

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

ANDREJ VIDMAR

**UMERJANJE DELNO DISTRIBUIRANIH
HIDROLOŠKIH MODELOV**

Doktorska disertacija

**CALIBRATION OF SEMI DISTRIBUTED
HYDROLOGICAL MODELS**

Doctoral thesis

Ljubljana, januar 2021

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

**Interdisciplinarni doktorski študijski program tretje stopnje Grajeno okolje,
smer Gradbeništvo**

ANDREJ VIDMAR

**UMERJANJE DELNO DISTRIBUIRANIH
HIDROLOŠKIH MODELOV**

Doktorska disertacija

**CALIBRATION OF SEMI DISTRIBUTED
HYDROLOGICAL MODELS**

Doctoral thesis

Ljubljana, januar 2021

Komisija za zagovor:

Predsednik: prof. dr. Matjaž Mikoš

Mentor: prof. dr. Mitja Brilly

Član: izr. prof. dr. Mojca Šraj

Član: prof. dr. Ognjen Bonacci

POPRAVKI - ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Spodaj podpisani Andrej Vidmar, študent Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, z vpisno številko 27600193, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: [Umerjanje delno distribuiranih hidroloških modelov],

IZJAVLJAM,

1. a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;

b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil soglasje etične komisije;
5. da soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija;
8. da dovoljujem uporabo mojega rojstnega datuma v zapisu COBISS.

V/Na: Ljubljani

Datum: 5.1.2001

Podpis študenta:



BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 004.42:556(043)

Avtor: mag. Andrej Vidmar, univ. dipl. inž. grad.

Mentor: prof. dr. Mitja Brilly

Naslov: Umerjanje delno distribuiranih hidroloških modelov

Obseg in oprema: 156 str., 38 pregl., 0 graf., 57 sl., 25 en., 7 pril., 100 virov

Ključne besede: delno distribuirani hidrološki model, učinkovitost umerjanja modela, Gauss-Levenberg-Marquardt postopek (GLM), singularni razcep (SVD), Tihonova regularizacija, vzporedno procesiranje

Izvleček:

Doktorska disertacija obravnava področje hidrologije in hidroloških modelov. Hidrološki pojavi se oblikujejo v hidrološkem sistemu, ki ga določa narava in so v osnovi stohastični. Pojavi so enkratni, neponovljivi in spreminjajoči se v prostoru in času. Simuliramo jih s pomočjo različnih hidroloških modelov, s katerimi poskušamo integrirati kompleksne procese, ki jih ponazarjajo zvezne funkcije. V preteklosti so bili razviti različni modeli, ki simulirajo različne hidrološke procese. Vendar so neskladja med simuliranimi in merjenimi vrednostmi še vedno velika in predstavljajo izziv mnogim raziskovalcem. Modeli vsebujejo veliko parametrov, ki jih je nemogoče neposredno izmeriti. Vrednosti večine teh parametrov so določene v postopku umerjanja, ki pogojuje učinkovitost takšnih modelov. Postopek umerjanja modela je obremenjen s pomanjkanjem podatkov in poenostavitvami, s katerimi rešujemo matematični model. Omenjene obremenitve povzročajo šume oziroma odstopanja med rezultati izračuna, ki nam jih poda model, in meritvami, ki smo jih pridobili v naravi. V postopku umerjanja modela poskušamo določiti parametre, ki jih vsebujejo posamezne funkcije, tako da so razlike med izračunom in meritvami čim manjše.

Doktorska disertacija predstavlja uporabo izboljšanega postopka Gaussa-Levenberga-Marquardta (GLM) v kombinaciji s singularnim razcepom (SVD) in regularizacijo po metodi Tihonova. S takšnim postopkom izboljšamo umerjanja hidrološkega modela. Postopek se je preskušal na prosto dostopnem hidrološkem modelu z uporabo sintetičnih podatkov in na realnih modelih porečja Savinje v Sloveniji in reke Bosne v Bosni in Hercegovini. Na podlagi več kazalcev učinkovitosti umerjanja modela je bilo ugotovljeno, da postopek GLM v kombinaciji s SVD in Tihonovo regularizacijo zagotavlja učinkovito ujemanje zgodovine sintetičnega modela in skoraj popolno umerjanje parametrov. S pomočjo Tihonove regularizacije parametrov se je izdatno izboljšalo umerjanje modela in dosegla minimalna varianca napak. Poleg tega je bilo s primerjavo rezultatov predlaganega postopka z rezultati globalnih evolucijskih postopkov umerjanja ugotovljeno, da je samo umerjanje s kombiniranim postopkom GLM popolnoma simuliralo nizke pretoke. Ne nazadnje je bil šum pri rezultatih izračuna pri kombinirani metodi GLM z regularizacijo Tihonova praktično enak v postopku umerjanja in validaciji. To kaže, da je v rezultatih ostal le računski šum.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**UDC:** 004.42:556(043)**Author:** mag. Andrej Vidmar, univ. dipl. inž. grad.**Supervisor:** prof. dr. Mitja Brilly**Title:** Calibration of semi-distributed hydrological models**Scope and tools:** 156 p., 38 tab., 57 fig., 0 graph., 25 eq., 7 app., 100 ref.**Keywords:** semi-distributed hydrological model, calibration model efficiency, Gauss-Levenberg-Marquardt procedure (GLM), singular value decomposition (SVD), Tikhonov regularization, parallel computing**Abstract:**

The doctoral dissertation deals with the field of hydrology and hydrological models. Hydrological phenomena are formed in a hydrological system determined by nature and are stochastic. Phenomena are unique, unrepeatable, and changing in space and time. We simulate these natural processes with the help of various hydrological models with which we try to integrate complex processes illustrated by continuous functions. In the past, different models have been developed to simulate different hydrological processes. However, discrepancies between simulated and measured values are still significant and pose a challenge to many researchers. The models contain many parameters that cannot be measured directly. The values of most of these parameters are determined in the calibration process, which is conditioned by the efficiency of such models. The process of model calibration is burdened by the lack of data and simplifications with which we solve the mathematical model. These all cause noise, or deviations between the results of the calculation given to us by the model and the measurements obtained in nature. In the process of calibrating the model, we try to determine the parameters contained in the individual functions so that the differences between the simulation and measurements are as small as possible.

The doctoral dissertation presents the use of the enhanced Gauss-Levenberg-Marquardt (GLM) procedure in combination with singular value decomposition (SVD) and Tikhonov regularization. With such a procedure, we improve the calibrations of the hydrological model. The procedure was tested on a freely accessible hydrological model using synthetic data and on real models of the Savinja river basin in Slovenia and the Bosna river in Bosnia. Based on several model calibration efficiency indicators, it was found that the GLM process in combination with SVD and Tikhonov regularization ensures efficient matching of the history of the synthetic model and almost complete calibration of the parameters. With the help of Tikhonov parameter regularization, the calibration of the model was significantly improved, and a minimum error variance was achieved. Also, by comparing the results of the proposed process with the results of global evolutionary calibration processes, it was found that the calibration with the combined GLM process alone fully simulated low flows. Last but not least, the noise in the calculation results of the combined GLM method with Tikhonov regularization was practically the same either in the calibration or validation process, which shows that only the calculation noise remained in the results.

ZAHVALE

Za namenjen čas, nasvete, kritično presojo in nenehno spodbujanje pri izdelavi doktorske disertacije se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Mitji Brillyju.

Seveda gre še posebna zahvala moji družini, mojim bližnjim in tudi Vsem prijateljem, ki so mi pomagali, nudili podporo in motivacijo.

Zahvaljujem se tudi Agenciji Republike Slovenije za okolje za dostop in posredovanje podatkov.

KAZALO VSEBINE

POPRAVKI - ERRATA	II
IZJAVE	III
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	IV
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	V
ZAHVALE	VI
KAZALO VSEBINE	VII
KAZALO PREGLEDNIC	IX
KAZALO SLIK	XI
KAZALO PRILOG	XIII
LIST OF TABLES	XIV
LIST OF FIGURES	XVI
LIST OF APPENDICES	XVIII
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI / ABBREVIATIONS AND SYMBOLS	XIX
1 UVOD	1
1.1 Opis problematike in relevantnost problema	1
1.2 Cilj naloge	3
1.3 Hipoteze	5
2 METODE DELA	7
2.1 Splošno	7
2.2 Hidrološki model HBV	10
2.3 PEST računalniško orodje za umerjanje	16
2.4 Teoretične osnove programskega orodja	17
2.4.1 Priprava nadzorne datoteke	19
2.4.2 Priprava datoteke z navodili	26
2.4.3 Priprava datoteke predloge parametrov	27
2.4.4 Gauss-Levenberg-Marquardt algoritem	27
2.4.5 Izhodne datoteke programa PEST	30
2.5 Evolucijski algoritmi	31
2.6 Dodatni postopki med hidrološkim modelom in programskim orodjem PEST	33
2.6.1 Clbrt.cmd - vzporedno umerjanje s PEST_HP	33
3 PRIMERI UMERJANJA MODELOV	42
3.1 Umerjanja testnega modela	42
3.1.1 Izbor osnovnega hidrološkega modela HBV-light	42
3.1.2 Postopek predpriprave modela HBV-light za PEST	42

3.1.3	Vzpostavitev povezovanja PEST-a s HBV-light.....	50
3.1.3.1	Priprava nadzorne datoteke (PCF).....	50
3.1.3.2	Priprava datoteke z navodili (PIF).....	52
3.1.3.3	Priprava datoteke podloge parametrov (PTF).....	54
3.1.4	Postopki uteževanja in regularizacije	57
3.1.5	Umerjanje s PEST_HP	62
3.1.6	Umerjanje z GAP.....	68
3.1.6.1	Prvo umerjanje z GAP	69
3.1.6.2	Drugo umerjanje z GAP	71
3.1.7	Umerjanje s CMA-ES.....	72
3.1.8	Vzporejanje rezultatov umerjanja testnega modela	77
3.2	Umerjanje modela reke Bosne.....	87
3.2.1	Opis porečja.....	87
3.2.2	Vhodni podatki	94
3.2.3	Umerjanje in validacija modela	95
3.2.4	Rezultati izračuna	98
3.3	Umerjanje modela reke Savinje.....	100
3.3.1	Umerjanje hidrološkega modela porečja Savinje razdeljenega na 21 prispevnih površin 102	
3.3.2	Umerjanje hidrološkega modela porečja Savinje razdeljenega na 77 prispevnih površin 106	
3.3.3	Vzporejanje rezultatov umerjanj.....	112
4	ZAKLJUČKI IN RAZPRAVA	114
4.1	Bistvene ugotovitve	114
4.2	Potrditve hipotez.....	115
5	POVZETEK.....	117
6	SUMMARY.....	118
VIRI		119
PRILOGE / APPENDIX		125

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Calib.pst je PEST nadzorna datoteka za umerjanje podporečja HBV-Land.	19
Preglednica 2: Opis parametrov nadzorne datoteke PEST.	21
Preglednica 3: Obvezni oddelki kontrolne datoteke PEST [64].	26
Preglednica 4: Originalne datoteke modela HBV-Land v mapi .\Data\	43
Preglednica 5: Izpisek datoteke evapotranspiracije EVAP.txt.	44
Preglednica 6: Datoteka PTQ.txt.	45
Preglednica 7: Datoteka T_MEAN.txt.	47
Preglednica 8: Originalne datoteke mape .\Results\ modela HBV-Land	48
Preglednica 9: Prikaz izmerjenih in izračunanih visokovodnih konic neumerjenega primera HBV-Land v datoteki Peaks.txt.	49
Preglednica 10: Summary.txt prikazuje rezultat modelske učinkovitosti neumerjenega primera HBV-Land (SubCatchment1) v HBV-light.	49
Preglednica 11: PEST navodilna datoteka za opazovano grupo »01mQ«.	53
Preglednica 12: PEST Instruction File for the observed group "peak".	53
Preglednica 13: Datoteka Parameter.tpl.	54
Preglednica 14: Datoteka Calib1.pst.	58
Preglednica 15: PEST Control File datoteka z vneseno regularizacijo.	60
Preglednica 16: Izračunane in dejanske vrednosti.	65
Preglednica 17: Datoteka Summary.txt modelske učinkovitosti umerjenega modela.	67
Preglednica 18: Datoteka Summary.txt modelske učinkovitosti umerjenega I. primera HBV-Land z GAP-om.	70
Preglednica 19: Datoteka Summary.txt modelske učinkovitosti umerjenega II. primera HBV-Land z GAP-om.	71
Preglednica 20: Datoteka Summary.txt modelske učinkovitosti umerjenega modela HBV-Land s CMA-ES-om.	73
Preglednica 21: Datoteka calib.rec rezultata umerjanja modela s CMA-ES-om.	73
Preglednica 22: Kazalci za oceno učinkovitosti umerjanja, merila kakovosti modela [81].	77
Preglednica 23: Rezultati učinkovitosti umerjanja ¹ sintetičnega modela desetletnega obdobja, od 1. 10. 1981 do 31. 12. 1991.	78
Preglednica 24: Vrednosti posameznih parametrov, določenih v postopku umerjanja.	80
Preglednica 25: Relativni odklon parametra od "prave-vrednosti" v postopku umerjanja.	81
Preglednica 26: Rezultati validacije modela za obdobje od 1. 10. 2001 do 31. 12. 2011.	84
Preglednica 27: Seznam podporečij v porečju reke Bosne s prispevnimi površinami v (km ²).	89
Preglednica 28: Lastnosti podporečij reke Bosne.	91
Preglednica 29: Seznam padavinskih in temperaturnih postaj ter postaj evapotranspiracije.	94
Preglednica 30: Rezultati umerjanja modela 1. 1. 1964 - 31. 12. 1968.	96
Preglednica 31: Preverjanje modela za obdobje 1. 1. 1984 - 31. 12. 1988.	97
Preglednica 32: Rezultati umerjanja hidrološkega modela Savinje po 21 podporečjih za leto 2007.	105
Preglednica 33: Rezultati umerjanja hidrološkega modela Savinje po posameznih podporečjih za dogodek leta 2007.	109

Preglednica 34: Rezultati validacije hidrološkega modela Savinje po posameznih podporečjih za dogodek leta 1990.	110
Preglednica 35: Rezultati validacije hidrološkega modela Savinje po posameznih podporečjih za dogodek leta 1998.	111
Preglednica 36: Rezultati umerjanja modela z dnevnimi vrednostmi za obdobje 1. 10. 1993-31. 12. 1998.	112
Preglednica 37: Rezultati umerjanja modela z urnimi podatki za obdobje 1. 1. 1998-31. 12. 1999.	112
Preglednica 38: Rezultati primerjave obeh modelov za urni korak.	113

KAZALO SLIK

Slika 1: Hidrološki sistem (povzeto po [5]).	1
Slika 2: Gibanje vode v porečju (povzeto po [24]).	7
Slika 3: Hidrološki krog (povzeto po [25]).	8
Slika 4: Zveza med padavinami in odtokom (prirejeno po [22]).	8
Slika 5: Shematični prikaz modela dveh porečij (povzeto po [57]).	11
Slika 6: Struktura modela HBV-96 za posamezno pod porečje (prirejeno po [55]).	13
Slika 7: Postopek računanja snega (povzeto po [54]).	13
Slika 8: Računanje vlage v tleh (povzeto po [54]).	14
Slika 9: Shema PEST-ovega paralelnega procesa umerjanja.	19
Slika 10: Iterativno izboljševanje vrednosti parametrov. (prirejeno po [62,71]).	29
Slika 11: Ukazno okno z rezultati ukaza IPCONFIG za določeni računalnik.	34
Slika 12: Središče za omrežje in skupno rabo.	35
Slika 13: Nastavitve ethernet omrežja.	36
Slika 14: Nastavitve IP-naslava.	36
Slika 15: Upravitelj opravil prikaže število logičnih procesorjev.	37
Slika 16: Prikaz števila logičnih procesorjev v ukaznem oknu.	38
Slika 17: Zagon programa Clbrt.cmd iz ukazne vrstice.	38
Slika 18: Zagon umerjanja iz Windows PowerShell-a.	39
Slika 19: Sledenje postopka umerjanja s PEST-om.	40
Slika 20: Uporaba CPU-ja med vzporednim računanjem PEST-a.	40
Slika 21: Nastavitev delne distribucije hidrološkega modela HBV-Land.	43
Slika 22: Modelne nastavitve hidrološkega modela HBV-Land.	46
Slika 23: Uporaba <i>UZZ</i> in <i>K0</i> v <i>rezervoarju SUZ</i> .	47
Slika 24: Osnovna zaslonska slika neumerjenega modela HBV-Land.	48
Slika 25: Nastavitve »Model Settings« HBV-Land.	51
Slika 26: Postopek umerjanja v lokalnem omrežju.	63
Slika 27: Splošna struktura dela v postopku vzporednega umerjanja.	63
Slika 28: Osnovna zaslonska slika umerjenega modela HBV-Land.	64
Slika 29: Izris ekrana "Summary" izračuna vodne bilance in parametrov modelne učinkovitosti umerjenega modela HBV-Land.	64
Slika 30: Zaslonska slika umerjenega modela HBV-Land za celotno umerjevalno obdobje.	65
Slika 31: Robni pogoji vrednosti parametrov GAP.	69
Slika 32: Prvi umerjeni model HBV-Land z GAP.	70
Slika 33: Drugi umerjeni model HBV-Land z GAP.	71
Slika 34: Umerjeni model HBV-Land s CMA-ES.	72
Slika 35: Opazovani in simulirani odtok s postopkom umerjanja GLM za obdobje od 1. 1. 1982 do 31. 12. 1991.	78
Slika 36: Predstavitev rezultatov <i>NSE</i> za obdobje umerjanja.	80
Slika 37: Absolutna razlika Q_{obs} za različne postopke umerjanja v obdobju umerjanja od 1. 3. 1985 do 31. 3. 1985.	82
Slika 38: Grafična predstavitev kalibriranih parametrov z različnimi metodami za umerjanje.	82
Slika 39: Zasedenost CPU-ja, ko je model umerjen z PEST_HP.	83
Slika 40: Obdobje validacije od 1. 1. 2002 do 31. 12. 2011, potrjeno z GLM.	84

Slika 41: Hidrografija porečja reke Bosne.	88
Slika 42: Model porečja reke Bosne z vsemi podporečji zajetimi v modelu.	90
Slika 43: Vegetacijske cone na območju porečja reke Bosne.	92
Slika 44: Višinske cone porečja reke Bosne.	93
Slika 45: Porečje reke Bosne s padavinskimi postajami in s Thiessenovimi poligoni.	95
Slika 46: Umerjanje hidrološkega modela za reko Bosno.	96
Slika 47: Simulirani povprečni dnevni pretoki na reki Bosni.	99
Slika 48: Izmerjeni hidrogrami poplavnih valov pri poplavi maja 2014.	99
Slika 49: Porečje Savinje z označeno rečno mrežo.	100
Slika 50: Definirane vegetacijske cone v porečju Savinje.	101
Slika 51: Višinski pasovi v porečju Savinje.	102
Slika 52: Računska shema celotnega porečja Savinje z vodomernimi postajami.	103
Slika 53: Thiessenovi poligoni za padavinske postaje (urni podatki) na porečju Savinje.	104
Slika 54: Thiessenovi poligoni za 12 temperaturnih postaj na porečju Savinje.	104
Slika 55: Shema porečja Savinje, ki smo ga razdelili na 77 prispevnih območij.	106
Slika 56: Kaj je PEST? (povzeto po [99]).	107
Slika 57: Konceptualni prikaz vzporednega umerjanja hidrološkega modela.	108

KAZALO PRILOG

Priloga A: Program 'CLBRT.cmd' za vzporedno izvajanje umerjanja	126
Priloga B: Program 'Model.cmd' za zagon HBV-light	128
Priloga C: Program 'Regul.cmd' za uteževanje in regularizacijo parametrov	129
Priloga D: Program 'DelP.cmd' brisanja nepotrebnih datotek	130
Priloga E: Parametri nadzorne datoteke PEST	131
Priloga F: Pregled privzetih vrednosti parametrov HBV-light	133
Priloga G: Razlike merjenih in simuliranih vrednosti datoteke Calib2.rei	136
Priloga H: Izvleček iz datoteke zabeležbe postopka izračuna Calib2.rec	137
Priloga I: Članki avtorja povezani z doktorsko disertacijo	156

