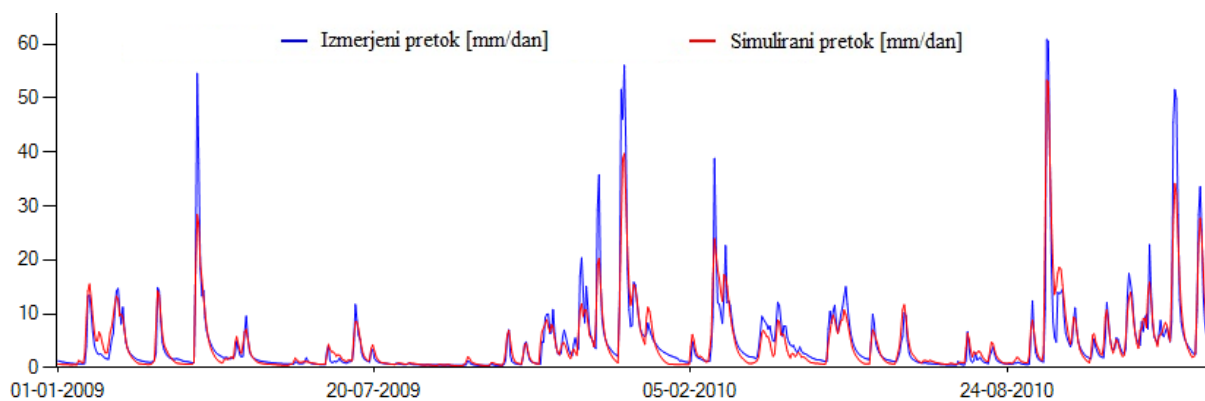


Slika 6.6: Primerjava simuliranih in izmerjenih pretokov v obdobju kalibracije

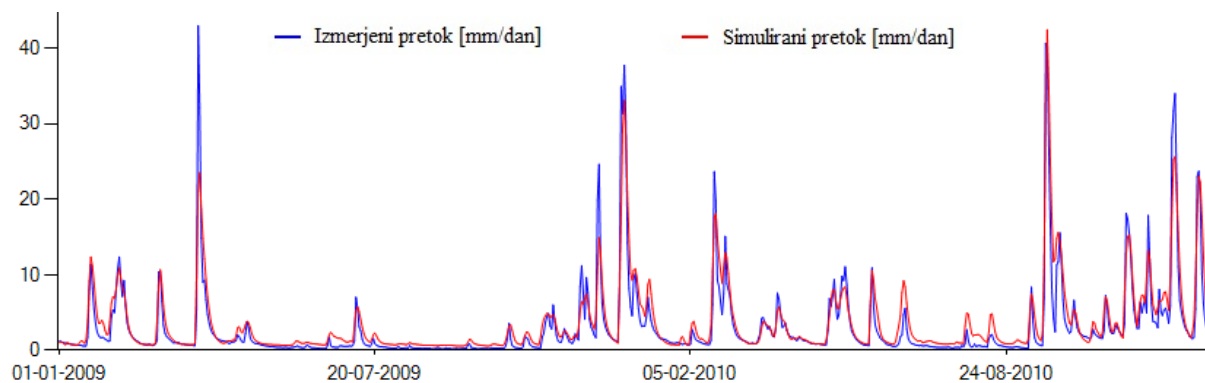
a) Kras I



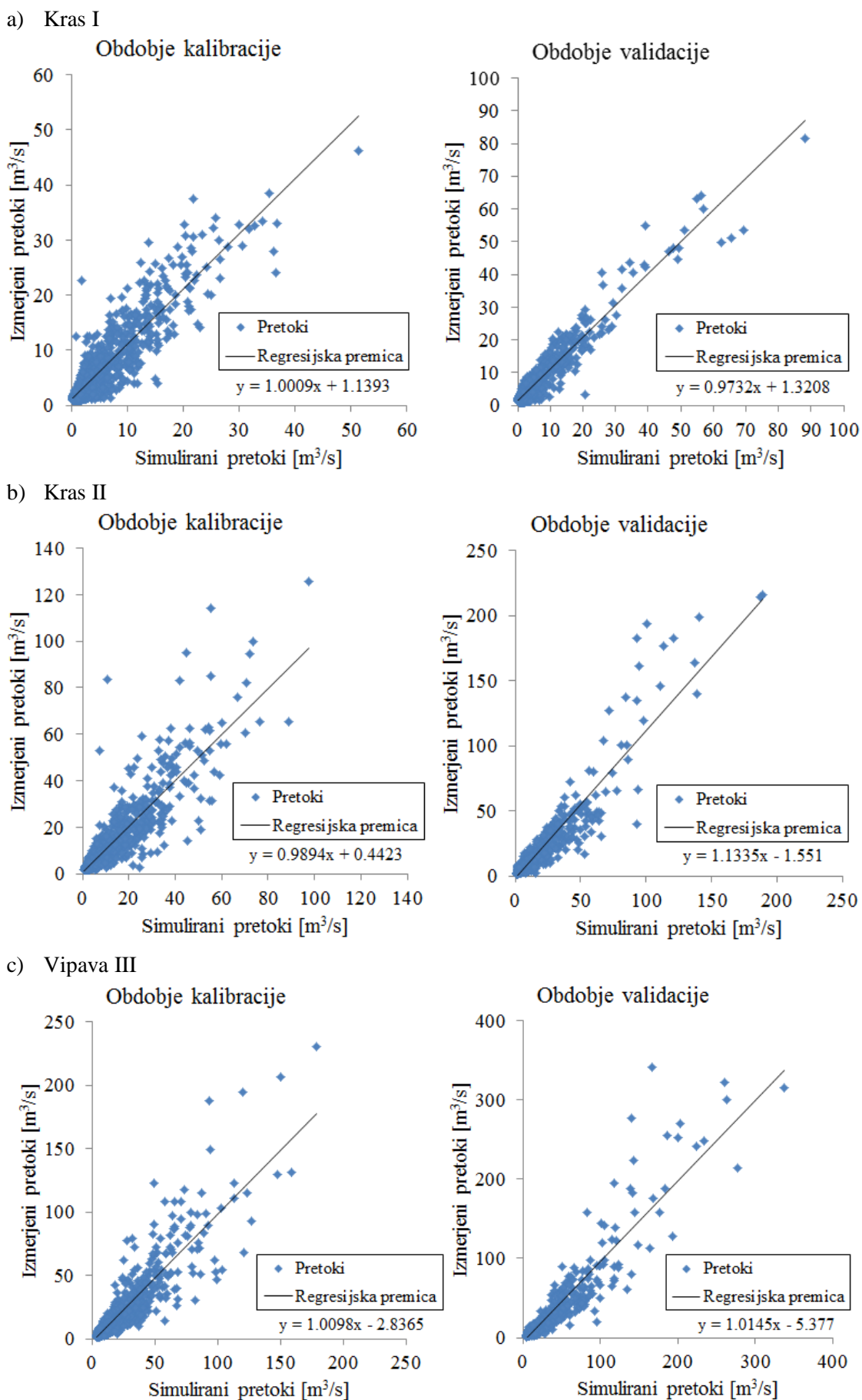
b) Kras II



c) Vipava III



Slika 6.7: Primerjava simuliranih in izmerjenih pretokov v obdobju validacije



Slika 6.8: Primerjava izmerjenih in simuliranih dnevnih pretokov v m^3/s za izbrana podpovodja

6.3 Prehod na model z urnim časovnim korakom

Če želimo analizirati maksimalne pretoke vodotoka, je model z dnevnim časovnim korakom pregrob. Čas koncentracije, v katerem padavine iz najbolj oddaljenih delov porečja prispejo v iztočni profil, je namreč lahko krajši od enega dne in v tem času lahko pretoki dosežejo maksimum ter tudi upadejo. Model z dnevnim časovnim korakom v tem primeru simulira le povprečno dnevno vrednost pretoka, kar pomeni, da maksimuma ne moremo ovrednotiti. Da bi lahko bolj natančno določili obliko hidrogramov, smo izdelali model z urnim časovnim korakom, pri čemer smo izhajali iz modela z dnevnim časovnim korakom.

Želeli smo simulirati pretoke v septembru 2010, saj je med 17. in 19. 9. obilno deževje povzročilo obsežne poplave v porečju Vipave. Vhodni podatki za model so bile tako urne vrednosti padavin, temperatur in pretokov med 1. 4. 2010 ter 30. 9. 2010, pri čemer smo obdobje do 6. 9. 2010 uporabili za »ogrevalno obdobje« modela, simulirali pa pretoke med 6. in 30. 9. 2010.

4 izmed 12 meteoroloških postaj, ki so bile upoštevane v modelu z dnevnim časovnim korakom, so avtomatske, kar pomeni, da beležijo količino padavin na 5 minut in zanje lahko določimo urne vsote. Na ostalih merilnih mestih razpolagamo le z dnevno vsoto padavin, ki je izmerjena ob 7. uri posameznega dne. Ker smo želeli ohraniti enako strukturo, kot jo ima model z dnevnim časovnim korakom, smo vsako dnevno vsoto padavin razporedili med 8. uro ustreznega dne in 7. uro naslednjega dne. Pri tem je razporeditev padavin na navadni padavinski postaji enaka kot na eni izmed avtomatskih postaj, izbrani glede na bližino oziroma najvišji koeficient korelacije za dnevne podatke. V preglednici 6.11 je navedeno, glede na katero avtomatsko postajo smo razporedili padavine na posamezni navadni padavinski postaji. Padavine, ki so padle na posameznem podpovodju, smo nato izračunali z enakimi utežmi kot pri modelu z dnevnim časovnim korakom.

Preglednica 6.11: Razporeditev padavin na navadnih padavinskih postajah

Številka postaje	Ime postaje	Razporeditev padavin glede na avtomatsko postajo
78	Mrzla Rupa	Podkraj
81	Črni vrh nad Idrijo	Podkraj
83	Otlca	Podkraj
86	Lokve	Podkraj
97	Bilje*	
98	Zalošče	Bilje
99	Šempas	Bilje
107	Godnje*	
136	Postojna*	
141	Razdrto	Postojna
144	Podkraj*	
145	Hrušica pri Colu	Podkraj

* postaja je avtomatska

Za urne vrednosti temperatur zraka na podpovodjih v danem obdobju smo upoštevali urne meritve z meteoroloških postaj Postojna in Bilje. Kot vhodni podatek o evapotranspiraciji pa smo uporabili

enake vrednosti kot pri modelu z dnevnim časovnim korakom, le da smo jih pretvorili iz enote mm/dan v mm/h.

Modela z urnim časovnim korakom nismo ponovno umerjali, ampak smo uporabili parametre umerjenega modela z dnevnim časovnim korakom. V modelu HBV-light so naslednji parametri odvisni od časovnega koraka: pronicanje v spodnji rezervoar *PERC*, recesijski koeficienti odtoka *K0*, *K1*, *K2* in faktor taljenja snega *CFMAX*. Vrednosti teh parametrov iz umerjenega modela z dnevnim časovnim korakom smo pretvorili v ustrezno enoto, ostale vrednosti pa smo ohranili (priloga C).

Pretoke smo sicer lahko simulirali na vseh podpovodjih, vendar smo jih lahko primerjali z izmerjenimi le na podpovodjih Kras I, Kras II, Vogršček in Vipava III. Razlog je enak kot pri validaciji modela z dnevnim časovnim korakom, torej pomanjkanje podatkov z vodomerne postaje Branik na Branici ter neobstoje ustreznega kontrolnega merilnega mesta za podpovodje Vipava II. Izmerjene urne vrednosti pretokov smo pretvorili v enoto mm/h. V preglednici 6.12 so prikazane vrednosti Nash-Sutcliffeovega kriterija R_{eff} za izbrano obdobje simulacije urnih vrednosti pretokov.

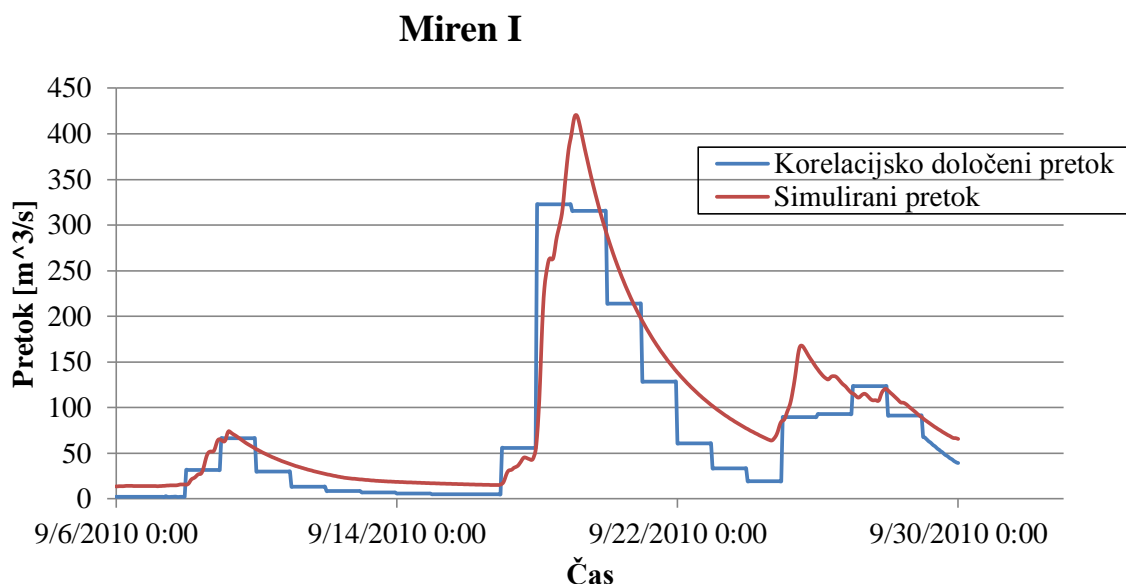
Preglednica 6.12: Vrednosti R_{eff} modela z urnim časovnim korakom

Št. podpovodja	Ime podpovodja	R_{eff}
I	Kras I	0.8308
II	Kras II	0.8053
III	Vipava I	/
IV	Branica	/
V	Vipava II	/
VI	Vogršček	0.6533
VII	Vipava III	0.8212

Vrednosti R_{eff} so za podpovodja št. I, II in VII nad 0,8, zato lahko sklepamo, da je prehod na model z urnim časovnim korakom uspešen. Parametri iz umerjenega modela z dnevnim časovnim korakom zadovoljivo simulirajo tudi urne pretoke v obdobju med 6. 9. 2010 in 30. 9. 2010. Pri podpovodju Vogršček ne moremo pričakovati dobrih rezultatov, saj je slabo umerjeno že pri modelu z dnevnim časovnim korakom.