LIST OF TABLES

Table 1: Calib.pst is a PEST control file for calibrating the HBV-Land subcatchment.	19
Table 2: Description of the parameters of the PEST control file.	21
Table 3: PEST Control file mandatory sections [64].	26
Table 4: Original files for the HBV-Land model in the folder .\Data\.	43
Table 5: The EVAP.txt evapotranspiration file.	44
Table 6: PTQ.txt file.	45
Table 7: File T_MEAN.txt.	47
Table 8: Original files in folder .\Results\ for the HBV-Land model	48
Table 9: The representation of the measured (observed) and calculated(simulated) high-water peaks of the uncalibrated HBV-Land model in the file Peaks.txt.	49
Table 10: Summary.txt shows the result of the model efficiency of an uncalibrated HBV-Land (SubCatchment1).	49
Table 11: PEST Instruction File for the observed group "01mQ".	53
Table 12: PEST navodilna datoteka za opazovano grupo »peak«.	53
Table 13: Parameter.tpl file.	54
Table 14: Calib1.pst file.	58
Table 15: PEST Control File with regularisation.	60
Table 16: The calculated and actual values.	65
Table 17: Summary.txt file of the result of the model efficiency of the calibrated model.	67
Table 18: Summary.txt file of the result of the model efficiency of the calibrated case I. of HBV-Land with GAP.	70
Table 19: Summary.txt file of the result of the model efficiency of the calibrated case II. of HBV-Land with the GAP.	71
Table 20: Summary.txt file of the result of the model efficiency of the calibrated HBV-Land model with the CMA-ES.	73
Table 21: The calib.rec file result of the model calibration with the CMA-ES.	73
Table 22: Indicators for assessing calibration efficiency, model quality criteria [81].	77
Table 23: Calibration efficiency results ¹ of the synthetic model over ten years, i.e., 1 October 1981 to 31 December 1991.	78
Table 24: The values of the individual parameters determined in the calibration procedure.	80
Table 25: Parameter relative deviation to "perfect fit" in the calibration procedure.	81
Table 26: Validation results of the model for the period 1 October 2001 to 31 December 2011.	84
Table 27: List of sub-catchments within the Bosna river basin area in (km ²).	89
Table 28: Properties of Bosnia river catchment.	91
Table 29: List of precipitation and temperature stations and evapotranspiration stations.	94
Table 30: Calibration results of the model 1 January 1964 – 31 December 1968.	96
Table 31: Model verification for the period 1 January 1984 – 31 December 1988.	97
Table 32: Results of the calibrated hydrological model of the Savinja by 21 subcatchments for the year 2007.	105
Table 33: Results of the calibrated hydrological model of Savinja by individual subcatchment for the event in 2007.	109

Table 34: Results of the validation of the Savinja hydrological model by individual subcatchments for the event in 1990.	110
Table 35: Results of the validation of the Savinja hydrological model by individual subcatchments for the 1998 event.	111
Table 36: Results of calibration of the model with daily values for the period 1. 10. 1993-31. 12. 1998.	112
Table 37: Results of calibration of the model with hourly data for the period 1.1.1998-31.12.1999.	112
Table 38: Results of the comparison of both models for the hourly step.	113

LIST OF FIGURES

Figure 1: Hydrological system(according to [5]).	1
Figure 2: Drainage Basin Water Flow Chart (according to [24]).	7
Figure 3: The hydrological cycle (according to [25]).	8
Figure 4: The connection between precipitation and outflow (adapted from [22]).	8
Figure 5: Schematic representation of the two subcatchments (according to [57]).	11
Figure 6: Structure of the HBV-96 model for a single subcatchment (addapted from [55]).	13
Figure 7: Calculation of snow (according to [54]).	13
Figure 8: Calculation of moisture in the soil (according to [54]).	14
Figure 9: Scheme of the PEST calibration process.	19
Figure 10: Iterative improvement of the parameter values(adapted from [62,71]).	29
Figure 11: Command window with the results of the IPCONFIG command for a specific computer.	34
Figure 12: Network and Sharing Center.	35
Figure 13: Ethernet settings.	36
Figure 14: IP address settings.	36
Figure 15: Task Manager displays the number of logical processors.	37
Figure 16: Display the number of logical processors in the command window.	38
Figure 17: Run Clbrt.cmd from CLI.	38
Figure 18: Calibration Run from Windows PowerShell.	39
Figure 19: Tracking the PEST calibration process.	40
Figure 20: CPU utilization during PEST parallel computing.	40
Figure 21: Setting up the semi-distribution of the HBV-Land hydrological model.	43
Figure 22: Model settings of the HBV-Land hydrological model.	46
Figure 23: Use of UZL and K0 in the SUZ reservoir.	47
Figure 24: Basic screen picture of the uncalibrated model HBV-Land.	48
Figure 25: "Model Settings" HBV-Land.	51
Figure 26: Local network calibration procedure.	63
Figure 27: General structure of the work in parallel calibration procedure.	63
Figure 28: Basic screen image of the calibrated HBV-Land model.	64
Figure 29: The "Summary" window display of water balance and model performance modeling of the calibrated model HBV-Land.	64
Figure 30: Screen image of the calibrated HBV-Land model for the whole calibration period.	65
Figure 31: Boundary conditions for the values of the parameters of the GAP.	69
Figure 32: The first calibrated HBV-Land model with the GAP.	70
Figure 33: The second calibrated HBV-Land model with the GAP.	71
Figure 34: The calibrated HBV-Land model with the CMA-ES.	72
Figure 35: Observed and simulated runoff by GLM calibration procedure for the period from 1 January 1982 to 31 December 1991.	78
Figure 36: Presentation of NSE results for the calibration period.	80
Figure 37: The absolute difference to Qobs for different calibration procedures in the calibration period from 1 March 1985 to 31 March 1985.	82
Figure 38: Graphical representation of calibrated parameters with different calibration methods.	82
Figure 39: CPU utilization when model is calibrated with PEST_HP.	83

Figure 40: Validation period 1 January 2002 to 31 December 2011, validated with GLM.	84
Figure 41: Hydrography of the river basin of Bosnia.	88
Figure 42: Model of the Bosnia river basin with all the sub-catchments covered in the model.	90
Figure 43: Vegetation zones in the area of the river basin of Bosnia.	92
Figure 44: Elevation zones of the river basin of Bosnia.	93
Figure 45: River basin of the river Bosna with the precipitation stations and Thiessen polygons.	95
Figure 46: Calibration of hydrological model for the river Bosna.	96
Figure 47: Simulated mean daily discharges on the Bosna River.	99
Figure 48: Measured flood wave hydrograms in the flood of May 2014.	99
Figure 49: Savinja catchment with marked river network.	100
Figure 50: Defined vegetation zones in the Savinja basin.	101
Figure 51: Elevation zones in the Savinja catchment.	102
Figure 52: Calculation scheme of the entire Savinja basin with hydrometric stations.	103
Figure 53: Thiessen polygons for precipitation stations (hourly data) in the Savinja basin.	104
Figure 54: Thiessen polygons for 12 temperature stations in the Savinja basin.	104
Figure 55: The Savinja basin map, which was divided into 77 sub-catchments.	106
Figure 56: What is PEST? (according to [99]).	107
Figure 57: Conceptual view of the parallel calibration of the hydrological model.	108

LIST OF APPENDICES

Appendix A: The program 'CLBRT.cmd' for parallel calibration	126
Appendix B: Program 'Model.cmd' for starting HBV-light	128
Appendix C: Program 'Regul.cmd' for weighting and regularization of parameters	129
Appendix D: Program 'DelP.cmd' for deleting unnecessary files	130
Appendix E: Parameters of the PEST control file	131
Appendix F: Overview of the default values of HBV-light parameters	133
Appendix G: The differences between measured and simulated values of Calib2.rei file	136
Appendix H: The extract from the log file of the process calculates Calib2.rec	137
Appendix I: Author's articles related to the doctoral dissertation	156

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI / ABBREVIATIONS AND SYMBOLS

Okrajšave / Abbrev.	Slovensko	English
ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje	Slovenian Environment Agency
ASCII	American Standard Code for Information Interchange	ameriški standard kode za izmenjavo informacij
BEOPEST	je posebna različica Parallel PEST	is a special version of Parallel PEST
CLC	pokritost tal Corine	Corine Land Cover
CLI	vmesnik ukazne vrstice	Command-line Interface
CMAES	evolucijska strategija s prilagajanjem kovariančne matrike	Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy
DEM	Digitalni model višin	Digital Elevation Model
DMR	digitalni model reliefa	Digital terrain model
EA	evolucijski algoritem	Evolutionary Algorithm
ECA&D	Evropski nabor podatkov za oceno podnebja	European Climate Assessment & Dataset
ECRINS	Evropski sistem povodij in rečnega omrežja	European catchments and Rivers network system
ESM2M	Zemeljski model 2M	Earth System Model 2M
EUR	evro	Euro
EVU	elevacijsko-vegetacijska enota	elevation-vegetation unit
FGG	Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo	Faculty of Civil and Geodetic Engineering
GA	genetski algoritem	Genetic Algorithm
GAP	genetski algoritem in Powellova optimizacija	genetic algorithm and Powell optimization
GIS	Geografski informacijski sistem	Geographic Information System
GML	Gauss-Marquardt-Levenberg algoritem	Gauss-Marquardt-Levenberg algorithm
GUI	grafični uporabniški vmesnik	Graphical User Interface
HBV	Oddelek za vodno bilanco hidrološke službe	Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning
HBV-light	HBV, verzija Jan Seibert, Univerza v Zürichu, Oddelek za geografijo	HBV, version Jan Seibert, University of Zürich, Department of Geography

HYPE	hidrološke napovedi za okolje	Hydrological Predictions for the Environment
IHMS	integriran sistem hidrološkega modeliranja	Integrated Hydrological Modelling system
KSH	Katedra za splošno hidrotehniko	Chair of Hydrology and Hydraulic Engineering
m n. v.	metri nadmorske višine	meters above sea level (m a.s.l.)
MCA	Večkriterijska analiza	Multicriteria analysis
MOO	večkriterijska optimizacija	Multi Objective Optimization
NS	Nash-Sutcliffe koeficient	Nash-Sutcliffe coefficient
NSE	Koeficient učinkovitosti modela Nash-Sutcliffe	Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient
PCF	PEST nadzorna datoteka	PEST Control File
PEST	umerjanje in analiza negotovosti kompleksnih okoljskih modelov	Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models
PIF	PEST datoteka s predlogo parametrov	PEST Template File
P-R	hidrološki model padavinskega odtoka	hydrological precipitation-runoff model
PTF	PEST datoteka z navodili	PEST Instruction File
SMHI	Švedski meteorološki in hidrološki inštitut	Swedish Meteorological and Hydrological Institute
VP	vodomerna postaja	water gauging station
WMO	svetovna meteorološka organizacija	World Meteorological Organization
XML	razširljivi označevalni jezik	Extensible Markup Language

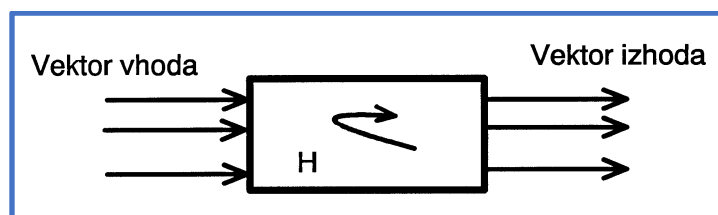
»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

1.1 OPIS PROBLEMATIKE IN RELEVANTNOST PROBLEMA

Hidrološki pojavi se oblikujejo v hidrološkem sistemu, ki ga določa narava in so v osnovi stohastični. Pojavi so enkratni, neponovljivi in spreminjajoči se v prostoru in času. Simuliramo jih s pomočjo različnih hidroloških modelov, s katerimi poskušamo integrirati kompleksne procese, ki jih ponazarjajo zvezne funkcije. Razvoj hidroloških modelov ima dolgo zgodovino začeni s preprostimi enačbami z enim ali dvema prametroma, preko regresivnih in stohastičnih modelov do sodobnih modelov, zasnovanih na teoriji sistemov. Uporaba teorije analize sistema je v hidrologiji prisotna že dalj časa. Pojavila se je v šestdesetih letih dvajsetega stoletja s pojavom komercialnih računalniških sistemov in razvojem informacijske tehnologije. Zelo hitro se je potem uveljavil še sistemski pristop z uporabo različnih matematičnih modelov. Razviti so bili različni modeli za bolj ali manj uspešno simulacijo teh hidroloških procesov [1–4]. Na voljo je več kot 60 različnih hidroloških modelov za simulacije padavine-odtok [1].

Hidrološki sistem sestavljajo biološki, kemijski in fizikalni procesi. Neodvisne spremenljivke, ki predstavljajo vhod v sistem, se v sistemu preoblikujejo v izhodne spremenljivke (Slika 1).



Slika 1: Hidrološki sistem (povzeto po [5]).
Figure 1: Hydrological system (according to [5]).

$$X(t) = x_1(t), x_2(t) \dots x_m(t) \quad Y(t) = y_1(t), y_2(t) \dots y_n(t)$$

Spremenljivka je hidrološka veličina, ki jo lahko merimo in se s časom spreminja.

Parameter je kvantitativna lastnost sistema, ki se s časom spreminja ali pa tudi ne.

Modeliranje je reprodukcija bistva sistema brez reprodukcije samega sistema.

Model je posplošeno predstavljanje zapletenega sistema kot celote ali posameznega dela.

Razvila se je množica modelov, zasnovana na nelinearnih enačbah s številnimi parametri, ki jih je treba določiti v zahtevnem postopku umerjanja. Postopek modeliranja je obremenjen s pomanjkanjem podatkov in poenostavitvami, s katerimi rešujemo matematični model. Želena točnost dosežemo z vzporejanjem rezultatov simulacij z enakimi vhodnimi podatki in različnimi vrednostmi posameznih parametrov modela. Omenjene obremenitve povzročajo napake oziroma odstopanja med rezultati izračuna, ki nam jih poda model, in meritvami, ki smo jih pridobili v naravi. V postopku umerjanja modela poskušamo določiti parametre, ki jih vsebujejo posamezne funkcije, tako da so razlike med izračunom in meritvami čim manjše. Ker je vsako porečje enkratno s svojimi naravnimi lastnostmi, kakor tudi vsak hidrološki dogodek na porečju je vse skupaj kompleksen proces, ki še ni dovolj raziskan [6].

Umerjanje je postopek določanja ne dovolj znanih parametrov modela. Znale so vhodne in izhodne spremenljivke ter izrazi matematičnega modela. Neznani so le posamezni parametri modela, ki jih določimo na osnovi znanih lastnosti analiziranega sistema ali z umerjanjem modela. Pri posameznih preprostejših modelih je mogoče parametre določiti neposredno z izračunom inverzno preurejenega matematičnega modela. Najpogosteje problem rešujemo s simulacijo, tako da spreminjamo vrednosti posameznih neznanih parametrov, dokler se napaka med merjenim in izračunanim izhodom ne zmanjša na sprejemljivo vrednost. Pri tem skušamo doseči, da se odstopanje med izračunom in meritvami obnaša kot naključna spremenljivka do čim manjšega raztrosa. S spremembo vzorca se tu lahko spreminjajo tudi parametri, zato moramo model pred uporabo še verificirati na vzorcu podatkov, ki niso bili upoštevani pri umerjanju.

Do danes so se razvili številni postopki in metode za izračun optimalne vrednosti parametrov: Monte Carlo Procedure [7,8], Generalised Likelihood Uncertainty Estimation [9], Artificial Neural Network [10], genetski algoritem [11], Hybrid Harmony Search Algorithm [12], Generalized Reduced Gradient [13] in Gauss-Levenberg-Marquardt metoda podprta z regularizacijo [14–16].

Pri tem se vse bolj kaže, kako pomembna je analiza občutljivosti parametrov, ki nam pove, kolikšen je vpliv posameznega parametra pri simulaciji oziroma koliko je pomemben [17].

Večina računalniških programov za uporabo hidroloških modelov je opremljena z algoritmi za samodejno določanje optimalne množice parametrov. To uporabniku ne omogoča neposrednega poseganja v izvajanje postopka. Želja uporabnikov je, izpeljati umerjanje glede na uporabo modela s tem, da je poudarek lahko na povprečnih vrednostih ali na na skrajno visokih ali pa na nizkih pretokih.

Orodje, ki v veliki meri omogoča uporabniku, da prikroji umerjanje svojim potrebam in željam je programsko orodje PEST (Parameter ESTimation) [18]. PEST je zasnovan na Gauss-Levenberg-Marquardt algoritmu in vsebuje tudi metode regularizacije [14]. V linearnih modelih je umerjanje doseženo z enim korakom s pomočjo matrike enačb s konstantnimi koeficienti. Večina modelov obravnava nelinearne probleme. Pri tem je umerjevalni postopek iterativen. Orodje omogoča umerjanje modela z velikim številom parametrov in daje uporabniku možnost, da sam izbere in ustrezno poudari dele hidrološkega kroga pri umerjanju, glede na prihodnjo uporabo modela. Uporabnik lahko opredeli matematična orodja, uporabljena pri postopku, kakor tudi po želji obteži posamezne parametre. Rezultat ni samo optimalen nabor parametrov, temveč tudi podrobna analiza občutljivosti parametrov.

Orodje PEST s svojo zbirko programske opreme omogoča (seznam z razvojem narašča):

- reševanje visoko parametriziranega reševanja inverznega problema;
- globalna optimizacija z diferencialno evolucijo;
- analiza globalne občutljivosti.

1.2 CILJ NALOGE

Cilj naloge je izboljšati umerjanje hidroloških modelov z ekspertno vodenim in nadzorovanim procesom. Na ta način dosežemo boljše umerjanje modelov in ne nazadnje tudi razumevanje hidrološkega sistema, ki se simulira. Nadzorovani proces umerjanja modela opredeli množico parametrov modela na ekspertno konceptualnih osnovah. Če imamo majhno število parametrov (do tri) je postopek preprost, pri večjem številu parametrov je pa bolj zapleten. Na primer pri 14 parametrih s po tri vrednosti je število možnih kombinacij simulacij 4.782.969.

Z ustreznim strokovnim znanjem in informacijami se določijo parametri in oblikuje vzorec optimalnih parametrov modela. Tako neposredno vplivamo na izid postopka umerjanja sorazmerno strokovnem znanju. S tem dosegamo boljše rezultate, kot pa če bi postopek samodejno prepustili zgolj izbranemu algoritmu optimizacije [19].

Hidrološki modeli so lahko dragocena orodja za podporo pri odločanju, kadar se uporabljajo ustrezno, z ustreznimi podatki in ob poznavanju omejitev modela.

Kje je pravzaprav težava?

Ko umerjamo celotno porečje s podporečji hkrati (na en mah), ne dobimo vrednosti parametrov posameznega podporečja, ampak dobimo povprečno vrednost parametrov za celotno porečje. Rešitev je ohranjanje prvotno določenih vrednosti na podporečju, ki imajo bolj realen fizični pomen. Najprej umerjamo gor vodna podporečja. Nato nadaljujemo postopoma po porečju navzdol do iztoka in tako ohranjamo že umerjene vrednosti parametrov.

Ekspertno umerjanje modela z interaktivnim umerjanjem od povirja navzdol po porečju izboljša rezultat umerjanja. Vsak primer je drugačen. Pri umerjanju modela oseba, ki je odgovorna za model, potrebuje strokovno znanje za iskanje ustreznih rešitev z izbiro ustreznih začetnih parametrov in robnih pogojev modela. Vhodni in izhodni podatki se urejajo z metodami, s katerimi se prilagajajo uteži posameznim opazovanim skupinam, tako da je prispevek k skupni opazovani objektivni funkciji v vsaki skupini enak. Za to se uporabijo posebni postopki uteževanja, ki lahko ublažijo strukturne motnje [20].

Vsi parametri, upoštevani v postopku umerjanja, so med seboj neodvisni. S tem se prepreči neustrezno upoštevanje vsebine informacij katere koli skupine parametrov v postopku umerjanja. Na ta način lahko umerjamo hkrati več podporečij z uporabo več meril pri več opazovanih ciljnih funkcijah. Vsako podporečje dobi lastno lokalno-posamezno in ne globalno-povprečno vrednost parametrov.

Orodja za podporo doktorskega dela so kombinacija prosto dostopnih in komercialnih programov ter lastno izdelanih programov.

Pri računu parametrov smo uporabili postopke regularizacije. Kaj je regularizacija? V najširšem smislu je regularizacija vse, kar je potrebno za pridobitev edinstvene rešitve v "slabo zastavljenemu" inverznemu problemu [14,20]. Doherty opisuje, če so omejitve regularizacije pravilno formulirane, potem visoko parametrizirana rešitev inverznega problema daje polje parametrov, ki zagotavljajo najmanjšo varianco napak. Varianca je opredeljena kot povprečje kvadratov odklonov posamičnih vrednosti od aritmetične sredine.

Pri umerjanju modela je nujno ekspertno znanje modelista za doseg primernih rešitev z izborom primernih začetnih parametrov in robnih pogojev modela. S prilagajanjem uteži k posameznim

opazovanim skupinam dosežemo, da je prispevek k skupni opazovani objektivni funkciji v vsaki skupini enakovreden. To preprečuje, da bi bila vsebina informacij katere koli skupine parametrov neustrezno upoštevana v postopku umerjanja. Na ta način lahko umerjamo več podporečij hkrati z več-kriterijskimi zahtevami. Tako lahko vsako podporečje dobi svojo lastno vrednost parametrov in ne skupno povprečno.

1.3 HIPOTEZE

1. Z uporabo strokovnega znanja oziroma strokovno vodenega interaktivnega postopka umerjanja nastavimo začetne vrednosti parametrov. V obsegu realnih vrednosti z najboljšim poznavanjem določimo meje začetnih vrednosti parametrov. Z določanjem ustreznih mej dosežemo boljše rezultate umerjanja modela.
2. Z uporabo postopka GLM, lahko dosežemo odlične rezultate umerjanja na posameznih podporečjih. Koeficient učinkovitosti umerjanja modela Nash-Sutcliffe [21] lahko doseže veliko višje vrednosti, to je med $NSE=0,95$ in blizu $NSE=1$
3. Z regularizacijo parametrov lahko bistveno izboljšamo umerjanje modela in dobimo dodatne informacije o razmerju med ustreznimi parametri in s tem zmanjšamo varianco napak.

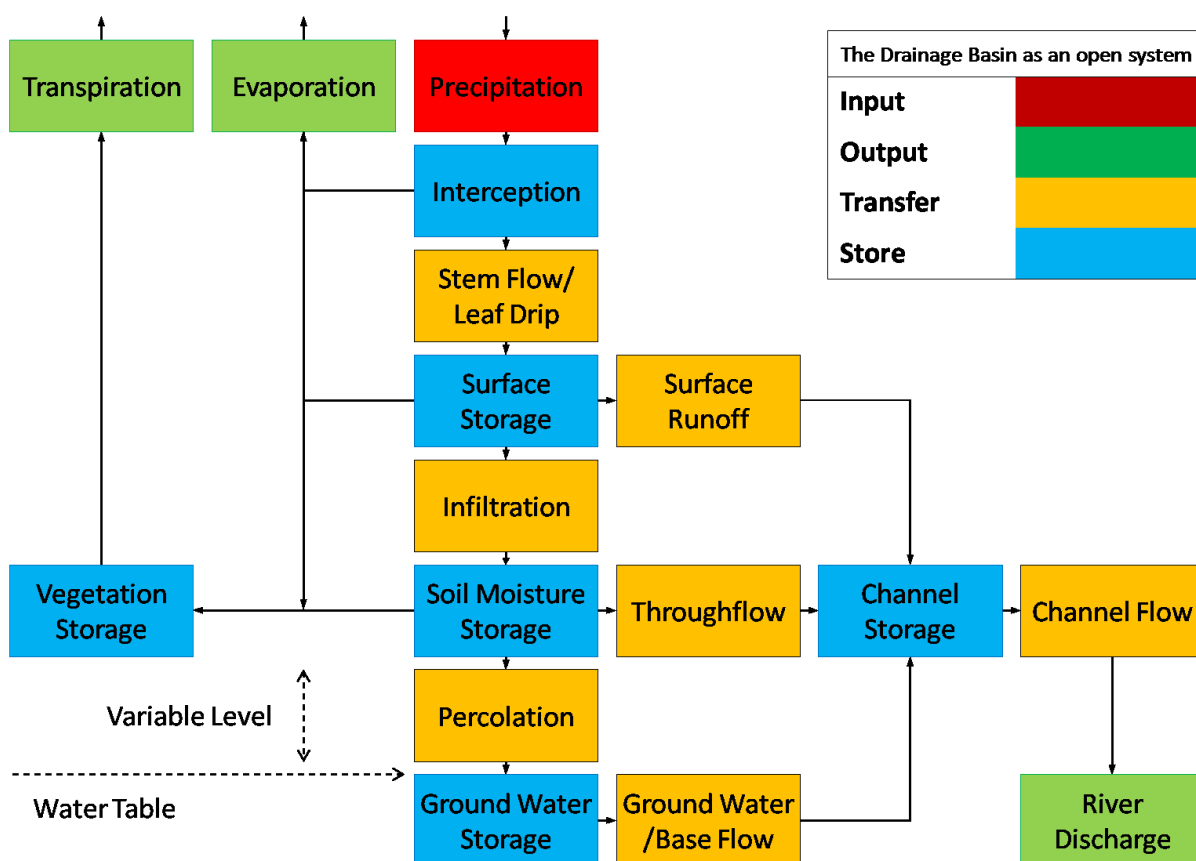
Hidrološke pojave smo simulirali s programom HBV-light [22], ki omogoča povezavo med hidrološkim modelom in orodjem za umerjanje PEST [18,23]. Za povezavo med hidrološkim modelom in orodjem PEST smo morali izdelati več lastnih računalniških programov in razviti postopek za delo z orodjem PEST. Za potrjevanje hipotez smo izbrali testni hidrološki primer kakor tudi več primerov iz prakse.

»Ta stran je namenoma prazna«

2 METODE DELA

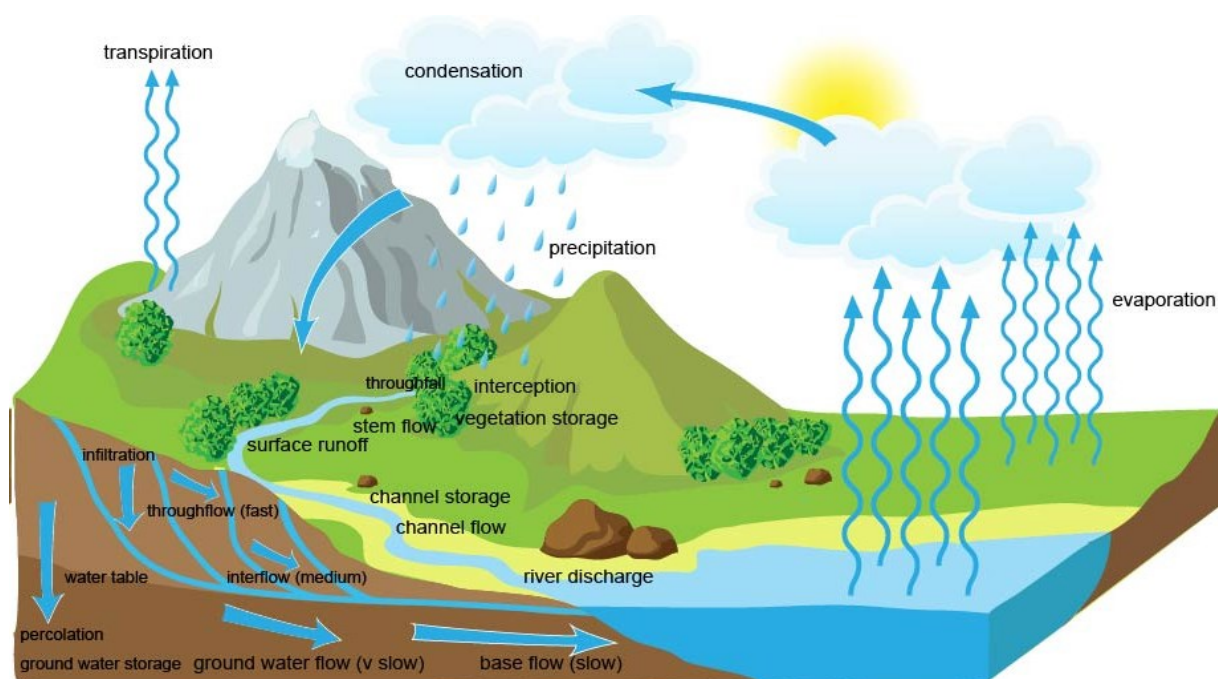
2.1 SPLOŠNO

Za izpeljavo raziskav, potrebnih za dokazovanje hipotez, potrebujemo ustrezne modele. Predvsem potrebujemo sodoben računalniški hidrološki model, s katerim lahko simuliramo hidrološke procese glede na razpoložljive podatke in hidrološke lastnosti porečij. Hidrološki krog je prikazan na sliki (Slika 3). Model mora biti sposoben ustrezno simulirati dinamiko oblikovanja površinskega odtoka in tajanje snežnih padavin med padavinskim dogodkom (Slika 2). Posamezne procese mora simulirati z nelinearnimi enačbami. Namreč bolj preprosti modeli zasnovani na linearnih osnovah hidrograma enote niso primerni za bolj natančno sodobno hidrološko analizo. Hidrološki procesi v prostoru so raznovrstni zaradi različnih geoloških formacij in sestave tal, morfologije, biosfere, antropogenih vplivov in podobno. Da bi se površinski odtok ustrezno simuliral, potrebujemo kompleksen hidrološki model z množico parametrov, ki jih pogosto neposredno z meritvami na terenu niti ne moremo določiti.



Slika 2: Gibanje vode v porečju (povzeto po [24]).

Figure 2: Drainage Basin Water Flow Chart (according to [24]).

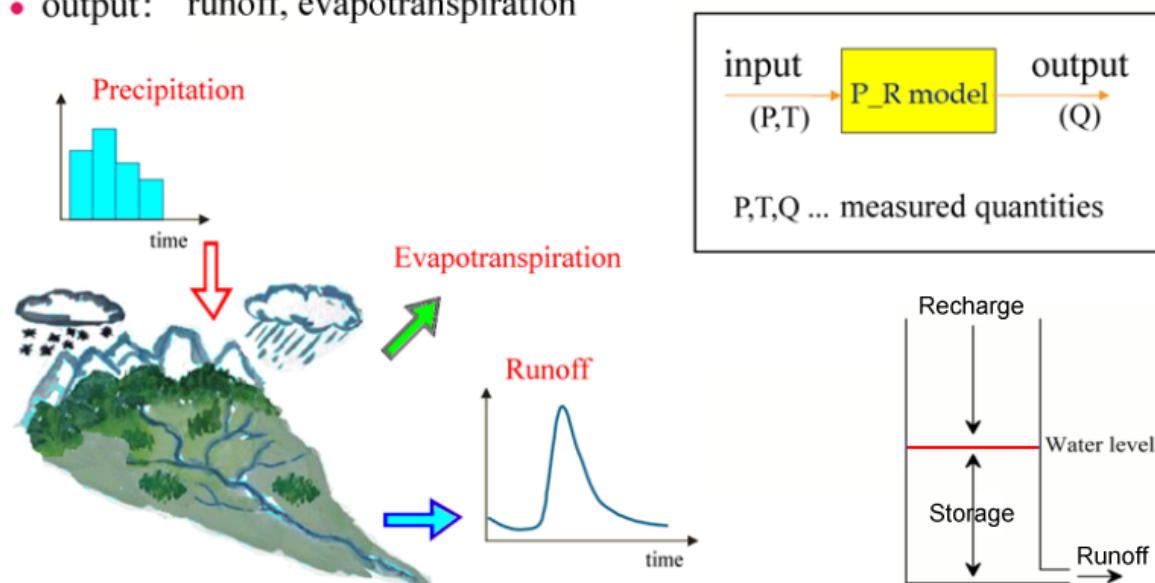


Slika 3: Hidrološki krog (povzeto po [25]).

Figure 3: The hydrological cycle (according to [25]).

Umerjanje modela je postopek določanja ne dovolj znanih parametrov modela. Znane so vhodne in izhodne spremenljivke ter izrazi matematičnega modela (Slika 4). Neznani so le posamezni parametri P_R modela, ki jih določimo na osnovi znanih lastnosti analiziranega sistema ali z umerjanjem modela.

- input: precipitation, temperature, solar energy
- output: runoff, evapotranspiration



Slika 4: Zveza med padavinami in odtokom (prirejeno po [22]).

Figure 4: The connection between precipitation and outflow (adapted from [22]).

Za vhodne podatke imamo večinoma padavine (P), temperaturo (T) in solarno sevanje (S). Za izhodne podatke modela imamo odtok (Q), evapotranspiracijo (E) in gladino podtalnice (H). Če nimamo poznanih oziroma merjenih vhodnih in izhodnih podatkov vsaj P in Q, potem hidrološkega modela P-R (Precipitation-Runoff) ne moremo izdelati. Hidrološki model je v bistvu numerični model. Parametre modela določamo v postopku umerjanja. V začetku razvoja računalniških modelov so se parametri določali na osnovi ekspertne analize z iskanjem najprimernejše množice parametrov, pri kateri bo prilagajanje med rezultati modela in meritvami v naravi najbolj usklajeno.

Zaradi šuma so odstopanja med rezultati simulacije in meritvami še vedno znatna in izziv za številne raziskovalce [26–34]. Eden od razlogov za neskladje med meritvami in rezultati simulacij z modeli je mogoče pripisati tudi pomanjkljivemu znanju [35].

Šum lahko proizvaja več virov. Podatki meritev povzročajo primarni šum, ki ga lahko razdelimo na vhodni (npr. padavine, temperature, izhlapevanje in sončno sevanje) in izhodni šum (npr. meritve odtoka) [28]. V praksi so pri simuliranju hidroloških procesov na voljo omejene informacije o hidroloških in meteoroloških spremenljivkah. Z dodatnimi meritvami na terenu je to mogoče nekoliko izboljšati [11]. Vendar pa pomanjkanje podatkov ni mogoče v celoti omiliti. Vhodni podatki za simulacijo modelov so do določene mere precej omejeni. Merilniki dežja merijo količino padavin v eni točki. Vemo pa, da so padavine porazdeljene zelo neenakomerno po celotnem povodju [36]. Merjenje padavin z dežmeri vsebuje napake zaradi vpliva izhlapevanja, vetra in ovir v zbirnem lijaku, kar povzroča meritveni šum. [37]. Določitev pretoka vode z uporabo konsumpcijskih krivulj vsebuje tudi šume [38]. Zelo pogosto so zapleteni hidrološki procesi nepredvidljivo destabilizirani zaradi neznanih antropogenih vplivov [39,40]. Podatki se nato interpolirajo na podlagi linearnih soodvisnosti, ki se spreminjajo po višini, in podobno, kar spet povzroča šum [26,41,42].

Drugi vir šuma je struktura samega modela. Strukturni šum modeliranja je dejstvo, ker model ni dvojnik realnega stanja v naravi. Kadar se zelo nelinearni pojavi modelirajo z linearnimi enačbami ali pa zaradi pomanjkanja podatkov, se nekateri deli hidrološkega kroga zlahka izločijo iz modela, ki ustvarja strukturni šum [42,43]. V praksi hidrološko modeliranje vključuje različne modele, stohastične ali deterministične ter konceptualne ali empirične. Vsi modeli vsebujejo parametre, ki jih ni mogoče neposredno izmeriti, vendar je razpon, v katerem je njihova vrednost, približno znan. Postopek umerjanja določa vrednost parametrov. V literaturi srečamo tudi drugačno pojmovanje umerjanja, kot je ocena (angl. estimation) parametrov in umerjanje parametrov (angl. parameter calibration). Različne teoretične podlage dajejo različne postopke umerjanja, pri čemer na splošno ločimo med Newtonovimi metodami, ki temeljijo na prvih in drugih odvodih ciljne funkcije, in globalnimi razvitimi metodami, ki temeljijo na stohastičnem pristopu [44]. Kot pomanjkljivost Newtonovih postopkov literatura poroča o pojavu, da proces obtiči v lokalnem minimumu in ne more najti možne boljše globalne rešitve [44].

Strukturni šum modeliranja lahko razdelimo na konceptualni šum [43], šum oblikovanja modela in šum umerjanja modela. Konceptualni šum povzroča skupek izbranih enačb kompleksnih hidroloških procesov, ki simulirajo naravne pojave [42,45]. Šum oblikovanja modela je pogojen s prostorsko in časovno diskretizacijo modela pri pripravi vhodnih podatkov. Z istim konceptom je isto porečje mogoče zasnovati drugače.

Šum umerjanja modela je pogojen z izbiro metode umerjanja, s katero se umerjajo parametri modela. Hidrološki modeli vsebujejo veliko parametrov, ki so sestavni deli enačb modela in jih ni mogoče

neposredno določiti s terenskimi meritvami. V najboljšem primeru je mogoče določiti samo meje, znotraj katerih parametri dobijo vrednost glede na njihov fizični pomen ali praktične izkušnje. Parametri se določijo v postopku umerjanja, če izračunane rezultate primerjamo z meritvami [21,46,47].

Vprašanje umerjanja modela je enako staro kot samo modeliranje, zato se je razvilo več različnih načinov umerjanja. Najzgodnejša je metoda poizkusov in napak, kjer oblikovalec ročno spremeni vrednosti parametrov in vizualno analizira rezultate. Ta pristop je bil uporabljen v prvotni zasnovi hidrološkega modela HBV (Hydrologiska Byråns Vattenavdelning) [48,49]. Enak pristop ročnega iterativnega umerjanja parametrov smo uporabili pri umerjanju urbanega hidrološkega modela [50,51]. Postopek je v celoti subjektiven in pogojen z znanjem in izkušnjami modelista in je v glavnem zamuden. Vendar pa modelist dobi neposreden občutek o občutljivosti modela in pomembnosti posameznih parametrov. Kasneje se je začelo s testiranjem parametrov, določanju njihove občutljivosti in soodvisnosti ter uporabo algoritmov za samodejno določanje parametrov. Pri inverznem reševanju nelinearnih stohastičnih procesov se v postopkih umerjanja modela zadnje čase zelo uspešno uporablja regularizacija [14,52]. Pri procesu umerjanja moramo upoštevati tudi ekspertno hidrološko znanje z določanjem ustrezne strukture modela in omejevanjem vrednosti posameznih parametrov. Nadalje mora program za umerjanje omogočiti pred in post procesiranje vrednosti parametrov, vhodnih podatkov in rezultatov simulacije.

Za raziskavo je ključna možnost povezave med hidrološkim modelom in programom za umerjanje modela. Prenos podatkov med modelom in programom mora potekati gladko brez težav. Oba računalniška programa morata biti enovito povezana in omogočati vpogled v rezultate izračunov v vseh fazah postopka. Programa morata imeti ustrezno odprto kodo, da je takšna povezava možna. Dobro umerjeni hidrološki modeli so temeljno orodje za simulacijo in napovedovanje različnih vplivov na hidrološke pojave [53], vključno s podnebnimi spremembami in prostorskim načrtovanjem. Boljši, ko so kazalci, ki kažejo na rezultate učinkovitosti modela, večje je zaupanje v rezultate in uporabo hidrološkega modela. Ravno to je namen umerjanja, da so na primer kazalci *NSE* blizu ena in in povprečne razlike blizu nič.

2.2 HIDROLOŠKI MODEL HBV

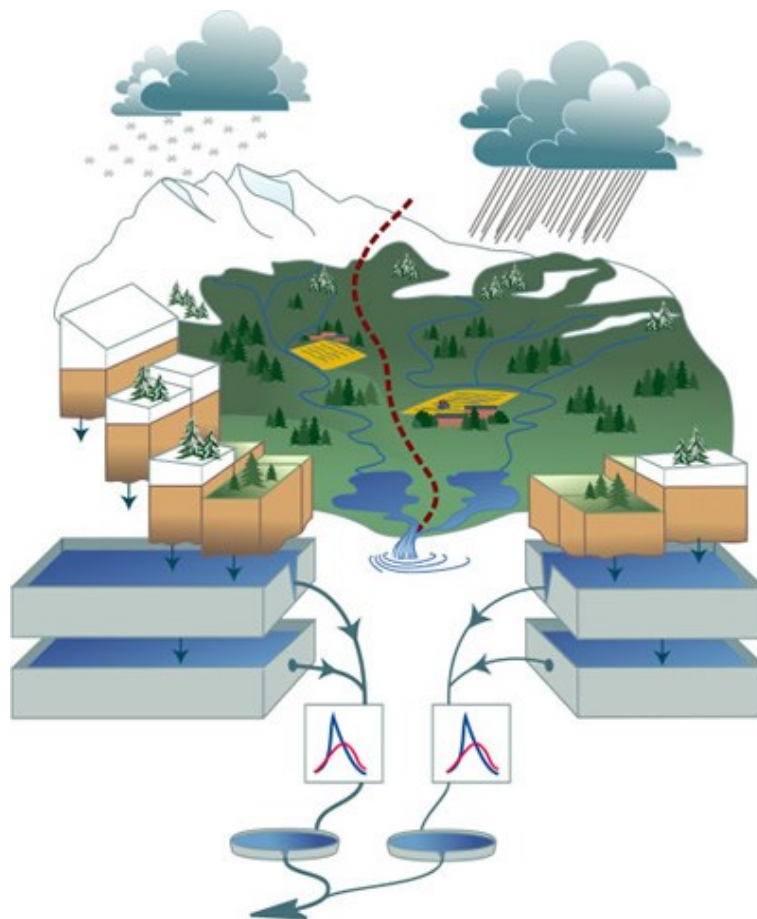
Program za model HBV je razvil Švedski inštitut za meteorologijo in hidrologijo, Oddelek za vodno bilanco urada za hidrologijo (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning), po katerem je dobil ime. HBV model je bil prvič uporabljen leta 1972 [49]. HBV je konceptualni model za simulacijo odnosa med padavinami in odtokom ter omogoča kontinuirano računanje odtoka. Ob upoštevanju padavin, temperature in potencialnega izhlapevanja, kot vhodnih podatkov HBV simulira odtok s posameznega dela porečja [48,49]. HBV je prisoten v hidrološki praksi že 50 let. HBV je predviden za izdelavo hidroloških napovedi za potrebe upravljanja hidroelektrarn in za napoved poplav. Zadnja verzija modela je HBV-96 [54], je bila v integrirana hidrološki program HBV/IHMS (Integrated Hydrological Modelling System) [55,56]. Nadaljevanje in dopolnitev HBV je sistem HYPE. Koda HYPE je bila razvita leta 2003 in leta 2011 izdana kot odprta koda. Verzije modela HBV so v uporabi več državah v različnih podnebnih pogojih. Uporablja za različne velikosti porečij, od 1 km² do več 100.000 km².