Med simulirani pretoki so pomembni predvsem tisti na vodomerni postaji Miren I, ki se nahaja blizu iztočne točke porečja Vipave. Med poplavami septembra 2010 je bila postaja poplavljen, zato ni delovala oziroma so bili zapisi uničeni. Podatki o urnih pretokih, ki smo jih dobili od ARSO, so tako v resnici korelacijsko določene dnevne vrednosti, pripisane vsem uram posameznega dne v tem obdobju. Posledično R_{eff} za podpovodje Vipava III ni pravi pokazatelj kakovosti simulacije.

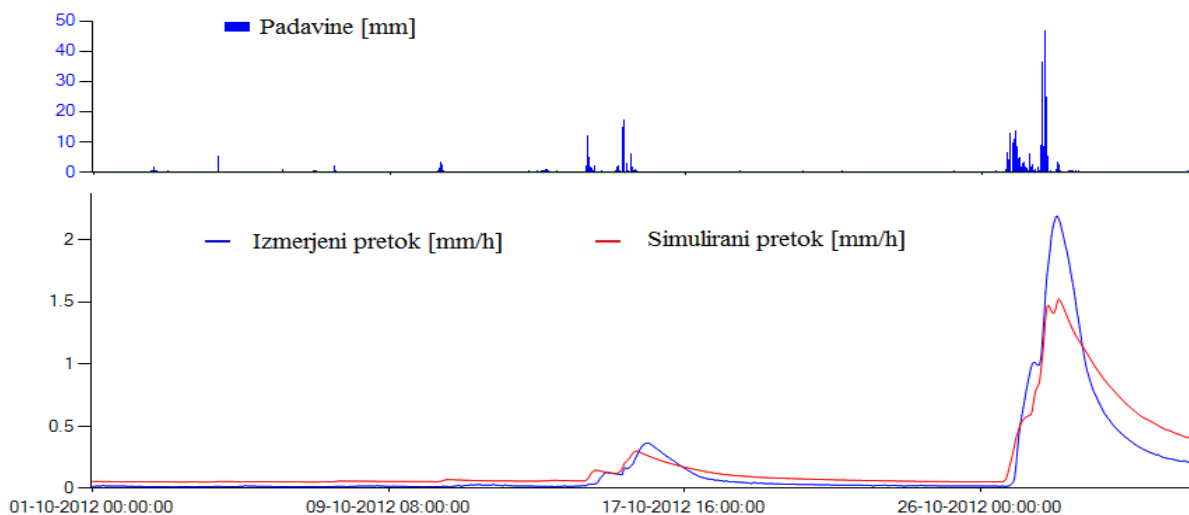
Ker maksimalen pretok na postaji Miren I ni bil izmerjen, smo ga želeli določiti s pomočjo simulacije. Slika 6.9 prikazuje simulirane ter korelacijsko določene pretoke med poplavami septembra 2010. Na ARSO so sicer po sledih ocenili, da maksimalni pretok znaša 437 m³/s, zgodil pa naj bi se 18. 9. 2010 (ARSO, 2010a). Maksimalni simulirani pretok znaša 420 m³/s in odstopa od ocenjenega za približno 4 %. Če primerjamo hidrograma na sliki 6.9, ugotovimo, da model z urnim časovnim korakom simulira nekoliko previsok bazni odtok ter prepočasno upadanje pretoka med 21. in 24. 9. 2010. Posledično je zaradi večje predhodne namočenosti tal odziv na sledeče padavine prehitel in prevelik.



Slika 6.9: Simulirani in korelacijsko določeni pretoki Vipave na vodomerni postaji Miren I med 6. in 30. 10. 2010

V nadaljevanju smo preverili, kako dobro model z urnim časovnim korakom simulira pretoke v letu 2012. Na voljo smo imeli urne podatke o pretokih na postaji Miren I, želeli pa smo primerjati predvsem simulirani in izmerjeni poplavni val, ki je nastopil 27. in 28. oktobra 2012. V tem obdobju je postaja delovala, maksimalni izmerjeni pretok pa je znašal $417.5 \text{ m}^3/\text{s}$. V model smo vnesli ustrezne vhodne podatke o temperaturah in padavinah za obdobje med 1. 2. in 31. 10. 2012, pri čemer smo dnevne padavine, izmerjene na navadnih padavinskih postajah, ponovno razporedili na urne vrednosti posameznega dne. Pri simulaciji smo uporabili preoblikovane parametre umerjenega modela z dnevnim časovnim korakom.

Izkazalo se je, da model slabo simulira pretoke Vipave med poplavami oktobra 2012, saj podceni maksimalni pretok kar za 30 %. Primerjava izmerjenih in simuliranih pretokov ter časovni potek padavin na podpovodju Vipava III med 1. in 31. 10. 2012 sta prikazana na sliki 6.10.



Slika 6.10: Časovni potek padavin na podpovodju Vipava III ter primerjava izmerjenih in simuliranih pretokov na postaji Miren I med 1. in 31. 10. 2012

Model z urnim časovnim korakom, ki je izpeljan iz modela z dnevnim časovnim korakom, torej zadovoljivo simulira višek pretokov v septembru 2010, simulacija maksimalnega pretoka oktobra 2012 pa je izjemno slaba. Iz grafa na sliki 6.10 lahko razberemo, da poleg prenizkega viška pretoka model simulira tudi prepočasno upadanje pretokov, kar pomeni, da preoblikovani parametri iz modela z dnevnim časovnim korakom niso ustrezni. Zato smo se odločili, da bomo model z urnim časovnim korakom ponovno umerili.

6.4 Kalibracija in validacija modela z urnim časovnim korakom

Model z urnim časovnim korakom smo kalibrirali na obdobju od 1. 1. 2009 do 20. 10. 2010, validirali pa smo le pretoke na postaji Miren I obdobju med 1. 2. in 31. 10. 2012. Za kalibracijo modela je bilo ponovno potrebno pripraviti urne vrednosti padavin, temperatur in pretokov. Na voljo smo imeli podatke o pretokih za podpovodja št. I, II, VI ter VII, zato smo kalibracijo s PEST-om lahko izvedli le za štiri podpovodja. Umerjanje je potekalo v smeri toka, podpovodjem z manjkajočimi podatki o pretokih pa smo pripisali parametre umerjenih podpovodij s podobnimi lastnostmi.

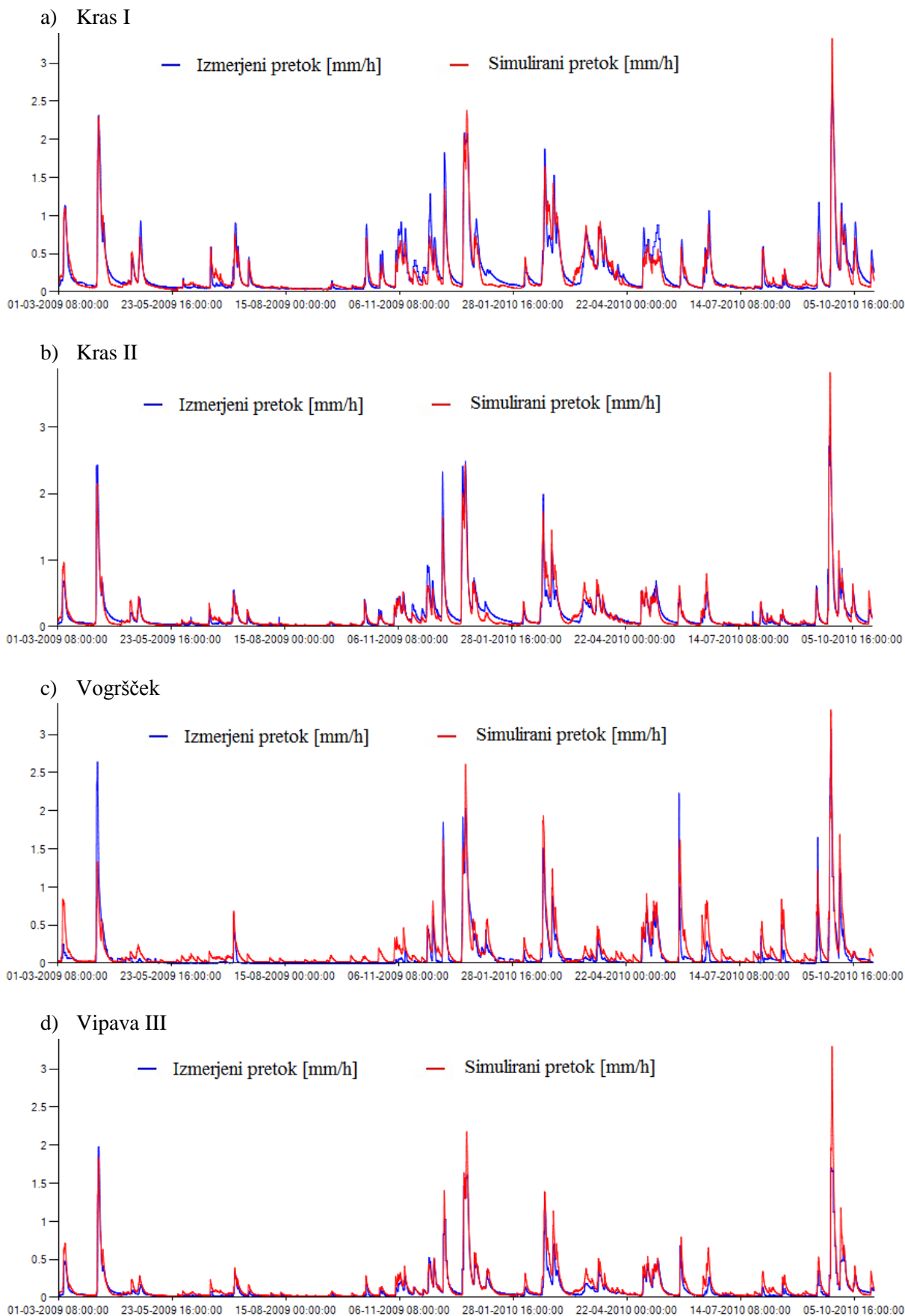
Priprava PEST vhodnih datotek je potekala na enak način kot pri modelu z dnevnim časovnim korakom. V kontrolni datoteki smo prilagodili začetne in mejne vrednosti parametrov, ki so odvisni od časovnega koraka. Opazovanih vrednosti je v tem primeru 14345, razdelili pa smo jih na dve skupini, in sicer na visoke pretoke in ostale pretoke. Izmerjene viške pretokov smo utežili s faktorjem 2, zato da bi imeli v postopku optimizacije večji vpliv na vrednosti parametrov in bi bil model namenjen simulaciji maksimalnih pretokov. Nekatere korelacijsko določene pretoke s postaje Miren I iz obdobj, ko postaja ni delovala, smo utežili s faktorjem 0, zato da PEST v postopku optimizacije teh konstantnih vrednosti, pripisanih vsaki uri dneva, ni upošteval.

Umerili smo tudi verzijo modela s spremenjenimi vrednostmi potencialne evapotranspiracije. Namesto povprečnih urnih vrednosti za posamezen mesec smo dejanske izmerjene dnevne vrednosti na postajah Bilje in Postojna v obdobju kalibracije pretvorili v urne vrednosti. Evapotranspiracija je bila tako bolj natančno določena, vendar se je izkazalo, da način podajanja evapotranspiracije na rezultate simulacije in optimizirane vrednosti parametrov bistveno ne vpliva.

Rezultati kalibracije so prikazani v preglednici 6.13. in na sliki 6.11. Vrednosti R_{eff} so zelo visoke za podpovodji Kras I in Kras II, tudi za iztok s podpovodja Vogršček da novi model boljše rezultate. Pri podpovodju Vipava III je vrednost R_{eff} manjša od 0.8, vendar je vzrok za to tudi upoštevanje konstantnih korelacijsko določenih pretokov s postaje Miren I pri računu R_{eff} . Iz grafov na sliki 6.11 lahko razberemo, da model preceni konico pretoka v poplavih septembra 2010.

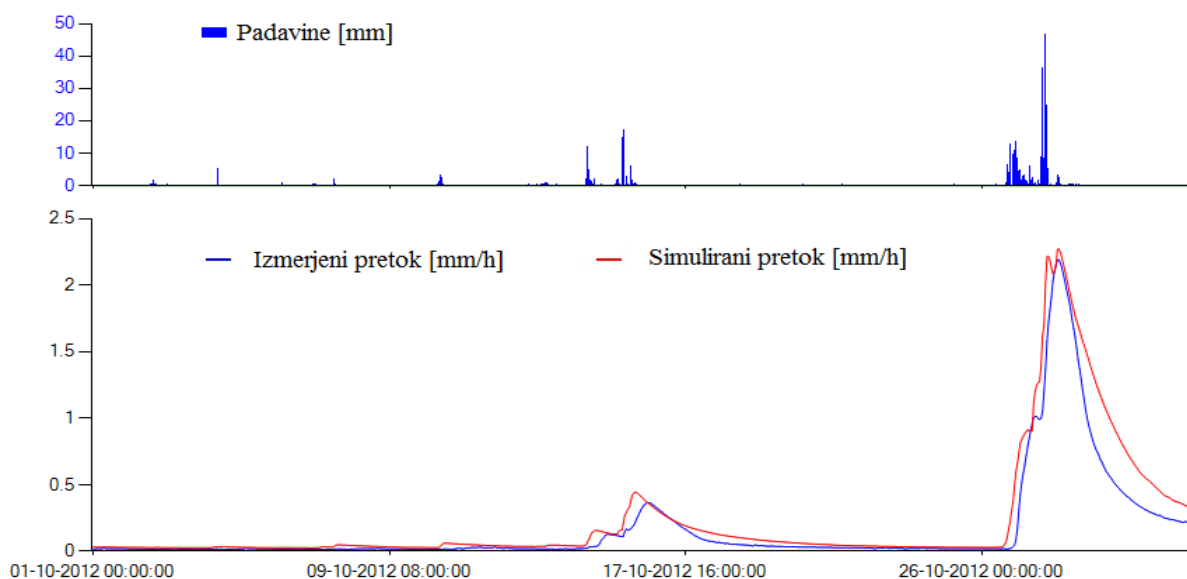
Preglednica 6.13: Vrednosti R_{eff} za obdobje kalibracije modela z urnim časovnim korakom

Št. podpovodja	Ime podpovodja	R_{eff} za obdobje kalibracije
I	Kras I	0.8967
II	Kras II	0.9100
III	Vipava I	/
IV	Branica	/
V	Vipava II	/
VI	Vogršček	0.7280
VII	Vipava III	0.7918



Slika 6.11: Primerjava simuliranih in izmerjenih pretokov v obdobju kalibracije modela z urnim časovnim korakom

Validacijo modela z urnim časovnim korakom smo izvedli na pretokih vodomerne postaje Miren I med 1. in 31. 10. 2012. Primerjava pretokov in časovni potek padavin na podpovodju Vipava III sta prikazana na sliki 6.12. R_{eff} za izbrano obdobje validacije znaša 0.8738, maksimalni simulirani pretok pa od izmerjenega odstopa za 3.6 %.

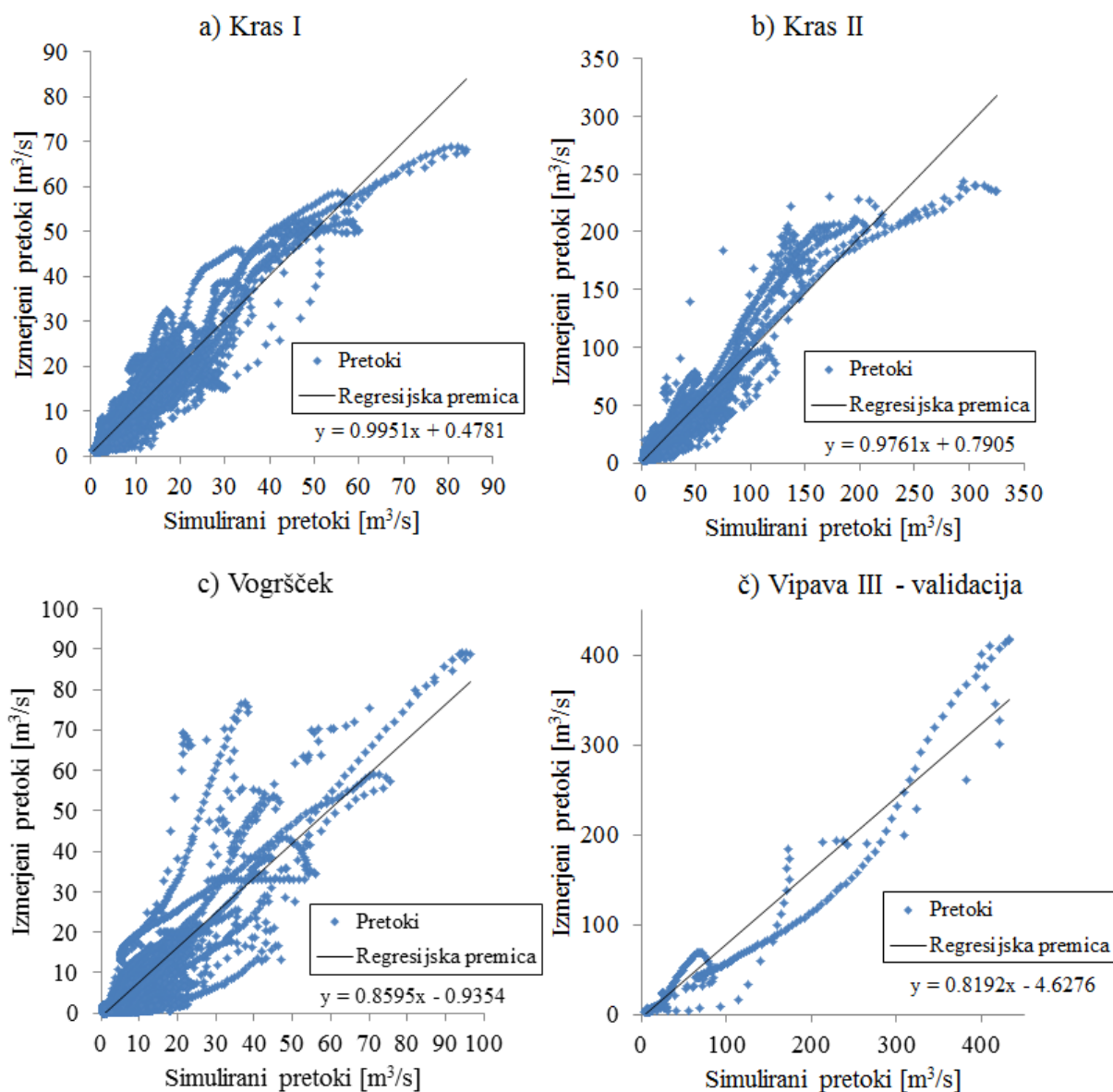


Slika 6.12: Časovni potek padavin na podpovodju Vipava III ter primerjava izmerjenih in simuliranih pretokov z umerjenim modelom z urnim časovnim korakom na postaji Miren I med 1. in 31. 10. 2012

Na sliki 6.13 so prikazani pari simuliranih in izmerjenih pretokov ter regresijske premice. Enačbe regresijskih premic in standardni odkloni za pretoke v m^3/s se nahajajo v preglednici 6.14. Pri podpovodju Vipava III so v obdobju kalibracije upoštevane tudi konstantne vrednosti urnih pretokov v času, ko postaja Miren I ni delovala, kar je vzrok za slabše ujemanje izmerjenih in simuliranih pretokov.

Preglednica 6.14: Analiza simuliranih in izmerjenih urnih pretokov

Št. podpovodja	Ime podpovodja	Obdobje	Enačba regresijske premice	SD [m^3/s]
I	Kras I	kalibracije	$y = 0.9951 x + 0.4781$	2.7245
II	Kras II	kalibracije	$y = 0.9761 x + 0.7905$	7.9229
VII	Vogršček	kalibracije	$y = 0.8595 x - 0.9354$	3.7367
VII	Vipava III	kalibracije	$y = 0.7906 x - 0.8306$	14.2719
VII	Vipava III	validacije	$y = 0.8192 x - 4.6276$	15.5763



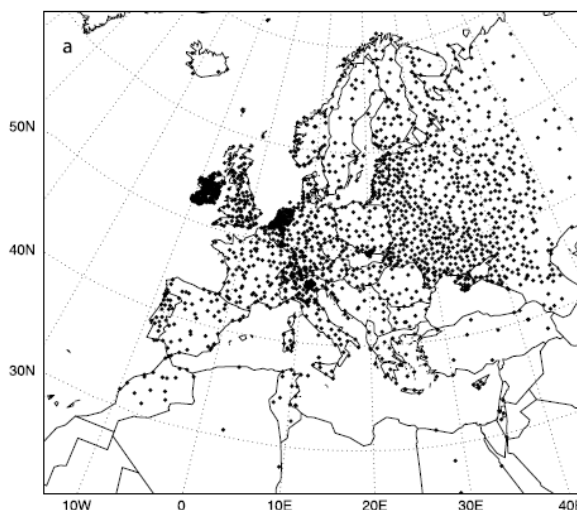
Slika 6.13: Primerjava izmerjenih in simuliranih urnih pretokov v m³/s za podpovodja Kras I, Kras II in Vogršček v obdobju kalibracije in za podpovodje Vipava III v obdobju validacije

Umerjeni parametri so prikazani v prilogi C. Če primerjamo parametre novo umerjenega modela z urnim časovnim korakom s parametri modela, izpeljanega iz modela z dnevним časovnim korakom, ne opazimo velike podobnosti. Bistvene razlike se pojavljajo predvsem pri recesijskih koeficientih $K1$ in $K2$ ter poljski kapaciteti FC . Pri podpovodju Vogršček pride do največjih odstopanj, kar je pričakovano, saj je bil model z dnevним časovnim korakom slabo umerjen. Vrednosti optimiziranih parametrov torej ne opisujejo lastnosti podpovodij, ampak imajo bolj empiričen značaj. PEST se seveda ne ozira na fizikalen pomen parametrov, pač pa le poišče tisti set, ki da najboljše ujemanje simuliranih in izmerjenih pretokov v izbranem obdobju.

7 SIMULACIJA VPLIVA PODNEBNIH SPREMEMB

7.1 E-OBS in napovedi podnebnih sprememb

E-OBS je mreža dnevnih vrednosti padavin in temperatur na območju Evrope, ki temelji na podatkih, pridobljenih v okviru evropskega projekta ECA&D (angl. *European Climate Assessment & Dataset project*) v izvedbi Nizozemskega kraljevega meteorološkega inštituta (KNMI). E-OBS mreža prikazuje prostorsko razporeditev padavin in temperatur na celinskem delu Evrope za vsak dan od leta 1950 naprej. Podatke za izdelavo mreže danes prispeva že 7848 meteoroloških postaj iz 61 držav (KNMI). Točkovne vrednosti s postaj so interpolirane po prostoru, s čimer je dobljena pravilna mreža podatkov, primerna za nadaljnjo analizo (Haylock et al, 2008).



Slika 7.1: Merilna mesta padavin, s katerih so bili pridobljeni podatki za E-OBS mrežo med leti 1950 in 2006 (Haylock et al., 2008, str. 3)

Na podlagi časovnih serij podatkov EOB-S je bila izdelana projekcija podnebnih sprememb v Evropi, in sicer za tri časovna obdobja: med leti 2011–2040, 2041–2070 ter 2071–2100. Napovedi se nanašajo na spremembe temperature zraka ter količine padavin z 20- in 100-letno povratno dobo. Prirastki količine padavin so določeni za vsak letni čas posebej. V okviru diplomske naloge smo uporabili napovedi prirastkov količine padavin z 20- in 100-letno povratno dobo za jesensko obdobje, ki smo jih prišteli trenutno veljavnim jesenskim padavinam z 20- ali 100-letno povratno dobo. Simulirali smo 8 scenarijev, opisanih v preglednici 7.1.

Preglednica 7.1: Opis simuliranih scenarijev

Št.	Oznaka	Opis padavin
1	Ret20	Jesenske padavine s povratno dobo 20 let
2	Ret20 2011-2040	Napovedane jesenske padavine s povratno dobo 20 let za obdobje 2011–2040
3	Ret20 2041-2070	Napovedane jesenske padavine s povratno dobo 20 let za obdobje 2041–2070
4	Ret20 2011-2040	Napovedane jesenske padavine s povratno dobo 20 let za obdobje 2071–2100
5	Ret100	Jesenske padavine s povratno dobo 100 let
6	Ret100 2011-2040	Napovedane jesenske padavine s povratno dobo 100 let za obdobje 2011–2040
7	Ret100 2041-2070	Napovedane jesenske padavine s povratno dobo 100 let za obdobje 2041–2070
8	Ret100 2011-2040	Napovedane jesenske padavine s povratno dobo 100 let za obdobje 2071–2100

Klimatske spremembe poleg povečane količine padavin zajemajo tudi povišanje temperatur zraka. Prirastki temperatur za območje Slovenije so prikazani v preglednici 7.2. V model smo sicer vnesli povišane temperature zraka, vendar vpliva temperaturnih sprememb na dejansko evapotranspiracijo in posledično na količino odtekle vode nismo mogli ovrednotiti, ker model evapotranspiracije ne korigira glede na odstopanje temperature zraka od dolgoletnega povprečja. Lahko bi ovrednotili le vpliv na taljenje snega, ki pa ga v jesenskem obdobju ni.

Preglednica 7.2: Napoved povišanja temperature zraka na območju Slovenije

Obdobje	2011–2040	2041–2070	2071–2100
Prirastek temperature [°C]	0.8	1.8	2.9

Simulacijo vpliva klimatskih sprememb smo izvedli z modelom z dnevnim in urnim časovnim korakom. Iz prostorske mreže napovedanih prirastkov padavin smo pridobili točkovne vrednosti na lokacijah 12 izbranih padavinskih postaj z območja porečja Vipave in okolice. Izjema je postaja Godnje, za katero napoved ni znana zaradi lege v bližini morja. Prirastek padavin na postaji smo tako določili s pomočjo korelacije s postajo Razdrto. Preglednica 7.3 prikazuje napovedane dnevne prirastke količine padavin v jesenskem obdobju na izbranih merilnih mestih za povratni dobi 20 in 100 let za vsa obdobja napovedi.

Preglednica 7.3: Napovedani dnevni prirastki jesenske količine padavin v mm za izbrana merilna mesta

Številka merilnega mesta	Ime merilnega mesta	Povratna doba 20 let			Povratna doba 100 let		
		2011–2040	2041–2070	2071–2100	2011–2040	2041–2070	2071–2100
78	Mrzla Rupa	11.60	16.71	19.16	15.65	21.06	23.98
81	Črni vrh nad Idrijo	12.97	16.23	20.34	19.54	17.27	26.32
83	Otlca	14.35	16.92	19.99	21.83	19.72	25.71
86	Lokve	13.05	16.57	18.60	17.86	20.69	21.57
97	Bilje	16.17	16.82	20.30	25.39	20.83	24.99
98	Zalošče	16.17	17.55	22.22	26.95	21.94	30.80
99	Šempas	15.49	17.22	20.97	24.54	21.58	27.36
107	Godnje	9.58	14.35	15.92	14.09	14.35	19.46
136	Postojna	9.12	18.17	20.10	13.17	18.93	26.67
141	Razdrto	11.37	17.02	18.88	16.71	17.03	23.08
144	Podkraj	13.94	17.36	20.57	21.55	18.28	27.17
145	Hrušica pri Colu	13.94	17.36	20.57	21.55	18.28	27.17

Napovedane prirastke padavin smo prišteli dnevnim količinam padavin z ustrezno povratno dobo glede na podatke E-OBS in tako dobili napovedi dnevnih količin padavin, ki smo jih nato upoštevali pri simulaciji scenarijev. Kot osnova simulacijam je služil dogodek med 16. in 19. 9. 2010, ker je umerjeni model dobro simuliral pretoke v tem obdobju. Največja količina padavin je bila na izbranih postajah izmerjena 17. ali 18. septembra. Izmerjeno količino padavin v tem dnevu smo nadomestili z napovedano vrednostjo na mestu postaje in po metodi Thiessenovih poligonov določili skupno padlo količino padavin na posameznem podpovodju. V primeru simulacije z urnim časovnim korakom smo napovedano dnevno količino padavin razporedili čez dan na že opisani način.

Napovedane količine padavin, ki smo jih uporabili v scenarijih, so prikazane v preglednici 7.4. V drugem in tretjem stolpcu preglednice 7.4 pa se nahajajo največje izmerjene dnevne količine padavin v septembru 2010 ter dan, v katerem so bile izmerjene. V preglednici 7.5 so napovedani prirastki količine padavin izraženi v %, in sicer glede na scenarij Ret20 oziroma Ret100.