HBV model ima osnovo v enačbi vodne bilance (1):

$$P - ET - Q = \frac{d}{dt}(SP + SM + UZ + LZ + lakes) \quad (1)$$

P	padavine,
ET	evapotranspiracija,
Q	odtok,
SP	zaloga vode v snežni odeji,
SM	vlaga v tleh,
UZ	zgornje območje podzemne vode,
LZ	spodnje območje podzemne vode in
$lakes$	volumen jezera.

HBV je delno distribuiran konceptualni model, ki omogoča delitev porečja na manjše enote, podporečja. Posamezno podporečje potem delimo še na pasove po nadmorski višini in vrsti vegetacije. Model upošteva tudi jezera in akumulacije. Dodatna delitev na deleže vegetacijskih območij je pomembna pri izračunavanju vlage v tleh in snega. Na sliki (Slika 5) je prikazano oblikovanje sheme modela s podporečji, elevacijskimi in vegetacijskimi območji ter različnimi shranjevalniki površinskih in podzemnih voda vključno s površinsko nenasičeno cono.



Slika 5: Shematični prikaz modela dveh porečij (povzeto po [57]).

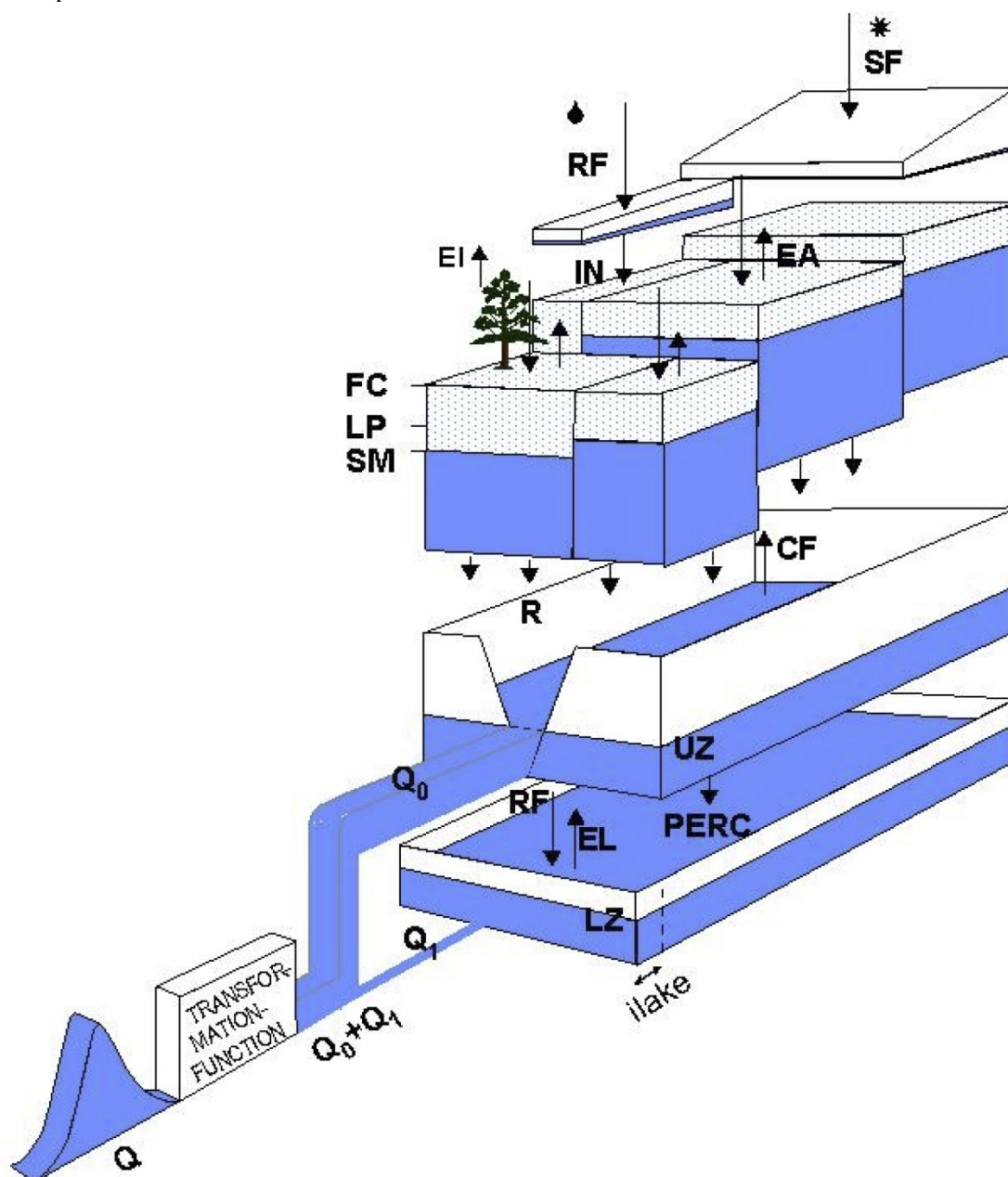
Figure 5: Schematic representation of the two subcatchments (according to [57]).

Po oblikovanju strukture modela pristopimo k pripravi vhodnih podatkov za umerjanje modela. To so merjeni podatki o potencialni evapotranspiraciji, padavinah, temperaturi zraka in pretoku, izmerjenem na vodomernih postajah. Temperatura zraka omogoča računanje akumulacije snega in njegovo taljenje. Vsi podatki, razen evapotranspiracije, morajo biti izmerjeni v enakem časovnem koraku. HBV je bil

prvotno izdelan za dnevni časovni korak, vendar omogoča uporabo krajšega časovnega koraka ene ure, kar je primerno za manjša porečja. Za podatke o evapotranspiraciji zadostujejo mesečna povprečja. Padavine podajamo v milimetrih, izmerjenih v časovnem koraku modela. Za določanje ploskovne razporeditve padavin in temperature zraka sta v modelu uporabljeni metodi navpičnih gradientov in uteževanja.

Shema strukture modela verzije HBV-96 za posamezno podporečje je prikazana na sliki (Slika 6). Model tako računa [49,55,56]:

- taljenje in akumulacija snega,
- računanje vlage v tleh in ocena evapotranspiracije,
- generiranje odtoka in
- pretok vode.

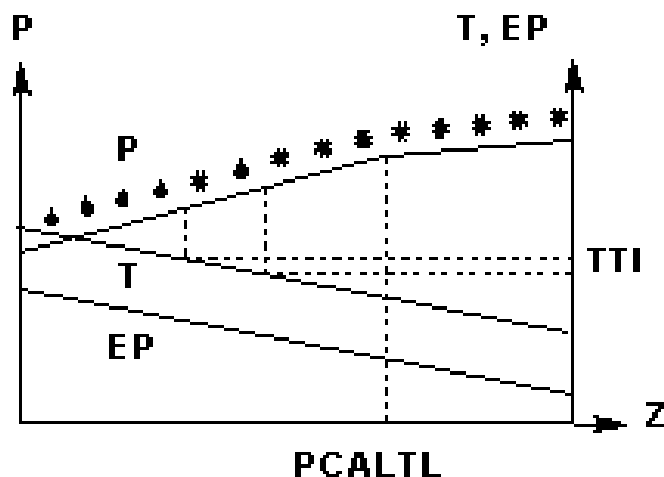


Slika 6: Struktura modela HBV-96 za posamezno pod porečje (prirejeno po [55]).

Figure 6: Structure of the HBV-96 model for a single subcatchment (addapted from [55]).

P = padavine	LP = meja potencialne evapotranspiracije
T = temperatura zraka	$BETA$ = parameter tal
SF = sneg	R = napajanje
RF = dež	$CFLUX$ = kapilarni prenos
Z = nadmorska višina	UZ = zaloga vode v zgornjem rezervoarju
$PCALTL$ = prag za korekcijo po Z	LZ = zaloga vode v spodnjem rezervoarju
TTI = prag temperaturnega intervala	$PERC$ = pronicanje
IN = infiltracija	K, K_4 = recesijska parametra
EP = potencialna evapotranspiracija	$ALFA$ = recesijski parameter
EA = dejanska evapotranspiracija	Q_0, Q_1 = komponente odtoka
EI = evaporacija prestreženih padavin	HQ = parameter velikega odtoka
SM = vlaga v tleh	KHQ = upadanje pri HQ
FC = maksimalna zaloga vlage v tleh	HQ_{UZ} = nivo UZ pri HQ

Pri računanju količine snega v snežni odeji je uporabljena preprosta metoda stopinja-dan ("degree-day"), ki temelji na temperaturi zraka in na količini vode v snežni odeji. Pri tem metoda upošteva vpliv nadmorske višine s temperaturnim gradientom, ki se razlikuje na gozdnih in odprtih površinah. Postopek za računanje tajanja snega je prikazan na sliki (Slika 7). Osnova izračuna temelji na temperaturi praga TT , ki je blizu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ in določa temperaturo, nad katero se začne sneg taliti. Omogoča tudi za ločitev dežnih padavin od snežnih. V modelu lahko uporabimo tudi parameter TTI in prag razširimo na interval, znotraj katerega so padavine mešanica dežja in snega. Odnos med deležem dežja in snega pada linearno od 100 % snega na spodnji meji TTI do 0 % snega na zgornji meji. Na velikih nadmorskih višinah imamo različne vertikalne gradiente padavin, katerih mejo določa parameter $PCALTL$.



Slika 7: Postopek računanja snega (povzeto po [54]).

Figure 7: Calculation of snow (according to [54]).

Račun taljenja snega po metodi stopinja-dan je prikazan z enačbo (2):

$$Količina\ staljenega\ snega = CFMAX * (T - TT) \quad (2)$$

kjer je:

$CFMAX$ faktor taljenja,

T temperatura elevacijske cone.

TT temperatura praga s katero določimo temperaturo, pri kateri se začne sneg taliti.

Tekoča voda je zadržana v snežni odeji, dokler ta količina vode ne preseže deleža glede na sneg, določenega s parametrom WHC. Ko temperatura T pade pod temperaturo praga TT , voda počasi zmrzuje po enačbi (3):

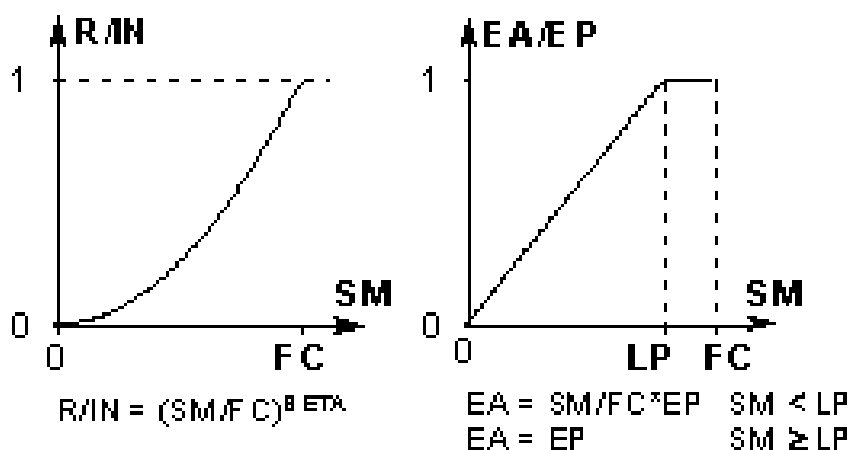
$$Količina\ zmrznjene\ vode = CFR * CFMAX * (TT - T) \quad (3)$$

kjer je:

CFR faktor zmrzovanja.

Razporeditev snežnih padavin določimo s parametrom SCLASS, ki opredeljuje število razredov, v katerih se snežne padavine akumulirajo.

Vlaga v tleh nadzoruje oblikovanje površinskega odtoka. Račun vsebuje tri parametre: FC, BETA in LP prikazane na sliki (Slika 8). Parameter BETA opredeli milimeterski dvig zaloga vlage v tleh za vsak padli milimeter dežja ali staljenega snega. Razmerje R/IN določa koeficient odtoka ($\Delta Q/\Delta P$), kjer so R efektivne padavine in IN infiltracija. Parameter LP predstavlja vrednost vlage v tleh in FC je maksimalna zaloga vode v tleh.



Slika 8: Računanje vlage v tleh (povzeto po [54]).

Figure 8: Calculation of moisture in the soil (according to [54]).

Razmerje R/IN računamo z enačbo (4):

$$\frac{R}{IN} = \left(\frac{SM}{FC}\right)^{BETA} \quad (4)$$

kjer je:

SM zaloga vode v tleh,

BETA empirični koeficient tal.

Razmerje EA/EP je predstavlja odnos med dejansko in potencialno evapotranspiracijo. Dnevne vrednosti potencialne evapotranspiracije model računa ob upoštevanju temperaturnega faktorja ETF z enačbo (5):

$$\text{Potencialna evapotranspiracija} = EP * (1 + ETF * (T - T_{norm})) \quad (5)$$

kjer je:

EP	standardna vrednost potencialne evapotranspiracije,
T	dejanska temperatura zraka in
T_{norm}	običajna temperatura zraka za tekoči dan v letu.

Bolj, ko so tla suha, je dejanska evapotranspiracija manjša. Vhodni podatki potencialne evapotranspiracije so dolgoletne povprečne mesečne vrednosti, izračunane po Penmanovi enačbi. Penmanova enačba upošteva letne čase, temperaturo zraka, vegetacijo, nadmorske višino in padavine [58].

Odtok oblikuje odzivna funkcija (angl. response function). Funkcija računa zalogo vlage v tleh kot posledico padavin, taljenja snega in evapotranspiracije ter presežek vode v tleh transformira v odtok. Padavin in evapotranspiracijo s površin jezer, rek in drugih mokrih površin upošteva neposredno. Padavine, ki padejo na površino jezera, se dodajo volumnu jezera, razen, ko je na jezeru led. Evaporacija s površine jezera je enaka potencialni evapotranspiraciji. Odtok iz jezera je odvisen od pretočne krivulje.

Odzivno funkcijo sestavljata zgornji nelinearni in spodnji linearni rezervoar. Rezervoarja opredeljujeta hitro in počasnejšo komponento hidrograma odtoka. Hitra komponenta predstavlja direktni, a počasnejša pa bazni odtok. Transformacija pretoka med podporečji je določena z Muskingovo metodo ali bolj preprosto z časom zakasnitve (angl. Lag Time). Značilnost podporečja so različna s tem, da ima vsako svojo odzivno funkcijo.

Za naše raziskave smo uporabili verzijo HBV-light razvito na univerzi Uppsala in dodatno izboljšano na državni univerzi Oregon, SLU-Uppsala in univerzi v Stockholmu). Program je oblikovan bolj prijazno do uporabnika in je namenjen za uporabo v izobraževalne namene. V zadnjih letih se HBV-light uspešno uporablja na več izobraževalnih tečajih na Švedskem, v Nemčiji, ZDA, Švici in drugih državah. HBV-light načeloma ustreza različici, ki jo je opisal Bergström [48,49,54], le z majhnimi spremembami. Najnovejša različica HBV-light je bila reprogramirana v sodelovanju z M. Vis [22] iz programskega jezika VB6 v VB.NET [59]. HBV-light smo izbrali zaradi možnosti računanja za več podporečij in izboljšanega uporabniškega vmesnika.

Program lahko poganjamo z grafičnim vmesnikom (angl. Graphical User Interface - GUI) in ukaznim vmesnikom (angl. Command Line Interface - CLI). Za delo v navezavi s PEST je pomemben ukazni način, ker omogoča zagon programa iz ukazne vrstice. Prav tako potrebuje PEST za komunikacijo s programi vhodne in izhodne podatke v ASCII zapisu. HBV-light generira XML (Extensible Markup Language) datoteke, ki ustrezajo temu pogoju. XML je skriptno jezik, ki določa niz pravil za kodni zapis datotek v obliki, ki je hkrati berljiva za računalnik in človeka.

Nadaljnje je za HBV-light povzeto po <https://www.geo.uzh.ch/en/units/h2k/Services/HBV-Model.html>). Poleg originalne različice SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute), ki jo je razvil S. Bergström in drugi od leta 1972, obstaja več različic programske opreme HBV. Med drugimi je bil HBV-light, ki je bil v svoji prejšnji različici razvit na univerzi Uppsala (in še izboljšan na državni univerzi Oregon, SLU-Uppsala in univerzi v Stockholmu), oblikovan z motivacijo za izboljšanje prijaznosti do uporabnika, zlasti glede uporabe v izobraževalne namene. V zadnjih letih se HBV-light uspešno uporablja na več tečajih na Švedskem, v Nemčiji, ZDA, Švici in drugih državah. HBV-light načeloma ustreza različici, ki jo je opisal Bergström [54,60], le z majhnimi spremembami. Da bi programsko opremo ohranili čim bolj preprosto, več funkcij, ki so na voljo v verziji SMHI, v HBV-light ni bilo vgrajeno.

Nova različica HBV-light vključuje naslednje inovacije:

- možnost računanja modela za porečje, ki ga sestavlja več podporečij in
- izboljšan uporabniški vmesnik.

Kljub poenostavljeni verziji je HBV-light možno uporabiti, ne samo v študijske namene, ampak tudi v aplikativne namene. Primer je analiza poplavnega dogodka reke Bosne v maju 2014 [61]. HBV-light je še posebno uporaben, ker je dana možnost računanja več podporečij hkrati. Posebno pomembno je, da obstajata dve različici HBV-light z grafičnim (GUI) in ukaznim (CLI) vmesnikom. Prav tako potrebuje PEST za komunikacijo s programi vhodne in izhodne podatke v ASCII zapisu. HBV-light generira XML (Extensible Markup Language) datoteke, ki ustrezajo temu pogoju. XML je označevalni jezik, ki določa niz pravil za kodiranje dokumentov v obliki, ki je hkrati berljiva za človeka in računalnik.

HBV-light model vključuje tri orodja za umerjanje, "Monte Carlo Runs", "Batch Runs" in "GAP optimization" (Genetski algoritem s Powellovo fino optimizacijo) [57]. Pri metodi Monte Carlo se z naključno izbranimi vrednostmi parametrov znotraj izbranih meja izvede precej simulacij. Med simulacijami izberemo najbolj učinkovito. Algoritem GAP rešujemo v dveh korakih [11]. Najprej dobimo nabor optimiziranih parametrov iz naključno izbranih začetnih vrednosti z uporabo genetskega algoritma (GA). GA deluje evolucijsko tako, da se parametri iz začetnih naborov kombinirajo v nove, finejše nabore parametrov. V naslednjem koraku je umerjan nabor parametrov bolj natančno določen z uporabo Powellove metode.

2.3 PEST RAČUNALNIŠKO ORODJE ZA UMERJANJE

PEST je nabor programov za umerjanje parametrov, ki temelji na Gauss–Levenberg–Marquardt (GLM) algoritmu. GLM se učinkovito uporablja na področju optimizacije parametrov oziroma umerjanja modelov [62]. PEST je okrajšava od Parameter ESTimation ali prevedeno "ocena parametrov". Gre za programsko orodje za umerjanje parametrov modela, ki je življenjsko delo Johna Dohertyja. Namreč, John Doherty je iskal rešitev za umerjanje modelov podtalnice, kjer imamo opravka z množico parametrov. Parametri so določeni na osnovi bolj ali manj subjektivnih hipotez in potreb po neposrednem poseganju izvajalca modela v rezultate umerjanja zaradi upoštevanja fizikalnih zakonitosti. PEST zapiše nove vhodne parametre in požene model. Nato izračuna odstopanja med prejšnjim in tekočim izračunom in določi nove vrednosti parametrov. PEST ponavlja postopke, dokler niso doseženi minimumi objektne funkcije ali kriteriji za končanje programa [62].