Preglednica 7.4: Količine padavin v mm, uporabljene pri simulaciji scenarijev klimatskih sprememb

Št. m. mesta	Izmer-jene P	Datum	Ret20	Ret20 2011–2040	Ret20 2041–2070	Ret20 2071–2100	Ret100	Ret100 2011–2040	Ret100 2041–2070	Ret100 2071–2100
78	130.7	18.9.	137.11	148.72	153.82	156.27	215.52	231.18	236.58	239.50
81	235.0	18.9.	103.71	116.69	119.94	124.05	131.71	151.25	148.98	158.03
83	323.4	17.9.	114.30	128.66	131.22	134.29	162.58	184.40	182.30	188.29
86	142.4	17.9.	136.99	150.04	153.56	155.59	204.97	222.83	225.66	226.53
97	103.6	18.9.	106.32	122.49	123.14	126.62	138.15	163.54	158.99	163.14
98	124.4	18.9.	92.40	108.57	109.95	114.62	122.88	149.83	144.83	153.69
99	98.0	18.9.	106.72	122.21	123.94	127.69	147.11	171.65	168.69	174.48
107	145.3	18.9.	82.66	92.24	97.01	98.58	108.37	122.46	122.72	127.83
136	132.4	18.9.	96.56	105.69	114.73	116.66	130.19	143.36	149.12	156.86
141	159.6	18.9.	98.06	109.42	115.08	116.94	128.55	145.27	145.58	151.64
144	191.0	17.9.	102.13	116.08	119.49	122.70	128.61	150.16	146.88	155.77
145	145.6	17.9.	102.13	116.08	119.49	122.70	128.61	150.16	146.88	155.77

Preglednica 7.5: Prirastki količine padavin v %

Št. merilnega mesta	Povečanje količine padavin glede na scenarij Ret20			Povečanje količine padavin glede na scenarij Ret100		
	Ret20 2011–2040	Ret20 2041–2070	Ret20 2071–2100	Ret100 2011–2040	Ret100 2041–2070	Ret100 2071–2100
78	8 %	12 %	14 %	7 %	10 %	11 %
81	13 %	16 %	20 %	15 %	13 %	20 %
83	13 %	15 %	17 %	13 %	12 %	16 %
86	10 %	12 %	14 %	9 %	10 %	11 %
97	15 %	16 %	19 %	18 %	15 %	18 %
98	18 %	19 %	24 %	22 %	18 %	25 %
99	15 %	16 %	20 %	17 %	15 %	19 %
107	12 %	17 %	19 %	13 %	13 %	18 %
136	9 %	19 %	21 %	10 %	15 %	20 %
141	12 %	17 %	19 %	13 %	13 %	18 %
144	14 %	17 %	20 %	17 %	14 %	21 %
145	14 %	17 %	20 %	17 %	14 %	21 %

Napovedana količina padavin je praviloma večja v kasnejših obdobjih, saj se vpliv klimatskih sprememb s časom povečuje. Vendar na nekaterih postajah pride do izjeme pri padavinah s 100-letno povratno dobo, kjer s časom padavine najprej narastejo, nato pa zaznamo padec in spet povišanje. S primerjavo stolpca z največjimi izmerjenimi dnevnimi padavinami v septembru 2010 in ostalih stolpcev padavin v preglednici 7.4 pa lahko ugotovimo, da imajo nekatere izmerjene padavine povratno dobo, večjo od 100 let in presegajo tudi najvišje napovedi količine padavin. To potrjuje, da se je septembra 2010 res zgodil izjemen padavinski dogodek.

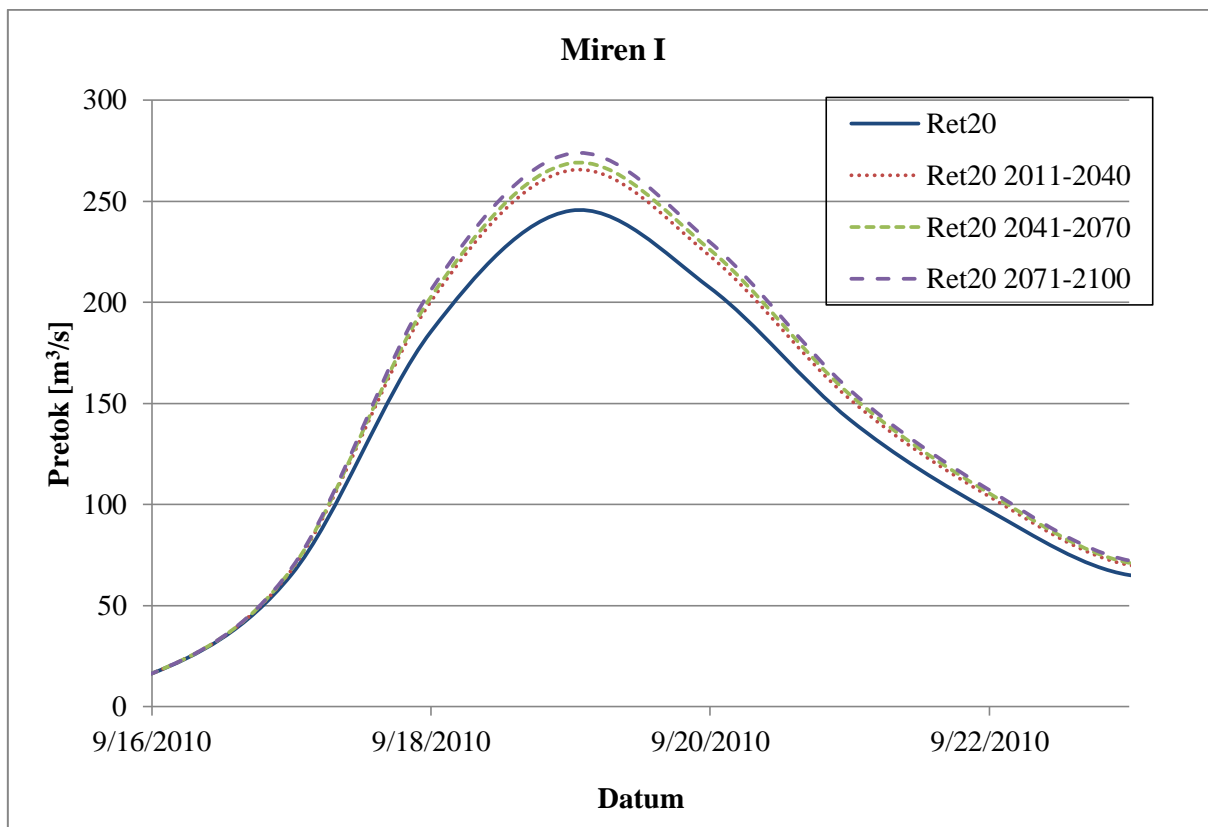
7.2 Model z dnevnim časovnim korakom

Z umerjenim modelom z dnevnim časovnim korakom smo simulirali vseh 8 padavinskih scenarijev, ki se med seboj razlikujejo po količini padavin na posameznem podpovodju, ki naj bi padle 17. in 18. 9. 2010. Preglednica 7.6 prikazuje povečanje dvodnevne količine padavin na podpovodjih glede na osnovna scenarija Ret20 oziroma Ret100. Ugotavljali smo, kako povečana količina padavin zaradi klimatskih sprememb vpliva na velikost odtoka. Osnova za primerjavo sta bila scenarija Ret20 ter Ret100, zanimali pa so nas predvsem pretoki na vodomerni postaji Miren I, ki predstavlja iztok iz porečja. Pretoki na postaji so prikazani na slikah 7.2 in 7.3, analiza maksimalnih pretokov pa se nahaja v preglednici 7.7.

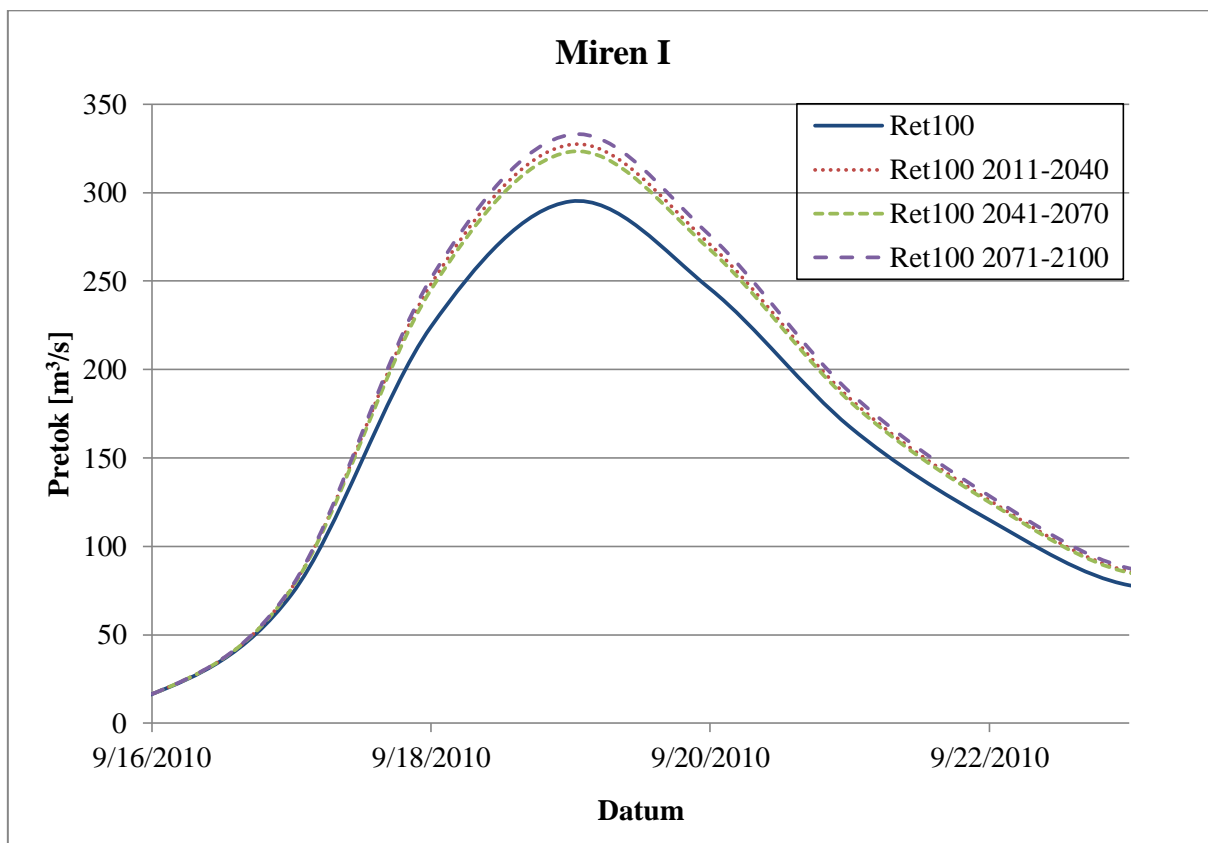
Preglednica 7.6: Povečana dvodnevna količina padavin na podpovodjih v %

Scenarij	Kras I	Kras II	Vipava I	Branica	Vipava II	Vogršček	Vipava III
Ret20 2011–2040	6 %	5 %	6 %	8 %	8 %	8 %	10 %
Ret20 2041–2070	8 %	7 %	7 %	9 %	8 %	9 %	11 %
Ret20 2071–2100	9 %	8 %	9 %	11 %	11 %	11 %	13 %
Ret100 2011–2040	8 %	7 %	9 %	10 %	11 %	10 %	13 %
Ret100 2041–2070	7 %	6 %	7 %	9 %	9 %	9 %	11 %
Ret100 2071–2100	10 %	9 %	10 %	13 %	13 %	11 %	13 %

Iz slik 7.2 in 7.3 lahko razberemo, da se hidrogrami ujemajo do 17. 9. 2010, nato pa se zaradi različne količine padavin krivulje ločijo. Povečana količina padavin povzroči povečan pretok, ne vpliva pa na čas nastopa maksimuma. Največji prirastek pretokov se pojavi v obdobju 2011–2040, med ostalimi obdobji je povečanje pretoka manjše. Napovedani pretoki se s časom praviloma povečujejo, izjema je le pretok v scenariju Ret100 2041–2070, ki je manjši kot v scenariju Ret100 2011–2040. Vzrok za ta pojav so napovedane količine padavin, ki na nekaterih postajah ne naraščajo s časom, zato tudi 100-letne padavine v skupnem seštevku na podpovodju Vipava III najprej upadejo in nato spet narastejo (preglednica 7.6).



Slika 7.2: Simulirani dnevni pretoki na postaji Miren I kot posledica padavin z 20-letno povratno dobo



Slika 7.3: Simulirani dnevni pretoki na postaji Miren I kot posledica padavin s 100-letno povratno dobo

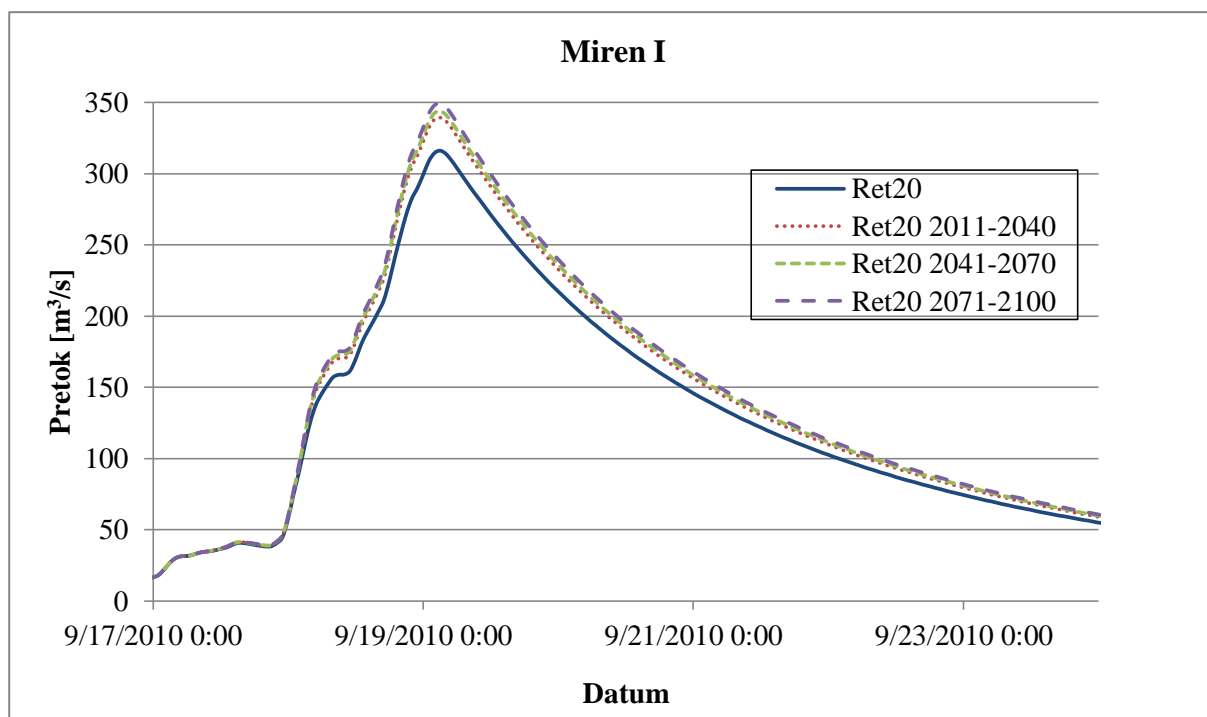
Preglednica 7.7: Analiza maksimalnih simuliranih dnevnih pretokov na postaji Miren I

Scenarij	Ret20	Ret20 2011–2040	Ret20 2041–2070	Ret20 2071–2100
Simulirani pretok [m³/s]	245.30	265.29	268.75	273.54
Prirastek pretoka [m³/s]		19.99	23.45	28.24
Prirastek pretoka [%]		8.15	9.56	11.51
Scenarij	Ret100	Ret100 2011–2040	Ret100 2041–2070	Ret100 2071–2100
Simulirani pretok [m³/s]	295.06	327.18	323.14	332.83
Prirastek pretoka [m³/s]		32.12	28.08	37.77
Prirastek pretoka [%]		10.88	9.52	12.80

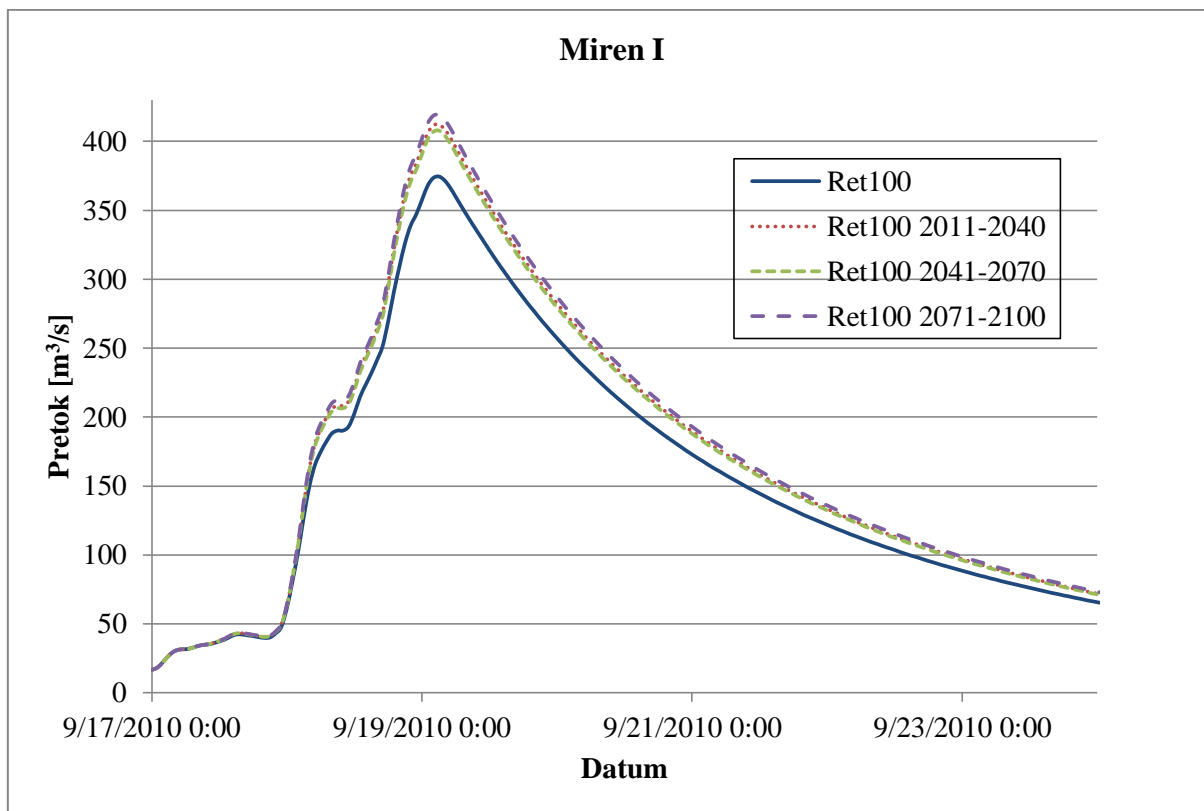
Če analiziramo maksimalne simulirane pretoke na postaji Miren I, ugotovimo, da bodo podnebne spremembe povzročile od 8.15 % do 11.51 % povečanje dnevnih pretokov v primeru padavin z 20-letno povratno dobo ter od 9.52 % do 12.80 % povečanje v primeru padavin s 100-letno povratno dobo. Podnebne spremembe v večji meri vplivajo na velikost 100-letnih padavin in posledično na velikost pretokov, kar pomeni, da se lahko v prihodnosti pričakujemo še bolj intenzivne ekstremne pojave.

7.3 Model z urnim časovnim korakom

Če želimo oceniti maksimalne pretoke v prihodnosti, ne le dnevnih povprečij, je bolj smiselno analizirati urne pretoke. Padavinske scenarije smo zato simulirali še z modelom z urnim časovnim korakom, izpeljanim iz modela z dnevnim časovnim korakom, ki je bolje simuliral pretoke v septembru 2010. Simulirani pretoki na postaji Miren I so prikazani na slikah 7.4 in 7.5, analiza maksimalnih pretokov pa v preglednici 7.8.



Slika 7.4: Simulirani urni pretoki na postaji Miren I kot posledica padavin z 20-letno povratno dobo



Slika 7.5: Simulirani urni pretoki na postaji Miren I kot posledica padavin s 100-letno povratno dobo

Preglednica 7.8: Analiza maksimalnih simuliranih urnih pretokov na postaji Miren I

Scenarij	Ret20	Ret20 2011–2040	Ret20 2041–2070	Ret20 2071–2100
Simulirani pretok [m³/s]	316.09	339.33	343.90	349.42
Prirastek pretoka [m³/s]		23.23	27.80	33.32
Prirastek pretoka [%]		7.35	8.80	10.54
Scenarij	Ret100	Ret100 2011–2040	Ret100 2041–2070	Ret100 2071–2100
Simulirani pretok [m³/s]	374.55	412.26	407.88	419.30
Prirastek pretoka [m³/s]		37.70	33.32	44.75
Prirastek pretoka [%]		10.07	8.90	11.95

Z analizo rezultatov pridemo do podobnih ugotovitev kot pri simulacijah z modelom z dnevnim časovnim korakom. Zaradi napovedane količine padavin v obdobju 2011–2040 lahko pričakujemo 7.35 % povečanje pretokov v primeru padavin z 20-letno povratno dobo ter 10.07 % povečanje v primeru 100-letnih padavin. V obdobju 2041–2070 naj bi bilo povišanje pretoka v obeh skupinah scenarijev približno enako, in sicer 8.8 % oziroma 8.9 %. Med leti 2071–2100 pa napovedi kažejo največje prirastke pretokov, za 10.54 % se bodo povečali pretoki zaradi 20-letnih padavin, za 11.95 % pa pretoki zaradi 100-letnih padavin. Ponovno pride do anomalije pri naraščanju pretokov zaradi 100-letnih padavin v obdobju 2041–2070. Prirastki urnih pretokov so sicer nekoliko manjši kot prirastki dnevnih pretokov.

V primerjavi z napovedmi za pretoke reke Save, ki naj bi se zaradi 100-letnih padavin do konca leta 2100 povečali za 16–79 % (Brilly et al., 2012), so prirastki pretokov Vipave precej manjši. Vzrok je kraški značaj reke Vipave, za katerega je značilen daljši čas koncentracije in posledično nižje konice pretokov. Odziv na intenzivnejše padavine je zato manjši.

7.4 Verjetnostna analiza

Na vodomerni postaji Miren je bila za obdobje 1950–2011 izvedena verjetnostna analiza visokovodnih konic Vipave (Šraj, 2013). Zanimalo nas je, kakšna je povratna doba pretokov, ki jih povzročajo 20- in 100-letne padavine ter kako bodo podnebne spremembe vplivale na velikost pretokov s 100-letno povratno dobo. Izhajali smo iz Gumbelove porazdelitve oziroma iz njene linearne transformacije. Enačba linearne transformacije se glasi:

$$X(T) = \mu_X + z(T)\sigma_X, \quad (7.1)$$

kjer je X pretok, μ_X srednja vrednost, σ_X standardni odklon, z faktor frekvence, odvisen od vrste porazdelitve in T povratna doba pretoka. Povratna doba T je obratna vrednost verjetnosti P , verjetnost P pa lahko izrazimo z vrednostjo porazdelitvene funkcije F :

$$T(X) = \frac{1}{P(X)} = \frac{1}{1-F(X)}. \quad (7.2)$$

Za letne konice pretokov na vodomerni postaji Miren v obdobju 1950–2011 znaša srednja vrednost $\mu_X = 244.37 \text{ m}^3/\text{s}$, standardni odklon pa $\sigma_X = 61.03 \text{ m}^3/\text{s}$ (Šraj, 2013). Glede na ti dve vrednosti lahko določimo vrednost faktorja frekvence Gumbelove porazdelitve z_G za simulirana viška urnih pretokov v scenarijih Ret20 in Ret100, nato pa še verjetnost in povratno dobo. Rezultati so prikazani v preglednici 7.9, ugotovili pa smo, da 20-letne padavine povzročijo pretoke s približno 8.6-letno povratno dobo, posledica 100-letnih padavin pa so pretoki s skoraj 28-letno povratno dobo.

Preglednica 7.9: Povratne dobe simuliranih urnih pretokov

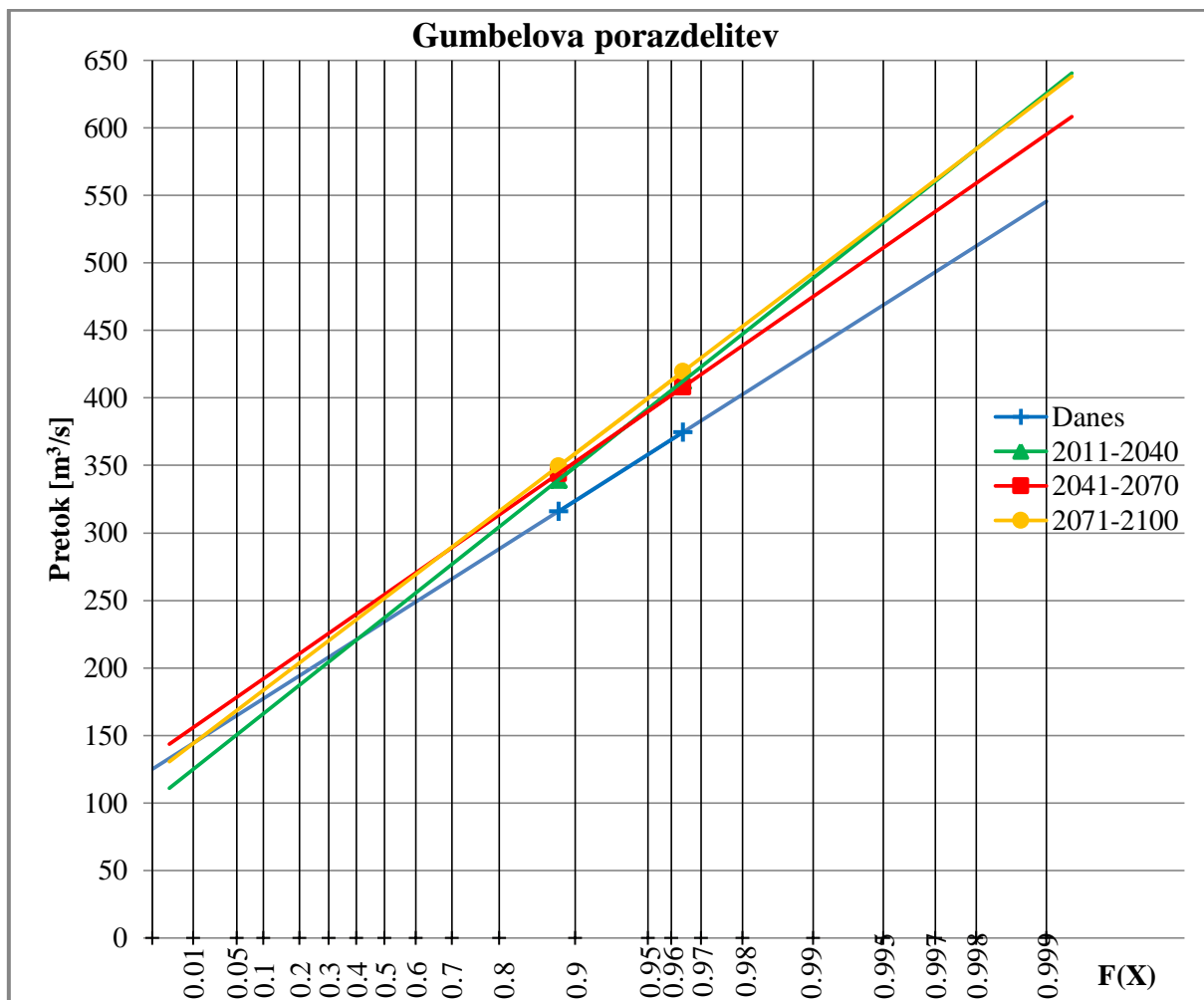
Scenarij	Pretok [m ³ /s]	z_G	F(X)	P(X)	T [let]
Ret20	316.09	1.175	0.883	0.117	8.552
Ret100	374.55	2.133	0.964	0.036	27.976

Predpostavili smo, da bodo tudi v prihodnosti 20-letne in 100-letne padavine povzročile pretoke z enakima povratnima dobama, povečala pa se bo velikost teh pretokov (slika 7.6). Simuliranim viškom pretokov v obdobjih 2011–2040, 2041–2070 in 2071–2100 torej pripadajo enake vrednosti faktorja frekvence z_G , spremenita pa se parametra linearne transformacije srednja vrednost μ_X in standardni odklon σ_X . Izračunamo ju lahko s pomočjo dveh simuliranih viškov pretokov za vsako obdobje, rezultati računa se nahajajo v preglednici 7.10.