Pred in post procesorski programi za model podzemne vode MODFLOW imajo za neposredno uporabo že izdelane grafične vmesnike (GUI, angl. Graphical User Interface) za uporabo in nastavitve PEST. To so na primer GMS, FeFlow, Visual Modflow in Groundwater Vistas. Značilnosti GUI vmesnikov so, da v celoti ne izkoristijo vseh možnosti, ki jih ponuja PEST orodje, ki so, izvajajo v ukaznem načinu. Za to se priporočajo tudi uporabnikom oziroma modelistom podzemne vode, da se naučijo uporabe PEST iz ukazne vrstice, ker to prinaša več možnosti in večjo prilagodljivost. Na prvi pogled se delo s PEST zdi zastarelo in staromodno, ker se ne uporablja miška. Ko pa se z orodjem bolje spoznamo, ugotovimo, da se le na tak interaktivni način lahko izkoristijo vsi potenciali in možnosti, ki jih vsebujejo PEST orodja.

Programsko orodje, zasnovano leta 1994, je danes preraslo v medsebojno povezano obsežno množico programov, ki jih lahko za različne potrebe analize modela med seboj kombiniramo. Tako lahko izvajamo različne operacije analize modela od ugotavljanja pomembnosti oziroma občutljivosti izračunov modela na spremembo vrednosti posameznega parametra, poljubnega umerjanja parametrov do analize rezultatov.

Osnovne informacije, priročniki z navodili in programska oprema PEST je dosegljiva na naslovih:

- <http://www.pesthomepage.org/>
- <https://www.usgs.gov/software/pest-parameter-estimation-code-optimized-large-environmental-models-version-3>
- <https://github.com/usgs/pestpp>
- <https://pest.cloud/>

2.4 TEORETIČNE OSNOVE PROGRAMSKEGA ORODJA

PEST je skupek različnih programov za postopke priprave, analize, kontrole in zahteva določena poznavanja tega sistema. Postopki umerjanja so v svojem bistvu enaki za vsa programska orodja skupine PEST. PEST programskih orodij obstaja več različic, kot so PEST, i64PEST, PPEST, i64PPEST, BEOPEST, PEST++ in PEST_HP. PPEST je okrajšava za »parallel PEST«, okrajšava "64" pomeni, da gre za 64-bitno različico PEST. PEST++ je inačica PEST napisana v programskem jeziku C++, vse druge so pisane v programskem jeziku Fortran. PEST_HP je novejša različica PEST, optimizirana za umerjanje modelov v zelo vzporednih okoljih »highly parallelized environments«. Vse verzije so dostopne v prosto dostopni kodi, razen verzije PEST_HP Cloud, ki je plačljiva in se izvajajo v oblaku Microsoft Azure. Dostopna je na <https://www.sspa.com/training/pesthp-and-pestcloud>. BEOPEST je v nasprotju z običajnim vzporednim PEST-om bolj učinkovit in ima bolj pametne agente, ki opravijo še druga dela in ne samo, da poganjajo model. Verzijo PEST_HP in i64PEST smo največkrat uporabili v postopkih umerjanja. Poleg algoritma PEST obstajata tudi znana globalna umerjevalna algoritma SCEUA in CEMAES [63] implementirana v programih cmaes_hp, cmaes_p in sceua_p.

Programsko orodje PEST je uporabno tudi na drugih področjih modeliranja. Kljub obsežni literaturi [23,64–68] zahteva uporaba programskega orodja dodatno usposabljanje. Tako smo se udeležili delavnice v Beogradu leta 2013 in v Milanu leta 2018. Orodje je izredno učinkovito in zahteva dodatno ekspertno znanje. Vsako leto se po svetu organizira več delavnic PEST, a so v glavnem posvečena področju umerjanja modelov podzemnih voda (<http://www.pesthomepage.org/Training.php>). Obstaja tudi tema »Techniques for calibration of surface water model«, ki obravnava površinske vode.

Ukazi PEST pospešijo in avtomatizirajo proces umerjanja modela z modeliranjem rešitve inverznega problema, kar daje programskemu orodju posebno dodatno vrednost glede na druge postopke ali programska orodja. V praksi so sistemi linearnih enačb zelo občutljivi. Orodje, ki nam pomaga razjasniti, zakaj je določen sistem linearnih enačb zelo občutljiv, je singularni razcep. Singularni razcep je zelo močno orodje v numerični linearni algebri. S pomočjo singularnega razcepa lahko pridemo do v praksi uporabnih rešitev nekaterih zelo občutljivih sistemov. Postopek, s katerim pridemo do uporabne rešitve zelo občutljivega sistema, se imenuje regularizacija. Regularizacija se uporablja pri inverznih problemih, kot je npr. ostrenje digitalnih fotografij [69]. Sodobne metodologije regularizacije zagotavljajo rešitev inverznega problema, v postopku umerjanja modela, z najmanjšo varianco napake, ne glede na stanje dobro ali slabo pogojenega modela [66].

Vse naloge umerjanja ali analize negotovosti, PEST opravi sam. Običajno traja nekaj ur, odvisno od časa izvajanja modela, kriterijev končanja izvajanja in hitrosti računalnika. Uporabniška opravila po vrsti vključujejo:

- nastavitve parametrov PEST kontrolne datoteke,
- pripravo začetnih in mejnih vrednosti za izbrane parametre,
- pripravo datotek PEST in
- zagon postopka PEST-a.

Prvi dve nalogi zahtevata uporabnikovo znanje o modelu in implicitno vključuje nalogo priprave datotek PEST.

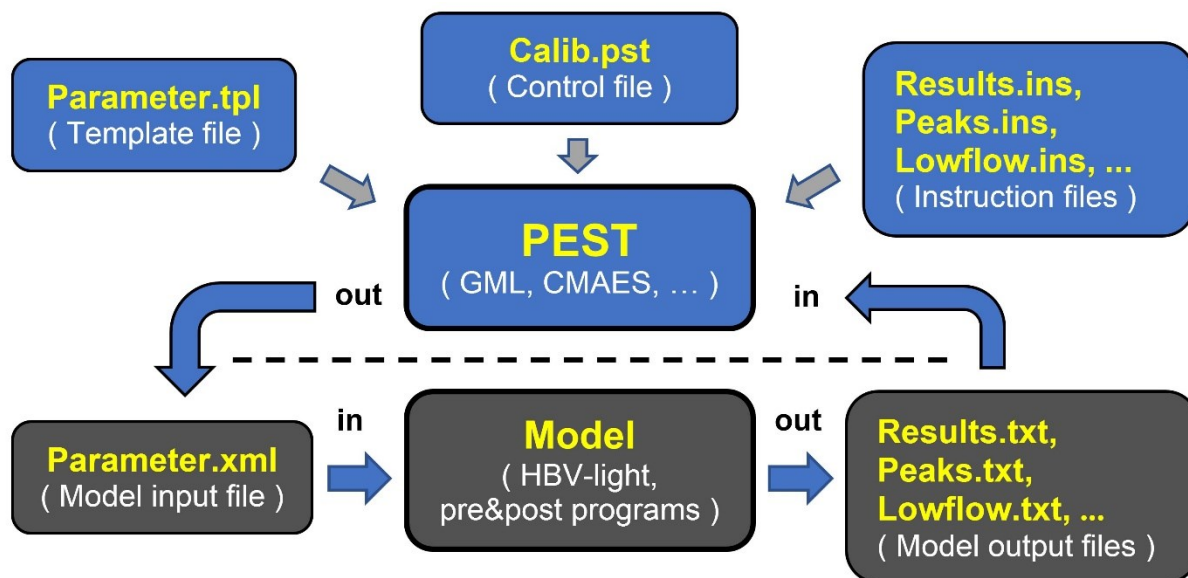
V svojem primeru bomo podali metodologijo umerjanja in uporabe regularizacije pri inverznem problemu določanja parametrov hidrološkega modela. S pomočjo regularizacije parametrov lahko izdatno izboljšamo umerjanje modela, s čimer dosežemo minimalno varianco napak. Pri večjem številu parametrov izvedemo regularizacijo. V najširšem smislu je »regularizacija« (J. Doherty) tisto, kar je potrebno, da bi dobili edinstveno rešitev za »neprilagojeni, slabo zastavljeni« inverzni problem. To je problem, pri katerem poskušamo oceniti več parametrov, kot pa imamo podatkov. Postopek regularizacije opravi samo orodje PEST. S pravilno uporabo PEST imamo naslednje prednosti:

- iz podatkov dobimo največ informacij, s čimer dosežemo nekaj, kar je blizu parametrskega nizu varianc z najmanjšo napako,
- in z ohranjanjem številnih parametrov v modelu smo sposobni raziskati, v kolikšni meri so parametri napačni.

Programi orodji PEST zahtevajo tri vrste vhodnih datotek (Slika 9), s končnicami (tpl, ins in pst):

- datoteke s predlogami parametrov (Template File), ena za vsako vhodno datoteko modela, v kateri so parametri ali spremenljivke za odločanje, ki upravljajo izvajanje umerjanja;
- datoteke z navodili (Instruction Files), eno datoteko za vsako izhodno datoteko modela, iz katere mora PEST prebrati števila opazovanih rezultatov posameznega izračuna modela in

- eno nadzorno datoteko (Control File), ki programskemu orodju priskrbi imena vseh datotek s predlogami in navodili, imena ustreznih vhodnih in izhodnih datotek modela, vrednosti nadzornih spremenljivk, vrednosti začetnih parametrov, merilne vrednosti, uteži itd.



Slika 9: Shema PEST-ovega paralelnega procesa umerjanja.

Figure 9: Scheme of the PEST calibration process.

Uspeh umerjanja modela z orodjem PEST je v veliki meri odvisen od izbire nadzornih parametrov postopka umerjanja. Za samodejno programsko vodenje izračuna hidrološkega modela HBV-light v procesu umerjanja z orodji PEST (ali PEST_HP) moramo pripraviti potrebne povezovalne nadzorne datoteke. Smiselno je, da vse združimo v eno mapo ..\Template\ v katero bomo vnesli predložne, povezovalne in nadzorne datoteke PEST.

2.4.1 Priprava nadzorne datoteke

Pri pripravi orodja PEST moramo kreirati nadzorno datoteko (PEST Control File - PCF) s končnico pst (Slika 9). PEST nadzorna datoteka, kot ime pove, kontrolira oziroma nadzira procese s tem, da podaja navodila, funkcije in informacije PEST-u, kaj naj stori. Poimenovali jo bomo Calib.pst in vanjo (Preglednica 1) vpisali vrednosti parametrov, ki so podani v prilogah (Priloga E) in prilogi (Priloga F). Nadzorno PEST datoteko je potrebno dobro poznati. Napačno ali slabo podana vrednost nadzornega parametra daje slabe rezultate umerjanja. Tu so potrebne ekspertne izkušnje, pridobljene skozi delo z orodji PEST.

Preglednica 1: Calib.pst je PEST nadzorna datoteka za umerjanje podporečja HBV-Land.

Table 1: Calib.pst is a PEST control file for calibrating the HBV-Land subcatchment.

pcf						
* control data						
restart		estimation				
16	3744	16	0	1		
1	1	double point		1	0	0

```

20      -3      0.3    0.005      7 999
3        3      0.001
0.1
70      0.001 3      3      0.005 3

se nadaljuje...
...nadaljevanje

0        0        0
* singular value decomposition
1
16      5.00E-12
0
* parameter groups
01PERC relative      0.02  0      switch 2      parabolic
01UZL  relative      0.02  0      switch 2      parabolic
01K0   relative      0.02  0      switch 2      parabolic
01K1   relative      0.02  0      switch 2      parabolic
01K2   relative      0.02  0      switch 2      parabolic
01MXBS relative      0.02  0      switch 2      parabolic
01CET  relative      0.02  0      switch 2      parabolic
01TT   relative      0.02  0.01  switch 2      parabolic
01CFM  relative      0.02  0      switch 2      parabolic
01SP   relative      0.02  0      switch 2      parabolic
01SFC  relative      0.02  0      switch 2      parabolic
01CFR  relative      0.02  0      switch 2      parabolic
01CWH  relative      0.02  0      switch 2      parabolic
01FC   relative      0.02  0      switch 2      parabolic
01LP   relative      0.02  0      switch 2      parabolic
01BET  relative      0.02  0      switch 2      parabolic
* parameter data
01PERC log   factor 0.5    0.1    2      01PERC 1.00  0      1
01UZL  log   factor 30     5      50     01UZL  1.00  0      1
01K0   log   factor 0.3    0.1    0.9    01K0   1.00  0      1
01K1   log   factor 0.1    0.01   0.2    01K1   1.00  0      1
01K2   log   factor 0.05   5.E-05 0.1    01K2   1.00  0      1
01MXBS log   factor 2      1      5      01MXBS 1.00  0      1
01CET  log   factor 0.2    0.01   0.3    01CET  1.00  0      1
01TT1  none  relative     1      -2     1      01TT   1.00  0      1
01CFM1 log   factor 3      0.5     6      01CFM  1.00  0      1
01SP1  log   factor 0.9    0.01   1      01SP   1.00  0      1
01SFC1 log   factor 0.9    0.01   1      01SFC  1.00  0      1
01CFR1 log   factor 0.045  0.04   0.06   01CFR  1.00  0      1
01CWH1 log   factor 0.05   0.01   0.2    01CWH  1.00  0      1
01FC1  log   factor 200    50     500    01FC   1.00  0      1
01LP1  log   factor 0.5    0.3     1      01LP   1.00  0      1

```

```

01BET1 log    factor 2      1      5      01BET 1.00  0      1
* observation groups
01mQ
* observation data
01mQ_1 0.281  1      01mQ

se nadaljuje...
...nadaljevanje

01mQ_2 0.272  1      01mQ
01mQ_3 0.267  1      01mQ

~ in tako naprej do zadnjega merjenega podatka (01mQ_3744)

01mQ_3742    0.701  1      01mQ
01mQ_3743    0.763  1      01mQ
01mQ_3744    0.706  1      01mQ
* model command line
Model.cmd
* model input/output
Parameter.tpl .\Data\Parameter.xml
Results.ins .\Results\Results.txt

```

V preglednici (Preglednica 2) je detajlno v stolpcu »Opis« opisan vsak kontrolni PEST-ov parameter. Več je opisano v navodilih [64].

Preglednica 2: Opis parametrov nadzorne datoteke PEST.

Table 2: Description of the parameters of the PEST control file.

Parameter	Podatkovni tip	Vrednost	Opis
RSTFLE	tekst	restart/norestart	omogoča ponoven zagon, ko je postopek prekinjen
PESTMODE	tekst	estimation/prediction/ regularisation	Način delovanja programa
NPAR	celo število	večji od nič	število parametrov
NOBS	celo število	večji od nič	število opazovanj
NPARGP	celo število	večji od nič	število skupin parametrov
NPRIOR	celo število	karkoli	pozitivna vrednost pomeni število predhodnih informacij
NOBSGRP	celo število	večji od nič	število grup opazovanih vrednosti
NTPLFLE	celo število	večji od nič	število predlog
NINSFLE	celo število	večji od nič	število datotek z navodili

PRECIS	tekst	single/double	oblika zapisa vrednosti parametrov (enojna ali razširjena natančnost)
DPOINT	tekst	point/nopoint	opuščanje decimalnega ločila
(NUMCOM)	celo število	neobvezno; večji od nič	število ukaznih vrstic

se nadaljuje...

...nadaljevanje

(JACFILE)	celo število	neobvezno; -1, 0, 1	kontrolira račun odvodov
(MESSFILE)	celo število	neobvezno; 0, 1	pove, ali naj PEST zapiše datoteko s poročilom
(MESSFILE)	celo število	neobvezno; 0, 1	pove, ali naj PEST zapiše datoteko s poročilom
(MESSFILE)	celo število	neobvezno; 0, 1	pove, ali naj PEST zapiše datoteko s poročilom
RLAMBDA1	realno število	večje ali enako nič	začetna vrednost Marquardtovega števila
RLMAFAC	realno število	manjši ali večji od nič	način prilagajanja Marquardtovega števila
PHIRATSUF	realno število	od nič do ena	relativno zmanjšanje ciljne funkcije za končanje iteracije
PHIREDLAM	realno število	od nič do ena	prenehanje iskanja ustreznega Marquardtovega števila
NUMLAM	celo število	večje ali enako ena	maksimum Marquardtovega števila
RELPARMAX	realno število	večji od nič	največja relativna sprememba parametra
FACPARMAX	realno število	večje od ena	največja absolutna sprememba parametra
FACORIG	realno število	od nič do ena	najmanjši delež vrednosti prvotnega parametra pri ocenjevanju relativne spremembe
PHIREDSWH	realno število	od nič do ena	kriterij menjave načina računanja odvodov
DOAUI	tekst	aui/auid/noau	samodejno posredovanje v primeru neobčutljivih parametrov
NOPTMAX	celo število	-2, -1, 0, večji od nič	največje število iteracij
PHIREDSTP	realno število	večji od nič	relativno zmanjšanje ciljne funkcije, ki zaključi račun
NPHISTP	celo število	večji od nič	število zaporednih ponovitev, za katere velja PHIREDSTP
NPHINORED	celo število	večji od nič	največje število iteracij od zadnjega zmanjšanja objektivne funkcije

se nadaljuje...

...nadaljevanje

RELPARSTP	realno število	večji od nič	največja relativna sprememba parametra med iteracijami
NRELPAR	celo število	večji od nič	število iteracij, pri katerih velja RELPARSTP
ICOV	celo število	nič ali ena	zapis kovariančne matrike v datoteko
ICOR	celo število	nič ali ena	zapis datoteke matrike korelacijskega koeficienta
IEIG	celo število	nič ali ena	pove, ali naj PEST zapiše matriko lastnih vektorjev
PARGPNME	tekst	12 znakov ali manj	ime skupine parametrov
INCTYP	tekst	relative/absolute/ rel_to_max	izračun prirastkov parametrov
DERINC	realno število	večji od nič	absolutna ali relativna vrednost prirastkov
DERINCLB	realno število	večji ali enak nič	najmanjša absolutna vrednost prirastka
FORCEN	tekst	switch/always_2/always_3/ switch_5/always_5	način izračuna odvodov
DERINCMUL	realno število	večji od nič	množitelj prirastkov pri računu odvodov
DERMTHD	tekst	parabolic/outside_pts/ best_fit/minvar/maxprec	metoda izračuna odvodov višjega reda
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	$\leq$ PARVAL1	spodnja meja parametra
PARUBND	realno število	$\geq$ PARVAL1	zgornja meja parametra
PARGP	tekst	12 znakov ali manj	ime skupine parametra
SCALE	realno število	različno od nič	množitelj parametra

se nadaljuje...

...nadaljevanje

OFFSET	realno število	karkoli	dodana vrednost parametru
DERCOM	celo število	večji ali enak nič	model ukazne vrstice, ki se uporablja pri prirastkih računskih parametrov
PARTIED	tekst	12 znakov ali manj	ime matičnega parametra
OBSNME	tekst	12 znakov ali manj	ime skupine opazovanih vrednosti
OBSNME	tekst	20 znakov ali manj	ime opazovane vrednosti
OBSVAL	realno število	katerokoli število	izmerjena vrednost
WEIGHT	realno število	večji ali enak nič	utež opazovane vrednosti
OBSNME	tekst	12 znakov ali manj	ime grupe opazovanih vrednosti
TEMPFLE	tekst	ime datoteke	ime predloge
INFLE	tekst	ime datoteke	ime vhodne datoteke
INSFLE	tekst	ime datoteke	ime datoteke z navodili
OUTFLE	tekst	ime datoteke	ime izhodne datoteke

Nadzorna datoteka programskemu orodju PEST priskrbi imena vseh datotek s predlogami in navodili, imena ustreznih vhodnih in izhodnih datotek modela, vrednosti nadzornih spremenljivk, vrednosti začetnih parametrov, opazovane izmerjene vrednosti, uteži itd.

Datoteka PCF je formatirana v oddelkih (ang. section) tako, da je položaj vsakega parametra v vnaprej točno določeni vrstici in vrstnem redu v stolpcih. Parametri v oglatih oklepajih niso obvezni. Bolj podroben pomen vsakega od parametrov je podan v [64]. Za umerjanje parametrov je pomemben sklop podatkov (* parameter data) v katerem definiramo robne pogoje parametrov za začetno vrednost parametra, spodnjo mejo parametra, zgornjo mejo parametra in ime skupine parametra. Ime parametra PARNME je lahko dolgo 12 znakov ali manj. Ker HBV-light računa tudi z več podporečji je primerno imena parametrov številčiti s številko podporečja.

Nadzorna datoteka mora obvezno vsebovati 7 oddelkov podatkov (od skupno 17-tih), ki se začnejo z zvezdico in imenom oddelka (Preglednica 3):

Preglednica 3: Obvezni oddelki kontrolne datoteke PEST [64].

Table 3: PEST Control file mandatory sections [64].

Oddelek_1 * kontrolni podatki	(angl. * control data) spremenljivke izvajanja Gauss-Levenberg-Marquardt algoritma.
Oddelek_7 * grupe parametrov	(angl. * parameter groups) nekateri parametri se obnašajo podobno in jih lahko združimo v grupe, s katerimi definiramo postopke računanja odvodov. Tako nam prirastka in metode za račun odvoda ni treba določati za vsak parameter posebej, ampak samo za vsako grupo.
Oddelek_8 * podatki o parametrih	(angl. * parameter data), podatki o parametrih, nekateri parametri so lahko konstantni, vezani, logaritmično transformirani. To so podane začetne in mejne vrednosti.
Oddelek_9 * grupe opazovanih vrednosti	(angl. * observation groups), tu so naštetna imena grup. Tudi opazovane vrednosti namreč glede na njihovo vrsto združujemo v grupe. Na začetku optimizacijskega postopka PEST izračuna deleže prispevka posameznih grup k ciljnifunkciji. Da so si grupe enakovredne v prispevku ciljne funkcije lahko določamo uteži..
Oddelek_10 * podatki o opazovanih vrednostih	(angl. * observation data), opazovane oziroma izmerjene vrednosti na katere se model umerja.
Oddelek_12 * ukazna vrstica za zagon modela	(angl. * model command line), ime datoteke z zaporedjem več ukazov »Model.cmd« . V tej datoteki se lahko izvršijo tudi ukazi pred in post-procesiranja rezultatov modela (nizki pretoki, visoke konice).
Oddelek_13 * vhodni in izhodni podatki	(angl. * model input/output), poimenujemo lokacije PEST-ovih vhodnih in izhodnih datotek (Slika 9).

Struktura kontrolne datoteke in pomen posameznih spremenljivk sta podrobneje razložena v prilogi (Priloga E).

2.4.2 Priprava datoteke z navodili

Izhodne datoteke modela se berejo z datotekami z navodili (angl. PEST Instruction File - PIF). Datoteka z navodili, kot je shematično prikazano na sliki (Slika 9), mora biti na voljo za vse izhodne datoteke modela, iz katerih je treba prebrati vsaj eno število. Navodila zagotavljajo usmerjeno gibanje naprej po izhodni datoteki modela. Navodila v datoteki z navodili obveščajo program, ki jih uporablja za pregledovanje izhodne datoteke modela s štetjem števil vrstic ali iskanjem fragmentov besedila ali kombinacijo obeh.

Pomembno je, da se podatki med programi prenašajo z največjo natančnostjo. Tako naj imajo številke v izhodnih datotekah vsaj šest ali več pomembnih števil. Če je le mogoče se, naj uporablja eksponentni zapis, kjer se število pomembnih (signifikantnih) števil takoj opazi (npr. $-3.123456E-10$).

Omenjenih datotek je lahko tudi več, če želimo kontrolirati različne skupine podatkov. Če želimo obravnavati pretoke, ne glede na njihovo velikost uredimo eno datoteko z navodili. V PEST nadzorni datoteki bomo tako imeli le eno opazovano skupino. Lahko pa pri umerjanju dodatno zahtevamo posebno pozornost pojavu poplavnih valov in oblikujemo še ena datoteko za to in če želimo posebno poudariti nizke pretoke, pripravimo še tretjo datoteko. Datoteko visokih in/ali nizkih konic pripravimo z zunanjim programom, ki bere rezultate hidrološkega modela in iz njega razbere vrednosti konic glede na podana merila.

2.4.3 Priprava datoteke predloge parametrov

Z datoteko predloge parametrov (angl. PEST Template File - PTF), s končnico ».tpl«, določimo lokacije nahajanje parametrov v vhodnih datotekah modela. Predloga parametrov je v bistvu vhodna datoteka modela v kateri označimo mesto, kjer so številke določenega parametra. Številke v tem prostoru nadomestimo z imeni parametrov, ki jih omejimo s posebnim znakom. Kateri kontrolni znak je to, je podano v datoteki *.tpl v prvi vrstici takoj za besedo PTF. V navadi je, da je to znak #. Simbol # je najpogostejše znan kot številski znak ali "hash". V ta določena mesta vhodne datoteke parametrov hidrološkega modela PEST pred vsakim izračunom modela zapiše nove vrednosti.

2.4.4 Gauss-Levenberg-Marquardt algoritem

"PEST Book" [20] je priročnik, ki pokriva tako teorijo, na katerih temelji PEST, kakor tudi podporno programsko oprema. Priročnik opisuje, med drugim, teorijo singularnega razcepa in Tihonovo regularizacijo. Knjiga je tudi referenčno besedilo za analizo negotovosti zelo parametriziranih inverznih problemov. V metodah dela bomo teoretično na kratko opisali samo Gauss-Levenberg-Marquardt (GLM) algoritem iz poglavja »The Mathematics of PEST User Manual Part I. 2005« [62]. Gauss-Levenberg-Marquardt algoritem je običajna metoda za reševanje nelinearnih problemov na osnovi najmanjših kvadratov odstopanja. Naboru izmerjenih podatkov želimo s pomočjo najmanjših kvadratov odstopov prilagoditi funkcijo s parametri tako, da zmanjšamo vsoto kvadratov razlik med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi na minimum [70].

V člankih [14,62] je predstavljen postopek za umerjanje parametrov linearnih modelov in nadalje prehod na ocenjevanje parametrov nelinearnih modelov.

Linearen model opišemo z enačbo:

$$\mathbf{X} \mathbf{b} = \mathbf{c} \quad (6)$$

Kjer pomeni $\mathbf{X}$ matriko dimenzij $m \times n$ s konstantnimi členi in neodvisnimi od vektorja $\mathbf{b}$, $\mathbf{b}$ vektor n parametrov in $\mathbf{c}$ vektor m opazovanih vrednosti. Opazovane vrednosti so generirane z modelom.

Merilo ujemanja rezultatov modela z izmerjenimi vrednostmi je ciljna funkcija Φ . Definiramo jo kot:

$$\Phi = (\mathbf{c} - \mathbf{X} \mathbf{b})^T \mathbf{Q} (\mathbf{c} - \mathbf{X} \mathbf{b}) \quad (7)$$

$\mathbf{c}$ je v tem primeru vektor, ki vsebuje izmerjene vrednosti na terenu; $\mathbf{Q}$ je diagonalna matrika dimenzij $m \times m$ in vsak člen q_{ii} na diagonali predstavlja kvadrat uteži i -te opazovane vrednosti. V matriki $\mathbf{Q}$ je tako zajet vpliv uteži, ki jih pripišemo opazovanim vrednostim.

Ciljne funkcije Φ doseže minimum pri:

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{c} \quad (8)$$

Rešitev $\mathbf{b}$ je unikatna, če je število opazovanih vrednosti m večje od števila parametrov n . Vektor $\mathbf{c}$ v enačbi (8) vsebuje izmerjene vrednosti in je vektor $\mathbf{b}$ v enačbi (8) dejansko ocena vektorja $\mathbf{b}$ iz enačbe (6). Negotovost ocene tako izrazimo s kovariantno matriko vektorja $\mathbf{b}$:

$$\mathbf{C}(\mathbf{b}) = \sigma_r^2 (\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X})^{-1} \quad (9)$$

Enačbo (9) uporabimo za izračun intervalov zaupanja parametrov. σ_r^2 je varianca elementov vektorja $\mathbf{c}$ ob predpostavki, da so elementi neodvisni in je proporcionalna minimumu ciljne funkcije:

$$\sigma_r^2 = \frac{\Phi_{min}}{m-n} \quad (10)$$

Število prostostnih stopenj ocenjevanja parametrov je razlika med številom opazovanih vrednosti in številom parametrov.

Razmerja med opazovanimi vrednostmi in parametri in ne izražamo z enačbo (6) pri nelinearnih modelih. Proces iskanje minimuma ciljne funkcije je iterativen.

Funkcija M preslika n -dimenzijski prostor parametrov v m -dimenzijski prostor opazovanih vrednosti in se niz opazovanih vrednosti $\mathbf{c}_0$, generiranih z modelom, izrazi z začetnim vektorjem parametrov $\mathbf{b}_0$:

$$\mathbf{c}_0 = \mathbf{M}(\mathbf{b}_0) \quad (11)$$

Opazovanim vrednostim $\mathbf{c}$, pripadajoče vektorju parametrov $\mathbf{b}$, ki je le za malenkost različen od $\mathbf{b}_0$, po Taylorjevem izreku zapišemo s približkom:

$$\mathbf{c} = \mathbf{c}_0 + \mathbf{J} (\mathbf{b} - \mathbf{b}_0) \quad (12)$$

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

V primeru nelinearnih modelov ciljno funkcijo Φ definiramo kot:

$$\Phi = (\mathbf{c} - \mathbf{c}_0 - \mathbf{J} (\mathbf{b} - \mathbf{b}_0))^T \mathbf{Q} (\mathbf{c} - \mathbf{c}_0 - \mathbf{J} (\mathbf{b} - \mathbf{b}_0)) \quad (13)$$

Enačbi (7) in (13) sta si podobni in za izračun vektorja $(\mathbf{b} - \mathbf{b}_0)$ uporabimo zgoraj predstavljeno teorijo, imenovano vektor nadgradnje $\mathbf{u}$ (angl. upgrade vector). Enačbo (8) preoblikujemo v:

$$\mathbf{u} = (\mathbf{J}^T \mathbf{Q} \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{Q} (\mathbf{c} - \mathbf{c}_0) \quad (14)$$

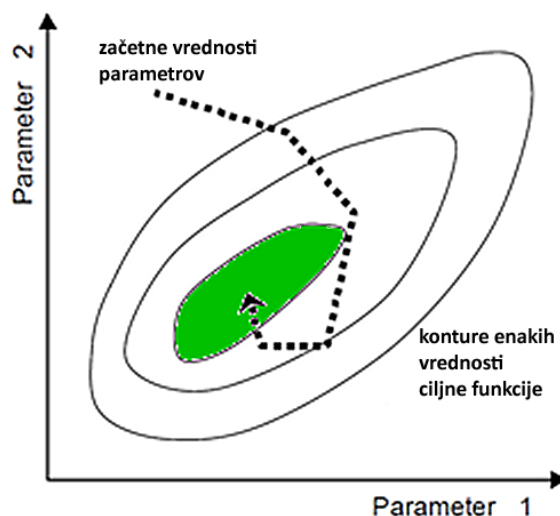
$$\mathbf{u} = (\mathbf{J}^T \mathbf{Q} \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{Q} (\mathbf{c} - \mathbf{c}_0) \quad (14)$$

In enačbo (9) v:

$$\mathbf{C}(\mathbf{b}) = \sigma_r^2 (\mathbf{J}^T \mathbf{Q} \mathbf{J})^{-1} \quad (15)$$

Enačba (12) je le približno pravilna kakor tudi enačba (14) in ne moremo trditi, da so vrednosti ciljne funkcije najmanjša pri vektorju $\mathbf{b}$ dobljenem, ko vektor trenutnih vrednosti parametrov $\mathbf{b}_0$ povečamo za vektor $\mathbf{u}$. Vektor $\mathbf{b}$ je zato v naslednjem koraku privzet kot začetni vektor $\mathbf{b}_0$, z njim ponovno računamo vektor $\mathbf{u}$ in se korakoma približujemo minimumu ciljne funkcije.

Pri nelinearnih modelih moramo definirati začetne vrednosti parametrov pred procesom njihovega umerjanja.



Slika 10: Iterativno izboljševanje vrednosti parametrov. (prirejeno po [62,71]).

Figure 10: Iterative improvement of the parameter values (adapted from [62,71]).

Na sliki (Slika 10) je prikazano iterativno, konvergentno izboljševanje vrednosti parametrov od začetnih vrednosti proti takim, ki dajo globalni minimum ciljne funkcije na primeru problema z dvema parametroma [62,71].

Nelinearno ocenjevanje parametrov na osnovi najmanjših kvadratov temelji na enačbi (14). Zapišemo jo kot:

$$\mathbf{u} = (\mathbf{J}^T \mathbf{Q} \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{Q} \mathbf{r} \quad (16)$$

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

Vektor $\mathbf{g}$ je gradient ciljne funkcije Φ v prostoru parametrov. Odvod ciljne funkcije po i -tem parametru b_i je i -ti element vektorja $\mathbf{g}$:

$$\mathbf{g}_i = \frac{\partial \Phi}{\partial b_i} \quad (17)$$

Smer najbolj strmega zmanjševanja ciljne funkcije definira vektor $-\mathbf{g}$, zato prilagajamo vektor nadgradnje $\mathbf{u}$, da na začetku optimizacijskega procesa sledi smeri $-\mathbf{g}$. To dosegamo z uvedbo »Marquardtovega parametra« α v enačbi (16):

$$\mathbf{u} = (\mathbf{J}^T \mathbf{Q} \mathbf{J} + \alpha \mathbf{I})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{Q} \mathbf{r} \quad (18)$$

Pri tem ima enotna matrika $\mathbf{I}$ dimenzije $n \times n$.

Pri reševanju problemov, kjer sta opazovane vrednosti in parametri modela različnih velikostnih redov, se tudi elementi Jacobijeve matrike $\mathbf{J}$ razlikujejo po velikosti, kar povzroča v napake pri računu vektorja $\mathbf{u}$. Zato enačbo (18) preoblikujemo v:

$$\mathbf{S}^{-1} \mathbf{u} = ((\mathbf{J} \mathbf{S})^T \mathbf{Q} \mathbf{J} \mathbf{S} + \alpha \mathbf{S}^T \mathbf{S})^{-1} (\mathbf{J} \mathbf{S})^T \mathbf{Q} \mathbf{r} \quad (19)$$

Kjer je $\mathbf{S}$ matrika dimenzij $n \times n$ in ima samo diagonalne člene. i -ti člen diagonale zapišemo kot:

$$S_{ii} = (J^T Q J)_{ii}^{-1/2} \quad (20)$$

Največji element matrike $\alpha S^T S$ definiramo kot »Marquardtova lambda« λ .

Vektor nadgradnje $\mathbf{u}$ računa PEST s pomočjo Marquardtovih lambda λ po enačbi (19). Začetna vrednost lambda v prvi iteraciji optimizacijskega postopka določi uporabnik. PEST ovrednoti vrednost ciljne funkcije in prilagodi parametre glede na vektor $\mathbf{u}$. V naslednjem koraku PEST začetno vrednost lambda zmanjša za faktor, določen s strani uporabnika ter ponovno izračuna vektor $\mathbf{u}$, nove parametre in pripadajočo ciljno funkcijo. Nato lambda ponovno zmanjša, če se zmanjša vrednost ciljne funkcije, v nasprotnem primeru v ponovljenem postopku začetno vrednost lambda poveča. Iskanje vrednosti lambda zaključimo z izpolnitvijo kriterija, podanega s strani uporabnika. V naslednji iteraciji se za začetno vrednost lambda uporablja tista lambda iz predhodne iteracije, ki je dala najmanjšo ciljno funkcijo.

Običajno se preizkusi več lambda v vsaki iteraciji, število lambda je 1 do 10. V praktičnem primeru se je izkazalo 7 lambda za primerno zadostno. Praviloma se lambda med postopkom zmanjšujejo in je priporočljivo izbrati visoko začetno vrednost, vsaj 10.

Slabost GLM, kot gradientne metode je, da težje najde globalni minimum, če ima le-ta tudi lokalne minime ciljne funkcije. Rezultat optimizacijskega postopka je lahko tudi set parametrov, ki da le lokalni minimum ciljne funkcije, ne pa globalnega in parametri niso najbolj optimalni [72]. Končne vrednosti parametrov so odvisne od vrednosti, določenih na začetku. Za začetne vrednosti parametrov zato izbiramo postopke, ki so manj natančni, toda omogočajo izogibanje lokalnemu minimumu. Pri iskanju globalnega minimuma moramo upoštevati predhodne informacije. S tem zmanjšamo tudi čas, potreben za račun optimizacije [62]. PEST lahko uporabimo tudi večkrat z različnimi začetnimi vrednostmi parametrov in preverimo ali vrednosti zadovoljujejo globalni minimum ciljne funkcije [73].

Nelinearnost ekstremnega inverznega problema zaradi njegove narave lahko vodi v lokalni optimum ciljne funkcije umerjanja. To je tudi razlog za nasprotovanje uporabi teh metod, ker se iskanje optimuma lahko zaključi v lokalnem optimumu namesto v globalnem.

To trditev je treba obravnavati v kontekstu. Medtem ko je obstoj lokalnih optimumov v nekaterih primerih umerjanja nesporen, je v literaturi veliko primerov, kjer je bila neenakost parametrov, ki je nastala zaradi obstoja ničelnega prostora, zamenjana z neenakostjo parametrov, ki izhajajo iz lokalnega optimuma. Gradientne metode v proces inverzije vključujejo regularizacijo. Za podrobnosti glej Doherty [20]. Kavetski in drugi [27], poudarjajo, da se občasno pojavijo lokalni optimumi kot nezaželen izid in slabost modelnega algoritma.

2.4.5 Izhodne datoteke programa PEST

Pomembnejše izhodne datoteke programa so datoteke z umerjenimi vrednostmi parametrov in intervali zaupanja, občutljivosti opazovanih vrednosti, občutljivosti parametrov ter datoteke poteka umerjanja.

Pri izdelovanju modela je zelo pomembna analiza občutljivosti parametrov. Z njo izločimo parametre, ki nimajo bistvenega učinka na rezultat in zmanjšamo njihovo število pri umerjanju, opredelimo sodelovanja med komponentami modela in parametri [60], ugotavljamo veličino vpliva spreminjanja posameznih parametrov na izračunane vrednosti. Zmanjšanje ciljne funkcije je pri spremembi nekaterih parametrov komaj zaznavno. Velikost spreminjanja parametrov v eni iteraciji je omejena in se pri veliki spremembi nekaterih parametrov, drugi bolj občutljivi, ne morejo veliko spremeniti. To lahko pomeni,

da se ciljna funkcija ne zmanjšuje. Optimizacijski proces je zato upočasnen in zahteva veliko nepotrebnih zagonov modela. Takim razmeram se izognemo z vključevanjem avtomatiziranega postopka PEST, ki zadrži neobčutljive parametre pri konstantni vrednosti in optimizira ostale bolj občutljive parametre [62]. Program pri vsaki iteraciji porabi večino časa za račun Jacobijeve matrike. Model se požene vsaj tolikokrat, kolikor je parametrov za optimizacijo, ki niso fiksni ali vezani, kar je zapisano v kontrolni datoteki PEST-a. PEST izračuna občutljivost vsakega parametra glede na vse opazovane vrednosti na podlagi Jacobijeve matrike. Občutljivost parametra se računa z enačbo:

$$s_i = \frac{(J^T Q J)_{ii}^{1/2}}{m} \quad (21)$$

Kjer je **J** Jacobijeva matrika, **Q** matrika kvadratov uteži in *m* število opazovanih vrednosti z utežmi, ki nimajo vrednosti nič. Sestavljena občutljivost parametra je normalizirana velikost stolpca Jacobijeve matrike, pripadajočega parametru (glede na število opazovanih vrednosti). Pri tem je vsak element stolpca pomnožen z utežjo pripadajoče opazovane vrednosti. Posamezen stolpec Jacobijeve matrike je sestavljen iz odvodov vseh opazovanih vrednosti po določenem parametru [62].

Občutljivosti so odvisne od transformacije parametrov. Ko parameter logaritmično transformiramo, je njegova občutljivost izračunana za logaritem parametra [62]. Vrednosti sestavljene občutljivosti program vsakič po iteraciji optimizacijskega procesa zapiše v posebno izhodno datoteko s končnico »sen«. Na koncu procesa umerjanja PEST zapiše skupne občutljivosti ob upoštevanju »najboljše« Jacobijeve matrike. »Najboljša« matrika za ocenjevanje parametrov je tista, pri kateri je ciljna funkcija najmanjša. To je praviloma zadnja iteraciji ali pa v katera od predhodnih, če v zadnjih ni prišlo do ustreznega izboljšanja. Skupna občutljivost dober kazalnik občutljivosti končnih, optimiziranih vrednosti parametrov [62].