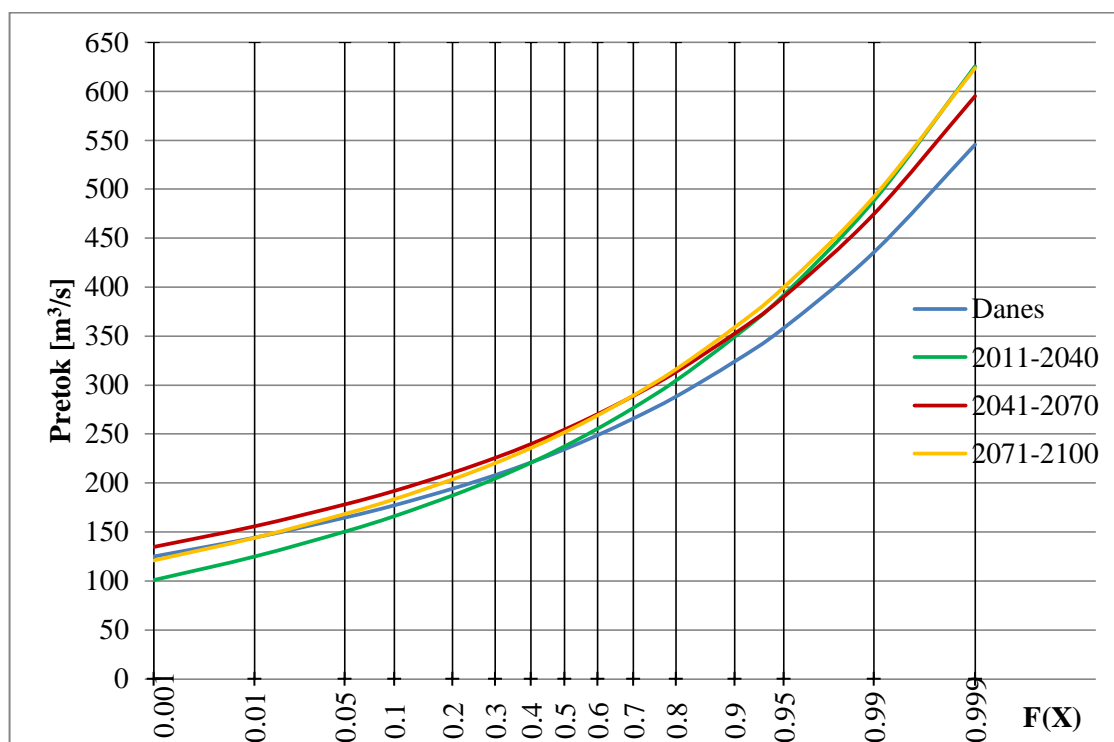
Preglednica 7.10: Srednje vrednosti in standardni odkloni za pretoke v prihodnosti

Obdobje	Danes	2011–2040	2041–2070	2071–2100
Simulirani višek ($z_G = 1.175$) [m ³ /s]	316.09	339.33	343.90	349.42
Simulirani višek ($z_G = 2.133$) [m ³ /s]	374.55	412.26	407.88	419.30
μ_X [m ³ /s]	244.37	249.85	265.40	263.69
σ_X [m ³ /s]	61.03	76.13	66.79	72.95

Slika 7.6 prikazuje Gumbelovo porazdelitev pretokov na postaji Miren za štiri obravnavana obdobja. Na sliki 7.7 je porazdelitev vrisana v verjetnostno mrežo standardne normalne porazdelitve.



Slika 7.6: Gumbelova porazdelitev pretokov na postaji Miren za štiri obravnavana obdobja



Slika 7.7 Gumbelova porazdelitev pretokov v verjetnostni mreži standardne normalne porazdelitve

Na sliki 7.6 so označeni tudi 4 pari simuliranih pretokov v obravnavanih obdobjih, ki določajo naklon in začetno vrednost premic. Označene točke se nahajajo na dveh vertikalah, ker simulirani pretoki ohranjajo povratno dobo tudi v prihodnosti. Porazdelitvene premice za obdobja 2011–2040, 2041–2070 in 2071–2100 so v primerjavi z osnovno Gumbelovo porazdelitvijo premaknjene navzgor (srednja vrednost je povečana), spremeni pa se tudi njihov naklon (standardni odklon). Naklon je najbolj strm pri porazdelitvi za obdobje 2011–2040, ker je razlika med simuliranimi pretokoma v scenarijih Ret 20 2011–2040 in Ret100 2011–2040 največja. Glede na to premico lahko v obdobju 2011–2040 celo pričakujemo zmanjšanje pretokov z nizko povratno dobo. Premica, ki velja za obdobje 2041–2070, ima najmanjši naklon, vzrok je anomalija pri povečanju pretoka zaradi 100-letnih padavin v tem obdobju. Glede na ostali dve porazdelitvi lahko v obdobjih 2011–2040 in 2071–2100 pričakujemo približno enake velikosti pretokov z visokimi povratnimi dobami.

V preglednici 7.11 so prikazane vrednosti pretokov z različnimi povratnimi dobami za štiri obravnavana obdobja. Zanima nas predvsem 100-letni pretok. V primerjavi z današnjo vrednostjo se bo v obdobju 2011–2040 povečal za 12 %, v obdobju 2041–2070 za 9 %, v obdobju 2071–2100 pa se bo povečal za 13 %. Če se želimo zavarovati pred 100-letnimi poplavami Vipave v Mirnu, moramo torej upoštevati, da se bo 100-letni pretok do konca 21. stoletja povečal na 493 m³/s.

Preglednica 7.11: Pretoki z različnimi povratnimi dobami po Gumbelovi porazdelitvi

P(X)	T [let]	F(X)	z _G	Pretoki [m ³ /s]			
				Danes	2011–2040	2041–2070	2071–2100
0.999	1.001	0.001	-1.957	124.94	100.87	134.70	120.93
0.99	1.010	0.01	-1.641	144.24	124.94	155.82	143.99
0.95	1.053	0.05	-1.306	164.69	150.46	178.21	168.45
0.9	1.111	0.1	-1.100	177.22	166.08	191.91	183.42
0.8	1.25	0.2	-0.821	194.26	187.34	210.56	203.79
0.7	1.429	0.3	-0.595	208.07	204.57	225.68	220.30
0.6	1.667	0.4	-0.382	221.06	220.78	239.90	235.83
0.5	2	0.5	-0.164	234.34	237.35	254.43	251.70
0.4	2.5	0.6	0.074	248.86	255.46	270.33	269.06
0.3	3.333	0.7	0.354	265.96	276.79	289.03	289.49
0.2	5	0.8	0.719	288.27	304.63	313.45	316.17
0.1	10	0.9	1.305	323.98	349.17	352.53	358.85
0.05	20	0.95	1.866	358.23	391.90	390.02	399.79
0.01	100	0.99	3.137	435.79	488.65	474.90	492.50
0.001	1000	0.999	4.936	545.56	625.60	595.04	623.72

8 ZAKLJUČKI

Hidrološki modeli so uporabno orodje za napovedovanje površinskega odtoka. Danes je na voljo veliko vrst modelov, izbira pa je ključnega pomena pri hidrološkem modeliranju. Točkovni modeli so se razvili v distribuirane, katerih rezultati so funkcija prostora in časa. Model HBV-light je delno distribuiran, kar pomeni, da do neke mere lahko razdelimo območje na posamezne enote, ne moremo pa za vsako točko v prostoru definirati njenih lastnosti.

Vsi modeli za napovedovanje odtoka so ne glede na vrsto odvisni od kvalitete vhodnih podatkov, predvsem padavin. Zavedati se moramo, da do napak pride že pri samem merjenju količine padavin na padavinskih postajah. Izjemno pomembno je tudi število merilnih mest, od katerega je odvisna ploskovna ocena količine padavin na podpovodju po metodi Thiessenovih poligonov. V izdelani model je bilo vključenih 12 merilnih mest padavin, kar bi moralo zadoščati za dobro kalibracijo modela porečja te velikosti. V primeru urnega časovnega koraka smo zaradi premajhnega števila avtomatskih postaj morali uporabiti dnevne podatke padavin, pri čemer smo predpostavili, da so padavine na navadni postaji razporejene na enak način kot na najbližji avtomatski postaji. Tudi to bi lahko povzročilo napake pri simulaciji urnih pretokov.

Poleg padavin so pomemben vhodni podatek tudi pretoki, glede na katere umerjamo model. Pri izdelavi modela porečja Vipave smo bili zaradi lokacije določenih merilnih mest pretokov primorani sprejeti nekatere predpostavke, ki so zagotovo vplivale na kvaliteto modela. Ostali možni viri napak so še nepoznavanje lastnosti porečja, poenostavljena struktura modela ter izbira načina kalibracije.

Model HBV-light je novejša verzija modela HBV, namenjena predvsem izobraževanju študentov, zato je njegova struktura nekoliko poenostavljena. Glavno slabost v primerjavi s starejšim HBV-96 modelom smo videli predvsem v načinu izračuna količine padavin na podpovodjih. Pri modelu HBV-96 je potrebno podati le izmerjene količine padavin na posameznih merilnih mestih, nadmorske višine merilnih mest ter uteži Thiessenovih poligonov, model pa nato sam izračuna količino padavin za posamezno podpovodje in pri tem upošteva nadmorsko višino merilnih mest. Pri HBV-light verziji pa mora uporabnik vnesti že izračunane količine padavin ter nadmorsko višino, na kateri naj bi bile izmerjene padavine celotnega podpovodja. Problem nastopi pri podajanju te nadmorske višine, glede na katero model kasneje korigira podano količino padavin po višinskih pasovih. Druga pomembna razlika med modeloma je »ogrevalno obdobje«, ki nastopa pri HBV-light različici. V tem obdobju pretokov ne moremo simulirati, ugotovili pa smo tudi, da dolžina obdobja precej vpliva na rezultate simulacij. »Ogrevalno obdobje« mora biti dovolj dolgo, kar je lahko problem, če imamo na voljo le kratek časovni niz podatkov.

Prednost HBV-light modela pred HBV-96 modelom je vsekakor grafični vmesnik, ki omogoča hitrejše in lažje vnašanje vhodnih podatkov ter pregledovanje rezultatov. Poleg tega je združljiv z orodjem za ocenjevanje parametrov PEST, s pomočjo katerega lahko izvedemo avtomatizirano kalibracijo modela.

Program PEST je izjemno uporaben program, ki se lahko prilagodi širokemu spektru modelov. Z njegovo uporabo smo predvsem skrajšali postopek kalibracije modela ter odpravili subjektivnost, ki je prisotna pri ročni kalibraciji. Merilo kvalitete modela namreč ni bila vizualna primerjava simuliranih in izmerjenih pretokov, pač pa točno določena ciljna funkcija, ki je v postopku optimizacije zmanjšana na minimum. Tako nam ni bilo potrebno po občutku prilagajati parametrov ter se na podlagi lastne presoje odločiti, kdaj je postopek zaključen, ampak je bilo to prepuščeno programski opremi.

Za uspešno delovanje PEST-a je potrebno poznati matematične temelje GML algoritma. Potek iskanja optimiziranega seta parametrov namreč določa veliko število spremenljivk, ki jih moramo definirati v kontrolni datoteki. Z napačno izbiro vrednosti teh spremenljivk se lahko zgodi, da končni set parametrov v resnici ni najboljši možen in bi postopek lahko izboljšali. Predhodnih izkušenj z uporabo PEST-a nismo imeli, zato smo se oprli na podatke iz literature ter izbrane vrednosti preizkusili na sintetičnem primeru. Ker vpliva čisto vseh spremenljivk na hitrost in kvaliteto postopka izbire parametrov nismo preučevali, obstajajo možnosti izboljšav na tem področju.

Kalibracijo modela smo torej izvedli avtomatizirano, vendar je to prineslo druge slabosti. Imeli smo manjši nadzor nad postopkom optimizacije ter izbiro parametrov in slab občutek o vplivu posameznih parametrov na velikost simuliranega pretoka, parametri pa so izgubili fizikalen pomen. PEST je poiskal optimiziran set parametrov, ni pa nujno, da vrednosti parametrov ustrezajo lastnostim območja. Možnih je tudi več različnih setov parametrov, ki dajo podobne simulacije pretokov, vendar ne vemo, kateri set je dejansko najboljši za napovedovanje pretokov v prihodnosti.

Izdelani so bili trije modeli porečja Vipave, osnovni z dnevnim časovnim korakom, iz njega izpeljani model z urnim časovnim korakom ter ponovno umerjeni model z urnim časovnim korakom. Izkazalo se je, da nekaterih podpovodij ni bilo mogoče dobro umeriti, kar je problem kraškega površja in tudi kvalitete vhodnih podatkov. Model z urnim časovnim korakom je bolj primeren za simulacijo maksimalnih pretokov oziroma poplavnih valov, saj model z dnevnim časovnim korakom simulira le dnevna povprečja pretokov.

Če primerjamo parametre modelov, ugotovimo, da imajo bolj empiričen kot fizikalen pomen. Razlike med njimi so namreč prevelike, da bi lahko opisovali lastnosti podpovodij. V nekaterih primerih se njihove vrednosti nahajajo tudi izven meja, ki so realno možne in bi jih upoštevali v primeru ročne kalibracije. Z analizo občutljivosti parametrov smo določili tudi ključna parametra modela HBV-light, to sta recesijska koeficienta $K0$ in $K1$. Če bi želeli model poenostaviti in število parametrov zmanjšati, bi se oprli na rezultate analize občutljivosti.

Modele smo uporabili za simulacijo vpliva podnebnih sprememb na pretoke reke Vipave. Vpliva povišane temperature zraka na evapotranspiracijo sicer nismo mogli ovrednotiti, saj vhodne datoteke z dolgoletnimi povprečnimi temperaturami zraka nismo podali. Model bi bilo torej možno nadgraditi tako, da bi se vrednost evapotranspiracije korigirala glede na temperaturo zraka. V tem primeru bi bilo za vsako podpovodje potrebno umeriti tudi dodaten parameter *CET*.

Podnebne spremembe naj bi poleg povišanih temperatur zraka povzročile tudi večjo količino padavin, kar bi povzročilo večje pretoke Vipave. Na podlagi rezultatov simulacij različnih scenarijev v jesenskem obdobju smo ugotovili, da lahko zaradi povečane količine 100-letnih padavin do leta 2100 na postaji Miren I pričakujemo povišanje pretokov za približno 12 %. Glede na verjetnostno analizo pretokov Vipave pa naj bi se 100-letni pretok do leta 2100 povečal za 13 %, na kar bi se morali pripraviti z ustreznimi ukrepi.

Problematika podnebnih sprememb je precej kompleksna, zato težko z gotovostjo ovrednotimo velikosti sprememb pretokov. Vendar so rezultati modela, z ozirom na kraški značaj Vipave, ustreznega velikostnega reda, in lahko zaključimo, da je model HBV-light primerno orodje za simulacijo podnebnih sprememb.

VIRI

Aghakouchak, A., Habib, E. 2010. Application of a Conceptual Hydrologic Model in Teaching Hydrologic Processes. *International Journal of Engineering Education* 26, 4: 963–973.
http://amir.eng.uci.edu/publications/10_EduHBV_IJEE.pdf (Pridobljeno 1. 3. 2013.)

ARSO, javne informacije Slovenije. <http://www.meteo.si> (Pridobljeno 1. 5. 2013.)

ARSO. 2009a. Hidrološko poročilo o povodnji v dneh od 23. do 27. decembra 2009.
<http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/VV231209.pdf> (Pridobljeno 1. 6. 2013.)

ARSO. 2009b. Poročilo o visokovodni situaciji od dne 29. 3. do 31. 3. 2009.
<http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/VV29-31-3-2009.pdf>
(Pridobljeno 1. 6. 2013.)

ARSO. 2010a. Hidrološko poročilo o povodnji v dneh od 17. do 21. septembra 2010.
<http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Poplave%2017.%20-%2021.%20september%202010.pdf> (Pridobljeno 1. 6. 2013.)

ARSO. 2010b. Hidrološko poročilo o visokih vodah v dneh med 6. in 10. decembrom 2010.
http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Porocilo_poplave_dec2010.pdf
(Pridobljeno 1. 6. 2013.)

ARSO. 2010c. Hidrološko poročilo o visokih vodah v dneh med 23. in 27. decembrom 2010.
http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Porocilo_poplave_konec2010.pdf
(Pridobljeno 1. 6. 2013.)

ARSO. 2012. Hidrološko poročilo o poplavah v dneh med 27. in 28. oktobrom 2012.
<http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Poplave%2027.%20-%2028.%20oktober%202012.pdf> (Pridobljeno 1. 6. 2013.)

ARSO. 2013a. Podatki za Vipavo. Message to: Kobold, M. 9. 5. 2013. Osebna komunikacija.

ARSO. 2013b. Podatki za Vipavo. Message to: Vičar, Z. 22. 5. 2013. Osebna komunikacija.

Atlas okolja. http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso (Pridobljeno 1. 5. 2013.)

Bergant, K. 2010. Podnebje v prihodnosti – koliko vemo o njem? V: Cegnar, T. (ur.). *Okolje se spreminja: podnebna spremenljivost Slovenije in njen vpliv na vodno okolje*. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje: 141–159.
<http://www.arso.gov.si/novice/datoteke/025928-Okolje%20se%20spreminja.pdf> (Pridobljeno 6. 6. 2013.)

Bergström, S. 1991. Principles and Confidence in Hydrological Modeling. *Nordic Hydrology* 22, 2: 123–136.
<http://www.oocities.org/haniskywalker/bergstrom1991.pdf> (Pridobljeno 2. 5. 2013.)

Bergström, S. 1995. The HBV Model. V: Singh, V. P. (ur.). *Computer Models of Watershed Hydrology*. Littleton, Colorado, Water Resources Publications: 443–476.

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

Brilly, M., Šraj, M. 2006. Modeliranje površinskega odtoka in navodila za program HEC-HMS. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 99 str.

Brilly, M., Šraj, M., Vidmar, A., Primožič, M., Koprivšek, M. 2012. Climate change impact on flood discharge, Hydrology Report, Part 2. Osebna komunikacija. (31. 1. 2013.)

Clark, D. 2011. How will climate change affect rainfall? *The Guardian*, četrtek, 15. december 2011.
<http://www.guardian.co.uk/environment/2011/dec/15/climate-change-rainfall> (Pridobljeno 7. 6. 2013.)

Doherty, J. 2005. *PEST, Model-Independent Parameter Estimation, User Manual: 5th Edition*. Brisbane, Water Numerical Computing.
<http://www.pesthomepage.org/Downloads.php> (Pridobljeno 7. 4. 2013.)

Doherty, J. 2012. Addendum to the PEST Manual. Brisbane, Australia, Water Numerical Computing.
<http://www.pesthomepage.org/Downloads.php> (Pridobljeno 2. 4. 2013.)

Frantar, P. 2008a. Odočni količniki. V: Frantar, P. (ur.). *Vodna bilanca Slovenije 1971–2000 = Water balance of Slovenia 1971–2000*. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje: 66–70.

Frantar, P. 2008b. Specifični odtoki 1971–2000. V: Frantar, P. (ur.). *Vodna bilanca Slovenije 1971–2000 = Water balance of Slovenia 1971–2000*. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje: 61–66.

Frantar, P. 2008c. Vodna bilanca obdobja 1971–2000. V: Frantar, P. (ur.). *Vodna bilanca Slovenije 1971–2000 = Water balance of Slovenia 1971–2000*. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje: 71–80.

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

Frantar, P., Nadbath, M., Ulaga, F. Vplivni dejavniki na vodno bilanco. V: Frantar, P. (ur.). *Vodna bilanca Slovenije 1971–2000 = Water balance of Slovenia 1971–2000*. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje: 15–28.

Gams, I. 1996. *Geografske značilnosti Slovenije za srednje šole*. Ljubljana, Mladinska knjiga: 183 str.

Gavin, H. 2011. *The Levenberg-Marquardt method for nonlinear least squares curve-fitting problems*. Durham, University of Duke: 15 str.
<http://people.duke.edu/~hpgavin/ce281/lm.pdf> (Pridobljeno 4. 5. 2013.)

Haylock, M. R., Hofstra, N., Klein Tank, A. M. G., Klok, E. J., Jones, P. D., New, M. 2008. A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 113, D20119: 12 str.

http://eca.knmi.nl/download/ensembles/Haylock_et_al_2008.pdf (Pridobljeno 3.6.2013.)

IHMS. 1999. Integrated Hydrological Modelling System. Manual, Version 4.5. Norrköping, Sweden, Swedish Meteorological and Hydrological Institute: 121 str.

Kajfež-Bogataj, L. 2008. Kaj nam prinašajo podnebne spremembe? Ljubljana, Pedagoški inštitut: 134 str.

KNMI, projekt ECA&D. <http://eca.knmi.nl>. (Pridobljeno 3. 6. 2013.) We acknowledge the E-OBS dataset from the EU-FP6 project ENSEMBLES (<http://ensembles-eu.metoffice.com>) and the data providers in the ECA&D project (<http://www.ecad.eu>).

Kobold, M. 2009. Vpliv podnebnih sprememb na ekstremne hidrološke pojave. *Ujma* 23: 128–135.

<http://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/2009/128.pdf> (Pridobljeno 10. 6. 2013.)

Kobold, M., Sušelj, K. 2005. Padavinske napovedi in njihova nezanesljivost v hidrološkem prognoziranju. V: Raziskave s področja geodezije in geofizike 2004, Zbornik predavanj. Ljubljana, Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko: 61–75.

http://www.fgg.uni-lj.si/sugg/referati/2005/SZGG_05_Kobold_Suselj.pdf (Pridobljeno 2. 5. 2013.)

Kobold, M., Sušelj, K., Štravs, L., Brilly, M. 2003. Razvoj evropskega poplavnega prognostičnega sistema. V: 14. Mišičev vodarski dan 2003, Zbornik referatov. Maribor, VGB Maribor: 39–47.

http://www.arso.gov.si/o%20agenciji/knji%C5%BEnica/publikacije/Razvoj_evropskega_poplavnega.pdf (Pridobljeno 1. 5. 2013.)

Komac, B., Natek, K., Zorn, M. 2008. Geografski vidiki poplav v Sloveniji. Ljubljana, Založba ZRC: 180 str.

Lawrence, D., Haddeland, I., Langsholt, E. 2009. Calibration of HBV hydrological models using PEST parameter estimation. Oslo, Norwegian Water Resources and Energy Directorate: 44 str.

<http://195.18.194.201/Global/Publikasjoner/Publikasjoner%202009/Report%202009/report1-09.pdf> (Pridobljeno 2. 5. 2013.)

Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., Bergström, S. 1995. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology* 201, 1–4: 272–288.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169497000413> (Pridobljeno 1. 5. 2013.)

Mckillop, R. 2004. Hydrology, Lecture notes, Chapter 6. University of Waterloo: 45 str.

http://www.civil.uwaterloo.ca/cive486/fall2004_mckillop/chapter6.pdf (Pridobljeno 1. 5. 2013.)

Pechlivanidis, I. G., Jackson, B. M., McIntyre, N. R., Wheater, H. S. Catchment scale hydrological modelling: A review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. *Global NEST Journal*, 13, 3: 193–214.

http://www.gnest.org/journal/Vol_13_No_3/193-214_778_Pechlivanidis_13-3.pdf (Pridobljeno 12. 6. 2013.)

Posoški razvojni center, projekt Camis. <http://www.camisproject.eu> (Pridobljeno 11. 6. 2013.)

Primožič, M. 2007. Umerjanje modela HBV za porečje reke Save v Sloveniji. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Primožič): 81 str.

Primožič, M., Brilly, M. 2012. Hidrološki model Vipave. Osebna komunikacija. (22. 4. 2013.)

Schaake, J. C. 2003. Introduction. V: Duan, Q. (ur.), Gupta, H. V. (ur.), Sorooshian, S. (ur.), Rousseau, A. N. (ur.), Trucotte, R. (ur.). Calibration of Watershed Models, Water Science and Application, vol. 6. Washington, D. C., American Geophysical Union: 1–7.

Seibert, J. 2000. Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm. Hydrology and Earth System Sciences 4, 2: 215–224.
<http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/30/45/96/PDF/hess-4-215-2000.pdf> (Pridobljeno 2. 5. 2013.)

Seibert, J. 2005. HBV light version 2, User's manual. Stockholm, Stockholm University, Department of Physical Geography and Quaternary Geology: 16 str.
http://people.su.se/~jseib/HBV/HBV_manual_2005.pdf (Pridobljeno 1. 4. 2013.)

Seibert, J. 2005. The HBV model. Stockholm, Stockholm University, Department of Physical Geography and Quaternary Geology: 16 str.
http://people.su.se/~jseib/HBV/HBV_manual_2005.pdf (Pridobljeno 1. 4. 2013.)

Seibert, J., Beven, K. J. 2009. Gauging the ungauged basin: how many discharge measurements are needed? Hydrology and Earth System Sciences 13, 6: 883–892.
<http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/13/883/2009/hess-13-883-2009.html> (Pridobljeno 1. 5. 2013.)

Seibert, J., Vis, M. J. P. 2012. Teaching hydrological modeling with user-friendly catchment-runoff-model software package. Hydrology and Earth System Sciences 16, 11: 3315–3325.
<http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/16/3315/2012/hess-16-3315-2012.pdf> (Pridobljeno 21. 3. 2013.)

Singh, V. P. 1995. Watershed Modeling. V: Singh, V. P. (ur.). Computer Models of Watershed Hydrology. Littleton, Colorado, Water Resources Publications: 1–22.

Singh, V. P., Woolhiser, D. A. 2002. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. Journal of Hydrologic Engineering 7, 4: 270–292.
[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2002\)7:4\(270\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2002)7:4(270)) (Pridobljeno 18. 4. 2013.)

Skahill, B. E., Doherty, J. 2006. Efficient accommodation of local minima in watershed model calibration. Journal of Hydrology 329, 1–2: 122–139
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169406000734> (Pridobljeno 2. 5. 2013.)

Solomatine, D. P., Dibike, Y. B., Kukuric, N. 1999 Automatic calibration of groundwater models using global optimization techniques. Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques, 44, 6: 879–894.
http://iahs.info/hsj/440/hsj_44_06_0879.pdf (Pridobljeno 5. 5. 2013.)

Šraj, M. 2013. Verjetnostna analiza visokovodnih konic Vipave na vodomerni postaji Miren. Osebna komunikacija. (19. 6. 2013.)

Vaze, J., Jordan, P., Beecham, R., Frost, A., Summerell, G. 2012. Guidelines for rainfall-runoff modelling: Towards best practice model application. Canberra, eWater Cooperative Research Centre 2011: 47 str.

[http://www.ewater.com.au/uploads/files/eWater-Modelling-Guidelines-RRM-\(v1-Mar-2012\).pdf](http://www.ewater.com.au/uploads/files/eWater-Modelling-Guidelines-RRM-(v1-Mar-2012).pdf)

(Pridobljeno 25. 4. 2013.)

Westenbroek, S. M., Doherty, J., Walker, J. F., Kelson, V. A., Hunt, R. J., Cera, T. B. 2012. Approaches in Highly Parameterized Inversion: TSPROC, a General Time-Series Processor to Assist in Model Calibration and Result Sumarization. V: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 7, Chapter 7. Wisconsin, U.S. Geological Survey: 101 str.

http://pubs.usgs.gov/tm/tm7c7/pdf/TM7_C7_112712.pdf (Pridobljeno 5. 4. 2013.)

Zhulu, L. 2010. Getting Started with PEST. Athens, The University of Georgia: 28 str.

<http://www.ndsu.edu/pubweb/~zhulin/pdf/teaching/starting%20pest.pdf> (Pridobljeno 3. 4. 2013.)