PEST računa tudi občutljivosti posameznih opazovanih vrednosti, določene z enačbo:

$$s_j = \frac{(Q(JJ^T))_{jj}^{1/2}}{n} \quad (22)$$

Sestavljena občutljivost opazovane vrednosti *o_j* je velikost *j*-te vrstice Jacobijeve matrike pomnožena z utežjo *s* pripadajočo utežjo in normirana glede na število parametrov *n*. Občutljivosti opazovanih vrednosti so uporabne, vendar za proces optimizacije manj pomembne od občutljivosti parametrov. Občutljivosti opazovanih vrednosti najdemo v datoteki, podani s končnico »seo« [62].

Datoteka razlik je tudi pomembna izhodna datoteka PEST-a s končnico »res«. V tej datoteki so podana imena opazovanih vrednosti, skupine, ki jim pripadajo, izmerjene in simulirane vrednosti, razlike med njimi, izmerjene in simulirane vrednosti, razlike med utežmi, standardni odkloni in »naravne« uteži [62].

2.5 EVOLUCIJSKI ALGORITMI

Evolucijski algoritmi (EA) so zasnovani na ustrojih biološke evolucije. EA uvajajo nekatera preoblikovanja naključnega iskanja in uporabe terminologije iz biologije in genetike [74]. Uvrščamo jih med meta hevrstične optimizacijske algoritme https://en.wikipedia.org/wiki/Evolutionary_algorithm.

S pojmom hevrstike označujemo pristop, ki nam ne vrne optimalne rešitve, ampak tako, ki zadovolji našim zahtevam oziroma potrebam. Hevrstiko rabimo pri problemih, kjer je iskanje optimalne rešitve nemogoče in zato se zadovoljimo s približno rešitvijo problema. GA - genetski algoritem je najbolj

priljubljena vrsta EA. GA išče približne rešitve težkih problemov s pomočjo principov evolucijske genetike kot je naravna selekcija, dedovanje in mutacija. GAP je okrajšava za genetski algoritem s Powellovo optimizacijo [11]. GAP je vgrajeno samodejno orodje za umerjanje parametrov modela HBV-light. Z genetskim umerjevalnim algoritmom GAP najdemo optimizirane nabore parametrov z razvojem nizov parametrov, ki uporabljajo selekcijo in rekombinacijo (vir: HBV-light program [22], Help on GAP simulation). Začetna populacija n nizov parametrov se naključno ustvari v prostoru parametrov in "primernost" vsakega niza se oceni z vrednostjo ciljne funkcije. Iz te populacije nastane nova generacija n-krat, ki združuje dva niza parametrov. Oba niza sta izbrana naključno, vendar je možnost, da sta izbrana, povezana s primernostjo niza parametrov z vrednostjo ciljne funkcije, ki daje setom največjo verjetnost. Nov nabor parametrov se generira iz dveh nadrejenih nizov (nizov A in B) z uporabo enega od naslednjih štirih pravil za vsak parameter naključno z določenimi verjetnostmi p:

- naključna vrednost v mejah, določenih za parameter (mutacija),
- optimizirana vrednost za določen parameter,
- naključna vrednost med vrednostmi niza A in nizom B (alternativno, če sta obe vrednosti enaki, naključna vrednost blizu te vrednosti),
- bodisi vrednost niza A bodisi vrednost niza B.

Zadnje pravilo ohranja vrednosti prejšnje generacije, medtem ko druga pravila določajo količino naključnega iskanja. Za uspeh algoritma je pomembno ravnoesje med temi pravili. Posledično se oceni ustreznost vsakega niza v novi populaciji in nova generacija nadomesti staro. Vendar pa se najboljši niz obdrži, če v postopku generacije ni boljšega seta. Ta evolucijski proces se bo ponovil za več generacij (dokler ne bo doseženo največje število modelnih izračunov).

Druga možnost je, da se namesto zgoraj opisane kombinacije parametrov, nastavi nov nabor parametrov z uporabo enodimenzionalne optimizacije vzdolž črte, ki jo določata dva parametra z uporabo metode Brent [75].

Po končanem genetskem algoritmu se uporablja za naknadno fino nastavitev Powellova kvadratno konvergentna metoda [75].

Med PEST orodji sta tudi dva algoritma EA oziroma globalni optimizacijski metodi SCEUA_P in CMAES_P. CMAES_P je PEST združljiva izvedba močne in robustne globalne optimizacijske sheme CMA-ES [76,77]. "CMA-ES" je okrajšava od "covariance matrix adaptation" in "ES", ki pomeni evolucijsko strategijo s prilagoditvami kovariančne matrike. "CMA-ES" je okrajšava od "covariance matrix adaptation" in "ES" ter pomeni evolucijsko strategijo s prilagajanjem kovariančne matrike. Problem za umerjanje koncipiramo kot problem izbire najugodnejše rešitve iz množice ugodnih rešitev. Evolucijski algoritmi (EA) so iterativni in jih uporabimo za iskanje čim boljših rešitev umerjanja. Algoritmu najprej podamo neki nabor pogojev končanja izračuna. To predstavljajo učinkovitost rešitve, ki jo želimo z algoritmom doseči. V CMA-ES si pri iskanju čim boljših rešitev pomagamo z uporabo kovariančne matrike. S kovariančno matriko prispevamo tudi k hitrejši rešitvi.

Uporabo globalnih metod, kot sta SCEUA_P in CMAES_P lahko spremljajo nekatere slabosti, ki vključujejo naslednje [64]:

- globalne metode ne morejo obravnavati velikega števila parametrov, kot jih lahko gradientne metode,

- lahko se pa uporabljajo tam, kjer je inverzni problem slabo pogojen,
- so po navadi veliko manj učinkovite pri iskanju rešitve za inverzni problem kot pa gradientne metode,
- težko je, če ne celo nemogoče, uporabiti napredne metode regularizacije z globalnimi optimizatorji.

2.6 DODATNI POSTOPKI MED HIDROLOŠKIM MODELOM IN PROGRAMSKIM ORODJE PEST

Programsko orodje PEST je razvito za potrebe modeliranja podtalnice s programom MODFLOW in njegovih variant. Za uporabo PEST-a s programom HBV smo morali izdelati več manjših računalniških programov v programskem jeziku ukazne vrstice "angl. command line", ki olajšajo in izvedejo določene specifične potrebne postopke [78]:

Clbrt.cmd ... Požene vzporedno izvajanje umerjanja modela PEST_HP (Priloga A).
 Model.cmd ... Požene HBV-light-CLI in izvede DeTAB (Priloga B).
 Regul.cmd ... Izvede postopke uteževanja in Tihonove regularizacije (Priloga C).
 DelP.cmd ... Briše nepotrebne odvečne datoteke PEST-a (Priloga D).

2.6.1 Clbrt.cmd - vzporedno umerjanje s PEST_HP

Clbrt program je skript (rokopis), zaporedni seznam ukazov in opomb, ki se izvajajo en za drugim, pisan za ukazno vrstico operacijskega sistema Windows. Tak program se imenuje tudi paketni oziroma "batch" program. Paketna datoteka je skriptna datoteka v DOS in Microsoftovem Windows. Sestavljen je iz niza ukazov, ki jih mora izvajati tolmač ukazne vrstice, shranjenih v navadni tekstovni (besedilni) datoteki. Program se izvaja zelo hitro, ker ne potrebuje nobenega dodatnega vmesnika med operacijskim sistemom in programom, ampak se izvaja neposredno na lupini operacijskega sistema. Clbrt.cmd poskrbi za vse, kar je potrebno za izvajanje PEST_HP in CMA-ES. PEST_HP deli izvorno kodo s PEST-om, zato podpira vse funkcionalnosti, ki jo ponuja originalni PEST (pest.exe, i64pest.exe in druge različice). Oba, PEST in PEST_HP uporabljata popolnoma enake algoritme reševanje inverznega problema. Razlikujeta se le, da PEST_HP omogoča vzporeden način izvajanja določenih del. To zelo pohitri izvajanje določenih časovno zamudnih opravil. Skriptna koda Clbrt.cmd je razumljiva in s tem omogoča lažje posodobljenje, spreminjanje in dodajanje novih ukazov. Ukazi in klici PEST programov se lahko poljubno in interaktivno izvajajo, v različnem zaporedju in kombinirajo. Vso interakcijo s PEST izvajamo iz ukazne vrstice "Command Prompt" v pogovorno-ukaznem oknu "Command Window". "Command Prompt" je v Windows poimenovan "Windows Command Processor", ki se ga pokliče oziroma zažene z ukazom (cmd) ali (command). Izvajanje programov še učinkoviteje izvajamo s pomočjo skriptnih »batch« datotek s končnico .bat, .cmd ali .com. Končnica .cmd se je pojavila kasneje v »Windows NT Command Script« in se izvaja prioriteto pred .bat. »Batch« datoteka .bat je poznana še iz zgodnjega PC obdobja iz DOS operacijskega sistema in je nekakšen podajalec zaporedja ukazov, ki jih izvaja ukazni tolmač (interpreter) operacijskega sistema. »Windows generacijam« je takšno izvajanje programov večinoma tuje in jim deluje staromodno, ker so navajeni uporabe grafičnih vmesnikov. Uporabniki računalnikov smo razvajeni s »klikanjem« na miško in smo že pozabili uporabljati tipkovnico v večji meri. Dejansko množico datotek operacijskega sistema Windows sestavljajo ravno skriptne datoteke. Računalniški zanesenjaki in IT strokovnjaki redno uporabljajo

ukazno vrstico z dobrim razlogom, ker z lahkoto pripravijo ter zelo učinkovito opravijo veliko avtomatiziranih administrativnih opravil. Takšne namenske programe je možno preprostejše povezovati in vključevati v internetno-strežniške aplikacije.

Program Clbrt.cmd je v primeru priloge (Priloga A) napisan za izvajanje na enem lokalnem računalniku. Vsak, ki se malo spozna na programiranje, bo po pregledu kode priloge (Priloga A) ugotovil, da se ga da preprosto dopolniti za izvajanje na več računalnikih z dodajanjem novih gostiteljev. Na začetku programa v spremenljivko (host1) je treba vnesti IP-naslov lokalnega računalnika. Naslednji gostitelj je z imenom (host2) itd. Za vsakega dodatnega gostitelja je treba izvesti enake postopke kot za en lokalni računalnik. To pomeni, da moramo dodati samo zanko, ki bo procesirala te postopke od gostitelja_1 "host1" do gostitelja_N "hostN".

Osnovna informacija, ki je potrebna za omogočanje komunikacije med računalniki, je IP-naslov računalnika (naslov internetnega protokola). Naslov IP ima dve glavni funkciji. Identificira gostitelja ali njegov omrežni vmesnik in zagotavlja lokacijo gostitelja v omrežju in s tem zmožnost vzpostavitve poti do tega gostitelja. IP-naslovi morajo biti v istem vozlišču unikatni. V preteklih letih so bili razviti različni protokoli. Internetni protokol 4 (IPv4) določa naslov IP kot 32-bitno število. Zaradi rasti medomrežja in izčrpanja razpoložljivih naslovov IPv4 je bila leta 1995 razvita nova različica IP (IPv6), ki uporablja 128 bitov za naslov IP. Naslov IP, ki nas zanima, je tisti, ki sledi protokolu IPv4. Vidite ga lahko, da v ukazni poziv vnesete ukaz (ipconfig + <Enter>), kot na sliki (Slika 11) v vrstici IPv4 Address.

```

C:\Windows\System32\cmd.exe

C:\HidModel\Template>ipconfig

Windows IP Configuration


Ethernet adapter Ethernet 2:

    Connection-specific DNS Suffix  . : Home
    IPv6 Address. . . . . : 2a00:ee2:f03:ce00:bc6d:cde7:8578:dee
    Temporary IPv6 Address. . . . . : 2a00:ee2:f03:ce00:e43c:93fc:2eb4:d3ab
    Link-local IPv6 Address . . . . . : fe80::bc6d:cde7:8578:dee%24
    IPv4 Address. . . . . : 192.168.1.106
    Subnet Mask . . . . . : 255.255.255.0
    Default Gateway . . . . . : fe80::666e:eaff:fe21:62d5%24
                               192.168.1.1


Ethernet adapter VirtualBox Host-Only Network #2:

    Connection-specific DNS Suffix  . :
    Link-local IPv6 Address . . . . . : fe80::9df8:f221:b652:f6b1%41
    IPv4 Address. . . . . : 192.168.56.1
    Subnet Mask . . . . . : 255.255.255.0
    Default Gateway . . . . . :


Wireless LAN adapter Wi-Fi 2:

    Media State . . . . . : Media disconnected
    Connection-specific DNS Suffix  . : Home
  
```

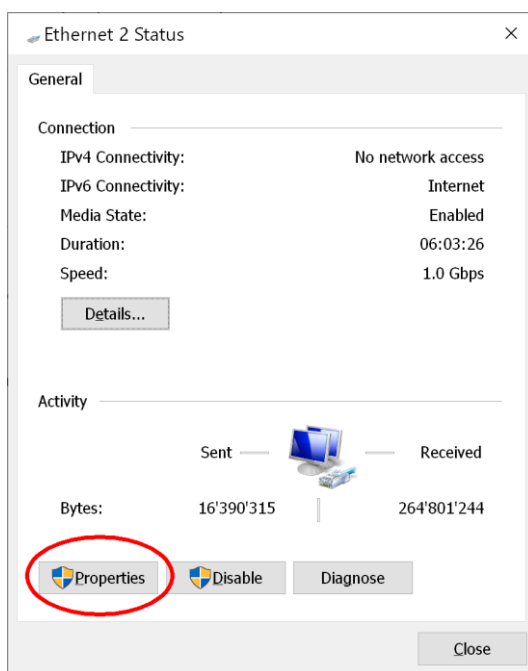
Slika 11: Ukazno okno z rezultati ukaza IPCONFIG za določeni računalnik.

Figure 11: Command window with the results of the IPCONFIG command for a specific computer.

V danem primeru je spremenljivka host1=192.168.1.106. Vrata nastavimo na Port=4004.

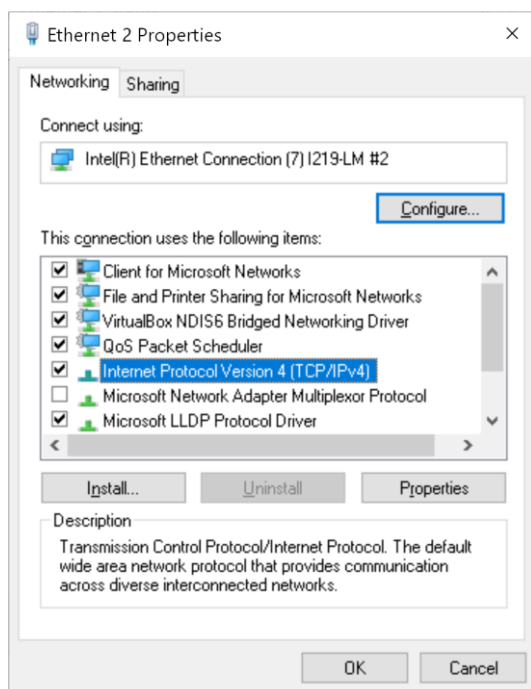
Lokalna omrežja običajno samodejno dodelijočasne naslove IP; to pomeni, da se lahko naslov našega računalnika spremeni ob vsakem ponovnem zagonu računalnika. Takšna nastavitev ni praktična, če moramo uporabiti različne računalnike za vzporedno računanje, saj je treba spremenljivi IP-naslov vsakič preveriti, prepisati in na novo vpisati v naš Clbrt.cmd program. To privzeto nastavitev lahko spremenimo tako, da dinamični IP spremenimo v statični naslov z naslednjimi koraki:

1. Odpremo File Explorer in se prestavimo s klikom na puščico, obrnjeno navzgor v izhodiščni položaj, da se nam pojavi ikona za omrežje »Network«. Z desno tipko miške kliknemo na ikono »Network« in izberemo lastnosti »Properties«. Ali pa v nadzorni plošči izberemo oziroma kliknemo na "Network and Sharing Center".
2. V »Access Type Connections:« kliknemo »Ethernet« na sliki (Slika 12).
3. V pogovornem oknu (Ethernet status) izberemo lastnosti »Properties« na sliki (Slika 12). V lastnostih "Properties" Ethernet izberemo zavihek omrežje "Network", nato izberemo »Internetni protokol različice 4 (TCP / IPv4) in kliknemo na lastnosti "Properties", kot na sliki (Slika 13).
4. Na zavihku splošno "General" prekličemo izbiro "Obtain an IP automatically" in izberemo »Uporabi naslednji naslov IP« " Use the following IP address:" Vnesemo številke IPv4 naslova, ki smo ga prepoznali z ukazom (ipconfig) v sliki (Slika 11). Paziti moramo, da noben drugi statični naslov IP v našem omrežju nima iste številke. Pritisnimo OK in nato OK (Slika 13, Slika 14).



Slika 12: Središče za omrežje in skupno rabo.

Figure 12: Network and Sharing Center.



Slika 13: Nastavitve ethernet omrežja.

Figure 13: Ethernet settings.

Slika 14: Nastavitve IP-naslova.

Figure 14: IP address settings.

Seveda je treba zgornje postopke dodelitve statičnih naslovov smiselno dodeliti vsem računalnikom, ki jih nameravamo uporabiti v procesih umerjanja in optimizacij s PEST_HP.

Naslednji korak v programu Clbrt.cmd je, da kreiramo enega managerja »Manager« in več agentov »Agents«. To je narejeno z uporabo zanke v naslednjem programskem izvlečku (Priloga A) s sistemskim ukazom (ROBOCOPY):

>>>

```

:: Create directories and copy Template\ for PEST_HP as Manager\
:: and the Agents\ to run in.
::
ROBOCOPY Template Manager /MIR >NUL
FOR /L %i IN (1,1,%np%) DO (
    ROBOCOPY Template Agent%i /MIR >NUL
)
<<<

```

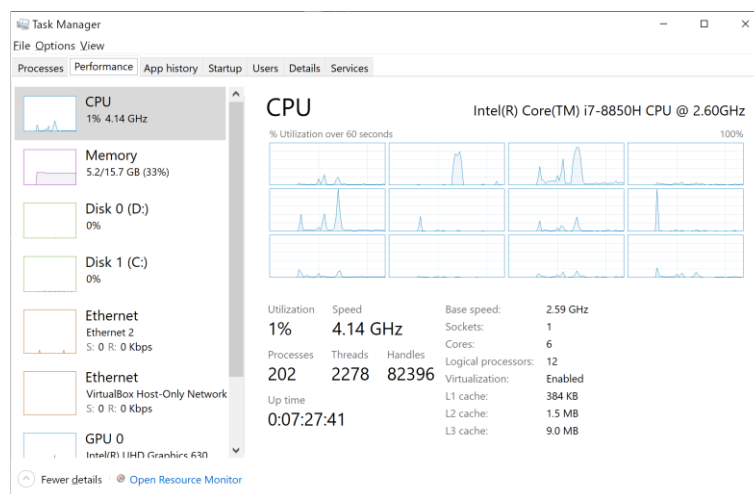
ROBOCOPY je poimenovana robustna kopija datotek "Robust File Copy for Windows". Je program iz ukazne vrstice za podvajanje "replication" datotek in/ali map ter celo podatkovnih enot iz ene lokacije na drugo. Ta ukaz funkcionalno nadomešča XCOPY, a z več možnostmi. XCOPY je poznan še iz časov Microsoftovega operacijskega sistema MS-DOS.

Ukaz (ROBOCOPY) z izbiro /MIR prezrcali vse podmape \Template (tudi prazne) v mapo imenovano \Manager in še v mape agentov \Agents_i. ROBOCOPY prekopira čisto vse datoteke in »Jocker znakov« *. * ni treba pisati.