»Ta stran je namenoma prazna«

SEZNAM PRILOG

PRILOGA A: Struktura PEST kontrolne datoteke in pomen spremenljivk v njej	A1
PRILOGA B: PEST kontrolna datoteka za umerjanje podpovodja Vipava III	B1
PRILOGA C: Vrednosti parametrov modelov	C1
Preglednica C.1: Vrednosti parametrov umerjenega modela z dnevnim časovnim korakom	C1
Preglednica C.2: Vrednosti parametrov modela z urnim časovnim korakom, izpeljanega iz modela z dnevnim časovnim korakom	C2
Preglednica C.3: Vrednosti parametrov umerjenega modela z urnim časovnim korakom ..	C3

»Ta stran je namenoma prazna«

PRILOGA A: Struktura PEST kontrolne datoteke in pomen spremenljivk v njej

```
pcf
* control data
RSTFLE      PESTMODE
NPAR        NOBS      NPARGP      NPRIOR      NOBSGRP
NTPLFLE     NINSFLE     PRECIS      DPOINT      NUMCOM      JACFILE      MESSFILE
RLAMBDA1    RLMAFAC     PHIRATSUF   PHIREDLAM   NUMLAM
RELPARMAX   FACPARMAX   FACORIG
PHIREDSWH   DOAUI
NOPTMAX     PHIREdstp   NPHISTP     NPHINORED   RELPARSTP   NRELPAR
ICOV        ICOR        IEIG
* parameter groups
PARGPNME    INCTYP      DERINC      DERINCLB    FORCEN      DERINCMUL    DERMTHD
(ena vrstica za vsako skupino parametrov)
* parameter data
PARNME      PARTRANS    PARCHGLIM   PARVAL1     PARLBND     PARUBND     PARGP      SCALE      OFFSET     DERCOM
(ena vrstica za vsak parameter, ki ni vezan)
PARNME      PARTIED
(ena vrstica za vsak vezan parameter)
* observation groups
OBNME
* observation data
OBSNME      OBSVAL      WEIGHT      OBNME
(ena vrstica za vsako opazovano vrednost)
* model command line
(ukaz za pogon modela ali "batch" datoteke)
* model input/output
TEMPFLE     INFLE
(ena vrstica za vsako vhodno datoteko modela, ki vsebuje parametre)
INSFLE      OUTFLE
(ena vrstica za vsako izhodno datoteko modela, ki vsebuje opazovane vrednosti)
```

Spremenljivka	Tip	Vrednost	Opis
RSTFLE	tekst	restart/norestart	omogoča ponoven zagon, če je postopek prekinjen
PESTMODE	tekst	estimation/prediction/ regularisation	način, v katerem teče PEST
NPAR	celo število	> 0	število parametrov
NOBS	celo število	> 0	število opazovanih vrednosti
NPARGP	celo število	> 0	število skupin parametrov
NPRIOR	celo število	karkoli	absolutna vrednost pomeni število predhodnih informacij, negativne vrednosti pomenijo, da so predhodne informacije indeksirane
NOBSGRP	celo število	> 0	število skupin opazovanih vrednosti
NTPLFLE	celo število	> 0	število predlog
NINSFLE	celo število	> 0	število datotek z navodili za iskanje opazovanih vrednosti
PRECIS	tekst	single/double	oblika zapisa vrednosti parametrov v vhodne datoteke modela
DPOINT	tekst	point/nopoint	opuščanje decimalnega ločila v parametrih
NUMCOM	celo število	neobvezno; > 0	število ukaznih vrstic za poganjanje modela
JACFILE	celo število	neobvezno; -1 / 0 / 1	pove, ali model sam računa odvode
MESSFILE	celo število	neobvezno; 0 / 1	pove, ali naj PEST zapiše datoteko komunikacije z modelom
RLAMBDA1	realno število	≥ 0	začetna vrednost Marquardt-ove lambde v GML algoritmu
RLMAFAC	realno število	< 0 ali > 0	določa način prilagajanja Marquardt-ove lambde
PHIRATSUF	realno število	0 - 1	relativno zmanjšanje ciljne funkcije, ki določa konec trenutne iteracije
PHIREDLAM	realno število	0 - 1	kriterij za prenehanje iskanja ustrezne Marquardt-ove lambde
NUMLAM	celo število	≥ 1	največje število Marquardt-ovih lambd, ki jih PEST preizkusi
RELPARMAX	realno število	> 0	največja relativna sprememba parametra
FACPARMAX	realno število	> 1	največja absolutna sprememba parametra
FACORIG	realno število	0 - 1	najmanjši delež originalne vrednosti parametra pri določanju njegove spremembe
PHIREDSWH	realno število	0 - 1	kriterij za zamenjavo načina računanja odvodov
DOAUI	tekst	au/auid/noau	vklučitev avtomatičnega posredovanja v primeru neobčutljivih parametrov
NOPTMAX	celo število	-2 / -1 / 0 / > 0	največje število iteracij
PHIREdstp	realno število	> 0	če je relativno zmanjšanje ciljne funkcije v NPHISTP iteracijah manjše ali enako
NPHISTP	celo število	> 0	PHIREdstp, je optimizacija zaključena
NPHINORED	celo število	> 0	največje število iteracij od zadnjega zmanjšanja objektivne funkcije
RELPARSTP	realno število	> 0	največja relativna sprememba parametra med iteracijami
NRELPAR	celo število	> 0	število iteracij, pri katerih velja RELPARSTP
ICOV	celo število	0 / 1	pove, ali naj PEST zapiše kovariantno matriko
ICOR	celo število	0 / 1	pove, ali naj PEST zapiše matriko korelacijskih koeficientov

se nadaljuje...

... nadaljevanje

IEIG	celo število	0 / 1	pove, ali naj PEST zapiše matriko lastnih vektorjev
PARGPNME	tekst	12 znakov ali manj	ime skupine parametrov
INCTYP	tekst	relative/absolute/ rel_to_max	način izračuna prirastkov parametrov
DERINC	realno število	> 0	absolutna ali relativna vrednost prirastkov
DERINCLB	realno število	≥ 0	najmanjša absolutna vrednost prirastka
FORCEN	tekst	switch/always_2/always_3/ switch_5/always_5	način izračuna odvodov
DERINCMUL	realno število	> 0	množitelj prirastkov pri računu odvodov z metodo centralnih razlik
DERMTHD	tekst	parabolic/outside_pts/ best_fit/minvar/maxprec	vrsta metode centralnih razlik za račun odvodov
PARNME	tekst	12 znakov ali manj	ime parametra
PARTRANS	tekst	log/none/fixed/tied	transformacija parametra
PARCHGLIM	tekst	relative/factor	način omejitve sprememb parametra
PARVAL1	realno število	karkoli	začetna vrednost parametra
PARLBND	realno število	≤ PARVAL1	spodnja meja parametra
PARUBND	realno število	≥ PARVAL1	zgornja meja parametra
PARGP	tekst	12 znakov ali manj	ime skupine parametra
SCALE	realno število	≠ 0	množitelj parametra
OFFSET	realno število	karkoli	dodana vrednost parametru
DERCOM	celo število	≥ 0	vrstica ukaza modela, v kateri model sam izračuna odvode
PARTIED	tekst	12 znakov ali manj	ime matičnega parametra
OBGNME	tekst	12 znakov ali manj	ime skupine opazovanih vrednosti
OBSNME	tekst	20 znakov ali manj	ime opazovane vrednosti
OBSVAL	realno število	karkoli	izmerjena vrednost, s katero primerjamo opazovano vrednost
WEIGHT	realno število	≥ 0	utež opazovane vrednosti
OBSNME	tekst	12 znakov ali manj	skupina, kateri pripada opazovana vrednost
TEMPFLE	tekst	ime datoteke	ime predloge
INFLE	tekst	ime datoteke	ime vhodne datoteke modela
INSFLE	tekst	ime datoteke	ime datoteke z navodili za iskanje opazovanih vrednosti
OUTFLE	tekst	ime datoteke	ime izhodne datoteke modela

»Ta stran je namenoma prazna«

PRILOGA B: PEST kontrolna datoteka za umerjanje podpovodja Vipava III

```

pcf
* control data
restart estimation
22 1280 14 0 1
1 1 single point 1 0 0
5.0 2.0 0.3 0.01 10
3.0 3.0 0.001
0.1 au1
30 0.01 3 3 0.01 3
1 1 1
* parameter groups
tt relative 0.03 0.01 switch 2.0 parabolic
cfmax relative 0.0125 0.02 switch 2.0 parabolic
sfcf relative 0.025 0.025 switch 2.0 parabolic
cfr relative 0.01 0.01 switch 2.0 parabolic
cwh relative 0.01 0.01 switch 2.0 parabolic
fc relative 0.025 1 switch 2.0 parabolic
lp relative 0.01 0.01 switch 2.0 parabolic
beta relative 0.025 0.025 switch 2.0 parabolic
perc relative 0.025 0.02 switch 2.0 parabolic
uzl relative 0.025 0.05 switch 2.0 parabolic
k0 relative 0.02 0.01 switch 2.0 parabolic
k1 relative 0.02 0.005 switch 2.0 parabolic
k2 relative 0.02 0.001 switch 2.0 parabolic
maxbas relative 0.01 0.01 switch 2.0 parabolic
* parameter data
Perc log factor 0.5 0.01 6 perc 1 0 1
Uzl log factor 20 0.01 100 uzl 1 0 1
k0 none factor 0.15 0.1 0.999 k0 1 0 1
k1 none factor 0.05 0.01 0.999 k1 1 0 1
k2 none factor 0.01 0.001 0.1 k2 1 0 1
maxbas none factor 1 1 5 maxbas 1 0 1
tt1 none relative -0.1 -2 2 tt 1 0 1
cfmax1 log factor 3.5 1 10 cfmax 1 0 1
sfcf1 log factor 1 0.4 3 sfcf 1 0 1
cfr1 none relative 0.05 0 0.1 cfr 1 0 1
cwh1 none relative 0.1 0 0.2 cwh 1 0 1
fc1 log factor 150 50 550 fc 1 0 1
lp1 log factor 0.5 0.01 1 lp 1 0 1
beta1 log factor 1 0.01 6 beta 1 0 1
tt2 none relative -0.1 -2 2 tt 1 0 1
cfmax2 log factor 3.5 1 10 cfmax 1 0 1
sfcf2 log factor 1 0.4 3 sfcf 1 0 1
cfr2 none relative 0.05 0 0.1 cfr 1 0 1
cwh2 none relative 0.1 0 0.2 cwh 1 0 1
fc2 log factor 150 50 550 fc 1 0 1
lp2 log factor 0.5 0.01 1 lp 1 0 1
beta2 log factor 1 0.01 6 beta 1 0 1
* observation groups
mflow
* observation data
mflow_1 1.972 1 mflow
mflow_2 2.695 1 mflow
.
.
mflow_1280 1.034 1 mflow
* model command line
HBV-light-CLI Run d:\HM SingleRun d:\HM\Results
* model input/output
d:\HM\Parameter7.tpl d:\HM\Data\Parameter.xml
d:\HM\Results.ins d:\HM\Results\Results_SubCatchment_7.txt
    
```

»Ta stran je namenoma prazna«

PRILOGA C: Vrednosti parametrov modelov

Preglednica C.1: Vrednosti parametrov umerjenega modela z dnevnim časovnim korakom

	KRAS I	KRAS II	VIPAVA I	BRANICA	VIPAVA II	VOGRŠČEK	VIPAVA III
PERC	0.490	0.727	0.535	2.753	0.600	6.065	0.388
UZL	13.674	6.792	1.939	0.624	2.000	6.779	2.196
K0	0.337	0.196	0.951	0.100	0.200	0.301	0.451
K1	0.149	0.010	0.012	0.113	0.050	0.010	0.053
K2	0.082	0.032	0.007	0.003	0.030	0.000	0.020
MAXBAS	2.805	1.198	2.061	2.290	2.000	2.246	1.000
TT1	-0.207	-0.313	-0.308	-0.016	-0.300	-0.050	-0.134
CFMAX1	4.851	2.834	2.454	5.909	3.000	16.891	6.093
SFCF1	1.578	0.379	0.375	0.400	1.000	1.329	1.704
CFR1	0.000	0.100	0.000	0.000	0.050	0.000	0.058
CWH1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.022
FC1	55.7	256.9	446.2	550.0	300.0	670.4	67.6
LP1	1.000	0.249	0.343	0.100	0.300	0.017	0.275
BETA1	0.650	2.366	1.089	5.877	2.000	0.536	8.404
TT2	-0.762	-0.397	-0.114	-0.106	-0.300	0.020	-0.400
CFMAX2	9.340	5.338	10.000	6.623	5.000	7.297	18.485
SFCF2	0.818	1.892	3.000	0.400	1.000	0.319	4.335
CFR2	0.091	0.100	0.000	0.000	0.050	0.000	0.037
CWH2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.107
FC2	61.5	163.4	191.0	550.0	200.0	1000.0	440.6
LP2	1.000	1.000	0.187	0.045	1.000	0.019	0.129
BETA2	0.135	3.637	6.000	1.376	3.000	0.528	5.573

Preglednica C.2: Vrednosti parametrov modela z urnim časovnim korakom, izpeljanega iz modela z dnevnim časovnim korakom

	KRAS I	KRAS II	VIPAVA I	BRANICA	VIPAVA II	VOGRŠČEK	VIPAVA III
PERC	0.020	0.030	0.022	0.115	0.025	0.253	0.016
UZL	13.674	6.792	1.939	0.624	2.000	6.779	2.196
K0	0.014	0.008	0.040	0.004	0.008	0.013	0.019
K1	0.006	0.000	0.001	0.005	0.002	0.000	0.002
K2	0.003	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001
MAXBAS	2.805	1.198	2.061	2.290	2.000	2.246	1.000
TT1	-0.207	-0.313	-0.308	-0.016	-0.300	-0.050	-0.134
CFMAX1	0.202	0.118	0.102	0.246	0.125	0.704	0.254
SFCF1	1.578	0.379	0.375	0.400	1.000	1.329	1.704
CFR1	0.000	0.100	0.000	0.000	0.050	0.000	0.058
CWH1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.022
FC1	55.7	256.9	446.2	550.0	300.0	670.4	67.6
LP1	1.000	0.249	0.343	0.100	0.300	0.017	0.275
BETA1	0.650	2.366	1.089	5.877	2.000	0.536	8.404
TT2	-0.762	-0.397	-0.114	-0.106	-0.300	0.020	-0.400
CFMAX2	0.389	0.222	0.417	0.276	0.208	0.304	0.770
SFCF2	0.818	1.892	3.000	0.400	1.000	0.319	4.335
CFR2	0.091	0.100	0.000	0.000	0.050	0.000	0.037
CWH2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.107
FC2	61.5	163.4	191.0	550.0	200.0	1000.0	440.6
LP2	1.000	1.000	0.187	0.045	1.000	0.019	0.129
BETA2	0.135	3.637	6.000	1.376	3.000	0.528	5.573

Preglednica C.3: Vrednosti parametrov umerjenega modela z urnim časovnim korakom

	KRAS I	KRAS II	VIPAVA I	BRANICA	VIPAVA II	VOGRŠČEK	VIPAVA III
PERC	0.018	0.040	0.027	0.040	0.027	0.027	0.086
UZL	29.283	8.214	13.588	8.214	13.588	13.588	20.751
K0	0.016	0.019	0.012	0.019	0.012	0.012	0.010
K1	0.003	0.011	0.014	0.011	0.014	0.014	0.001
K2	0.012	0.003	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000
MAXBAS	2.698	1.053	1.002	1.053	1.002	1.002	1.203
TT1	-0.434	-0.175	-0.069	-0.175	-0.069	-0.069	-0.167
CFMAX1	0.121	0.136	0.080	0.136	0.080	0.080	0.181
SFCF1	2.083	1.154	0.555	1.154	0.555	0.555	1.177
CFR1	0.000	0.000	0.094	0.000	0.094	0.094	0.000
CWH1	0.154	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.077
FC1	239.0	316.5	265.4	316.5	265.4	265.4	154.6
LP1	1.000	0.432	0.428	0.432	0.428	0.428	0.511
BETA1	0.649	1.519	1.319	1.519	1.319	1.319	1.011
TT2	0.008	-0.171	-0.112	-0.171	-0.112	-0.112	-0.132
CFMAX2	1.001	0.227	0.142	0.227	0.142	0.142	0.197
SFCF2	4.052	2.240	0.799	2.240	0.799	0.799	0.648
CFR2	0.000	0.000	0.046	0.000	0.046	0.046	0.048
CWH2	0.000	0.000	0.026	0.000	0.026	0.026	0.000
FC2	168.4	364.5	277.2	364.5	277.2	277.2	136.7
LP2	1.000	0.677	0.335	0.677	0.335	0.335	0.488
BETA2	0.049	2.321	1.979	2.321	1.979	1.979	1.234

»Ta stran je namenoma prazna«