Primer, da hočemo prepisati (zrcaliti) mapo \Template v \Manager v oddaljeno omrežje prek vzpostavljene povezave VPN na strežnik z imenom KSHSRV v mapo \Shared bi pisali:

```
ROBOCOPY Template \\KSHSRV\Shared\Manager /MIR
```

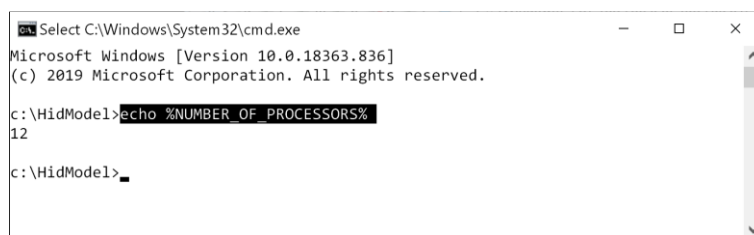
Za procesiranje s PEST_HP kreiramo toliko agentov, kolikor imamo na razpolago procesorske moči. Kar ugotovimo v upravitelju opravil "Task Manager", do katerega pridemo s pritiskom (Ctrl+Alt+Del) sliki (Slika 15). Podamo vrednost spremenljivke »np«, ki je število logičnih procesorjev minus dva, ker bomo dodali enega agenta, da dela v mapi \Manager. Na sliki (Slika 15) imamo 12 logičnih procesorjev, torej bomo lahko polno izkoristili managerja in 11 agentov. Vsak agent dela na svojem delovišču oziroma v svojem okolju.



Slika 15: Upravitelj opravil prikaže število logičnih procesorjev.

Figure 15: Task Manager displays the number of logical processors.

Število logičnih procesorjev hitro ugotovimo z izpisom sistemske spremenljivke %NUMBER_OF_PROCESSORS%, da odtipkamo ukaz Echo, kot je prikazano na sliki (Slika 16):

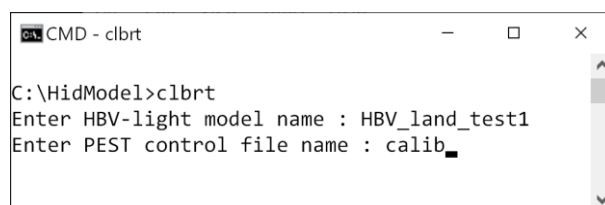


Slika 16: Prikaz števila logičnih procesorjev v ukaznem oknu.

Figure 16: Display the number of logical processors in the command window.

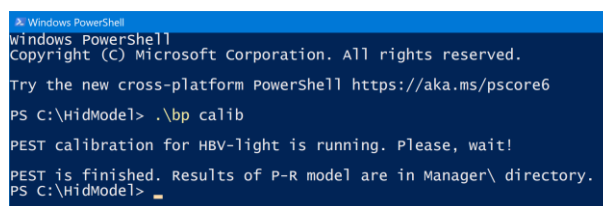
PEST_HP predstavljen v prispevku, ki je izšel v reviji Ground Water [79]. V nasprotju z običajnim vzporednim PEST-om je agent PEST_HP-ja "pameten", saj naredi več kot samo preprost zagon modela, če mu to ukaže manager oziroma glavni del programa PEST. Agent in ne manager, kot pri običajnem vzporednem PEST-u, piše vhodne in bere izhodne datoteke modela. To pomeni, da managerju ni treba pisati vhodnih datotek v delovni imenik agentov. Takšno početje bi zasedalo omrežje. Managerju tudi ni treba brati izhodnih datotek modela iz tega imenika. Dejansko managerju PEST-a sploh ni treba vedeti, kje je delovni imenik agenta. To je podobno kot delo v oblaku, ko pridobimo računalniško moč in to brez svojega neposrednega aktivnega upravljanja. Pred zagonom modela agent prejema od PEST-a nabor parametrov, ki jih mora uporabiti za določen izračun modela. Ko je izvedba naloge izračuna modela agenta končana, agent sam pošlje managerju rezultate modela. Modelno vhodno in izhodno komunikacijo upravljajo »pošteni« agenti. Komunikacija med PEST managerjem in njegovimi agenti je tako zmanjšana na najmanjšo možno mero. Potreba po branju in pisanju vhodnih in izhodnih datotek modela je odpravljena. Za pisanje vhodnih datotek modela in branje izhodnih datotek modela mora imeti agent PEST_HP dostop do datotek z navodili (pif) in datotek s predlogami parametrov (ptf). Imena teh pridobi tako, da prebere nadzorno datoteko PEST, tako kot to stori tudi manager. V večini primerov mora biti imenik, iz katerega deluje vsak agent, kopija imenika iz katerega bi deloval PEST, če bi serijsko umerjal sam model. Ravno to smo pa implementirali na način, da smo mapo \Template prepisali oziroma zrcalili vsem agentom \Agents_i z ukazom ROBOCOPY.

Izvajanje programa Clbrt.cmd poženemo iz ukazne vrstice (com ali powershell) v mapi ..\Hidmodel z ukazom (Clbrt) in (Enter). V tem primeru nas program vpraša po imenu nadzorne PEST-ove datoteke (Slika 17). Vnesemo samo ime PEST nadzorne datoteke, brez končnice in pritisnemo (Enter). Druga možnost pa je, da podamo ukaz (Clbrt ime_model ime_pcf) in (Enter). Program se začne izvajati, ne da nas program, kaj vpraša. Ta druga možnost nam omogoča, da lahko program (Clbrt) poljubno kombiniramo s klici iz drugih »batch« programov (Slika 17 in Slika 18).



Slika 17: Zagon programa Clbrt.cmd iz ukazne vrstice.

Figure 17: Run Clbrt.cmd from CLI.



```

Windows PowerShell
Copyright (C) Microsoft Corporation. All rights reserved.

Try the new cross-platform PowerShell https://aka.ms/pscore6

PS C:\HidModel> .\bp calib

PEST calibration for HBV-light is running. Please, wait!

PEST is finished. Results of P-R model are in Manager\ directory.
PS C:\HidModel>

```

Slika 18: Zagon umerjanja iz Windows PowerShell-a.

Figure 18: Calibration Run from Windows PowerShell.

Ko so mape prepisane, prezrcaljene oziroma je podatkovna osnova pripravljena, potem v teh mapah s PEST_HP-om »zaposlimo« agente in v »glavni zgradbi« poleg managerja zaposlimo še enega agenta. To je prikazano v izvlečku naslednje kode iz priloge (Priloga A):

```

>>>
SET /A np=%NUMBER_OF_PROCESSORS%-2
SET method=pest_hp_mkl & :: Run GML
SET host1=%computername%
SET port1=4004

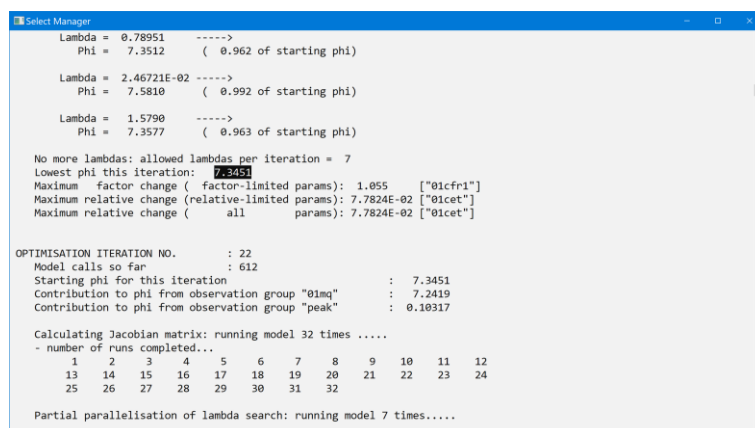
:: Start %method% manager in new command Window in %model%\ directory. /hpstart
START "%model%" /D"%CD%\%model%" /REALTIME %method% %pcf% /h :%port1%

:: Start loop from 1 to %np% PEST_HP agents in new hidden Cmd_Window in Agents\
directories.
FOR /L %i IN (1,1,%np%) DO (
    START "Agents" /D"%CD%\Agent%i" /MIN /REALTIME agent_hp %pcf% /h
    %host1%:%port1%
)
:: Start one %method% agent in %model%\ directory.
START "Agents" /D"%CD%\%model%" /MIN /REALTIME /WAIT agent_hp %pcf% /h
%host1%:%port1%
<<<

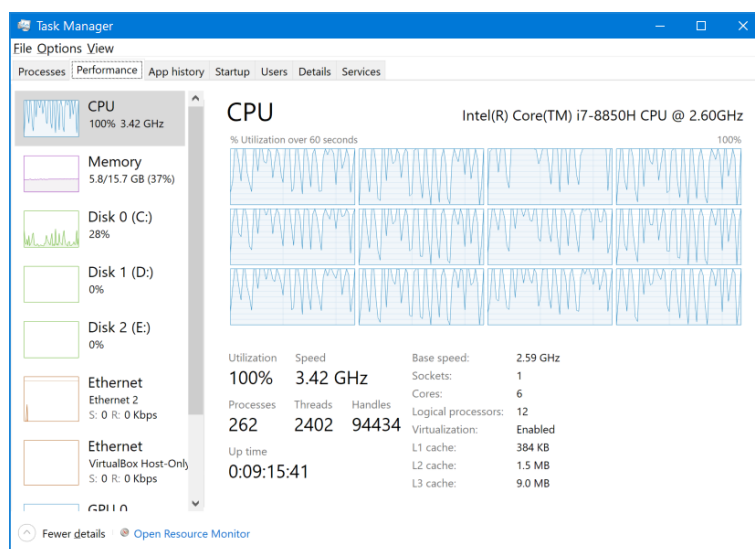
```

Med izvajanjem se rezultati izpisujejo na ekranu (Slika 19). Na zaslonu lahko spremljamo, kako napreduje umerjanje, koliko in kako hitro se zmanjšuje parameter phi. Če gre izpisovanje prehitro, lahko program zaustavimo s klikom miško na aktivno okno. Kliknemo na okno Manager. Izvajanje programa se v tem oknu zaustavi in potem lahko rezultate preberemo ter po potrebi zabeležimo. Potem lahko spet nadaljujemo s pritiskom na desno tipko ali na tipkovnici s tipko (Enter). To je koristno, ko program nekaj računa dlje časa, mi pa ne vidimo dobro, kaj se dogaja oziroma kako napreduje izračun.

Na sliki (Slika 20) je prikazan popolni izkoristek procesorske moči med izvajanjem vzporednega procesiranja PEST.



Slika 19: Sledenje postopka umerjanja s PEST-om.

Figure 19: Tracking the PEST calibration process.

Slika 20: Uporaba CPU-ja med vzporednim računanjem PEST-a.

Figure 20: CPU utilization during PEST parallel computing.

Nash-Sutcliffe modelska učinkovitost

Nash-Sutcliffe koeficient učinkovitosti modela (*NSE*) je največkrat uporabljan za oceno učinkovitosti hidroloških modelov. *NSE* je opredeljen po enačbi (23) [21] kot:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}^t - Q_{sim}^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}^t - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (23)$$

kjer je Q_{obs}^t vrednost izmerjenih (opazovanih, angl. *observed*) pretokov v času t , Q_{sim}^t pa izračunan (simuliran oziroma modeliran, angl. *simulated or modelled*) pretok v času t . $\bar{Q}_{obs}$ je srednja vrednost pretokov opazovanega obdobja T [21].

Učinkovitost Nash-Sutcliffe se lahko giblje od $-\infty$ do 1. Učinkovitost 1 ($NSE = 1$) ustreza popolnemu ujemanju "Perfect fit" izračunanega pretoka z opazovanimi podatki. Učinkovitost 0 ($NSE = 0$) kaže, da so napovedi modela tako natančne kot povprečje opazovanih podatkov. V bistvu, bolj, kot je učinkovitost modela blizu 1, bolj natančen je model. Predlagane so bile mejne vrednosti, ki označujejo model zadostne kakovosti, med $0,5 < NSE < 0,65$. Načeloma velja, da bližje, ko je vrednosti *NSE* 1 večje,

je zaupanje v natančnost modela. Če so vhodni podatki dobri, lahko praktično dosežemo vrednosti NSE med 0.8 in 0.95 [55,56].

3 PRIMERI UMERJANJA MODELOV

Prvo potrebujemo oziroma moramo izbrati ustrezen hidrološki model, glede na prevladujoče hidrološke pojave, razpoložljive podatke in računalniške programe, ki jih imamo na voljo. Za nadaljnje delo smo izbrali HBV-light in pripravili podatke v skladu z navodili za delo s tem programom. Vsa navodila so zgledno opisana v Help-u, ki je del programa HBV-light.

S programom HBV-light smo izdelali več hidroloških modelov in jih umerjali s programskim orodjem PEST. Povezava med HBV-light in PEST je bila možna z dodatnimi programi, prikazanimi v prilogah A. Prvi primer umerjanja hidrološkega modela smo izdelali na testnem primeru, nato sta podana še dva primera iz prakse.

3.1 UMERJANJA TESTNEGA MODELA

3.1.1 Izbor osnovnega hidrološkega modela HBV-light

Za prikaz delovanja postopka umerjanja smo prevzeli prvega od obstoječih testnih primerov hidroloških modelov za HBV-light. Vsi podatki se nahajajo in so dostopni na spletnih straneh Univerze v Zürichu. Dostop do podatkov je prost, saj podatki služijo za vajo študentom. Privzeli smo jih na priporočilo prof. Jana Seiberta, ki skrbi za tečaj Hidrologije na Univerzi v Zürichu.

Povezava: <https://www.geo.uzh.ch/en/units/h2k/Services/HBV-Model/HBV-Download.html> v datoteki »HBV-light_data.zip«. Podatki so v stisnjeni ZIP datoteki in so kriptirani. Za dostop je treba od avtorja pridobiti geslo. Računalniški hidrološki model HBV-light se nahaja na istem naslovu kot podatki, stisnjena datoteka HBV-light.zip je kriptirana in za odklepanje ter razširitev je prav tako treba pridobiti geslo, ki pa je drugačno kot za odklepanje podatkov.

V datoteki HBV-light_data.zip se nahajajo testni hidrološki modeli primerov naslednjih porečij: HBV-Land\, Lookout\, Norrsjon\ in Vattholma\.

Za testni primer smo izbrali kar prvi primer porečja HBV-Land. Ta testni hidrološki model je primarni primer brez pod-porečij, eno višinsko cono in enim vegetacijskim pokrovom. Model vsebuje 16 parametrov. To je dovolj parametrov, ki jih moramo umeriti, da je primeren za ponazoritev osnovnih postopkov umerjanja s PEST. Testni primer je izdelan tako, da je namesto meritev pretokov upoštevan izračun pretokov z vhodnimi podatki z vnaprej znanimi parametri. Naloga študentov je z umerjanjem testnega primera, pri katerem je predhodni izračun upoštevan kot meritev, določiti parametre, katerih točna vrednost je znana. Na testnem primeru smo primerjali rezultate umerjanja z orodjem PEST in enake postopke priprave za umerjanje, kot jih uporabljajo študentje za rešitev naloge [80].

3.1.2 Postopek predpriprave modela HBV-light za PEST

Za uporabo umerjanja hidrološkega modela z zunanjim programom, kot je PEST, moramo podatke oziroma lokacije datotek primerno organizirati. V HBV-Land se nahajati dve mapi s podatki z imenom Data\ in Results\. Za modeliranje s PEST-om naredimo na disku mapo HidModel\ in v njej podmapo Template\ in vanjo prekopiramo mapo \Data iz modela HBV-Land z vsemi podatki. V bistvu smo kreirali hidrološki model z imenom Template. Mape \Results\ nam ni potrebno kreirati. Mapa Results\ se bo v mapi Template\ ustvarila samodejno ob prvem zagonu programa HBV-light. V mapi

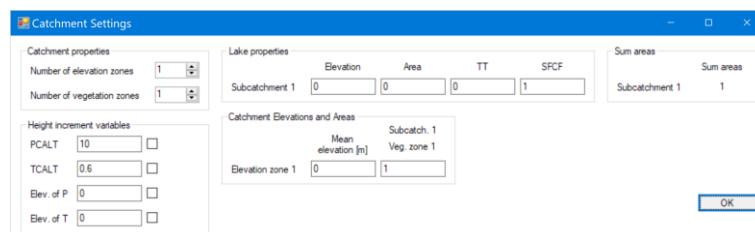
.. \Template\Data se, tako nahajaj pet originalnih datotek podanih v naslednji preglednici (Preglednica 4).

Preglednica 4: Originalne datoteke modela HBV-Land v mapi . \Data\.

Table 4: Original files for the HBV-Land model in the folder . \Data\.

Številka	Ime	Velikost	Datum
I.	clarea.xml	596	20.03.2017 14:24
II.	EVAP.txt	78	20.11.1996 12:31
III.	ptq.txt	93'721	24.10.2018 15:26
IV.	Simulation.xml	1'231	2.02.2011 18:41
V.	T_MEAN.txt	164	20.11.1996 12:29

- I. Datoteka **Clarea.xml** je XML datoteka, v kateri so zapisane vrednosti nastavitve in razdelitve modela prikazane v sliki »Catchment Settings« (Slika 21). Na sliki vidimo, da je HBV-Land enostaven in da ima testni primer HBV-Land eno samo podporečje in eno višinsko cono s povprečno višino nič ter eno vegetacijsko cono.



Slika 21: Nastavitev delne distribucije hidrološkega modela HBV-Land.

Figure 21: Setting up the semi-distribution of the HBV-Land hydrological model.

PCALT (% / 100 m) in *TCALT* (°C / 100 m) določata, kako naj se vrednosti padavin in temperature popravijo z nadmorsko višino, medtem ko 'Elev. od P' in 'Elev. od T' navajata referenčno višino vhodnih podatkov padavin). *TCALT* (°C / 100 m) določa, kako naj se vrednosti padavin in temperature popravijo z nadmorsko višino, medtem ko 'Elev. od P' in 'Elev. od T' navajata referenčno višino vhodnih podatkov padavin in temperature. V HBV-Land so te vrednosti iz slike (Slika 21) zapisane v datoteki "Clarea.xml".

Izpis Clarea.xml delne distribucijske datoteke:

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<Catchment xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
  <VegetationZoneCount>1</VegetationZoneCount>
  <ElevationZoneHeight>
    <double>0</double>
  </ElevationZoneHeight>
  <SubCatchment>
    <VegetationZone>
```

```

<EVU xsi:type="Basic_EVU">
  <Area>1</Area>
</EVU>
</VegetationZone>
<Lake>
  <Area>0</Area>
  <Elevation>0</Elevation>
  <TT>0</TT>
  <SFCF>1</SFCF>
</Lake>
<AbsoluteArea>0</AbsoluteArea>
</SubCatchment>
</Catchment>

```

- II. **EVAP.txt** je datoteka s podatki izhlapevanja in vsebuje vrednosti za potencialno izhlapevanje ($\text{mm}/\Delta t$) in v testnem primeru vsebuje 12 vrednosti. To so dolgoročne mesečne srednje vrednosti izhlapevanja (mm/dan) (Preglednica 5).

Preglednica 5: Izpisek datoteke evapotranspiracije **EVAP.txt**.

Table 5: The EVAP.txt evapotranspiration file.

Nopex_evap
0.05
0.14
0.46
1.5
3.01
4.15
3.66
2.72
1.42
0.43
0.03
0

- III. Datoteka **PTQ.txt** vsebuje časovne vrste padavin ($\text{mm}/\Delta t$), temperaturo ($^{\circ}\text{C}$) in odtok ($\text{mm}/\Delta t$). Če je porečje sestavljeno iz več kot enega podporečja, je treba za vsako podporečje določiti ločen niz. Časovne vrste so lahko na dnevni osnovi, na urni ali v katerem koli drugem časovnem intervalu, dokler je časovni interval enak časovnemu nizu. Za umerjanje je v HBV-Land časovno obdobje 4017 dni.

Preglednica 6 je datoteka **PTQ.txt** zaradi svoje dolžine prikazana samo na v začetku in na koncu, ostali del je izrezan. Model z urnim korakom enega leta ima $365 \cdot 24 = 8760$ vrstic in toliko je tudi dolg PTQ enoletni podatkovni niz.

Preglednica 6: Datoteka PTQ.txt.

Table 6: PTQ.txt file.

HBV-Land			
date	Precipitation	Temp	Q _{obs}
19810101	0	-1	0
19810102	25.7	-3.6	0.01
19810103	20.6	-8	0.01
~	~	~	~
19911229	0	2	0.7
19911230	0.9	1	0.76
19911231	5	-4.2	0.71

IV. Datoteka **Simulation.xml** je datoteka krmilnika poteka izračunov HBV-light, ki nastavi generalne nastavitve in modelno strukturo. Za modelno strukturo smo izbrali standardno verzijo "Standard version" z uporabo *UZL* in *K0* v *rezervoarju SUZ* (Slika 23) ter osnovni model "Basic Model". Izbrane vrednosti so prikazane v sliki modelnih nastavitvev »Model Settings« (Slika 22). Za računsko obdobje smo izbrali za začetek ogrevanja modela 1. 1. 1981 in za začetek simulacije 1. 10. 1981, ki se konča z 31. 12. 1991. To znaša preračunano 3744 dni simulacije oziroma model obravnava neprekinjeno računsko obdobje 10,3 leta.

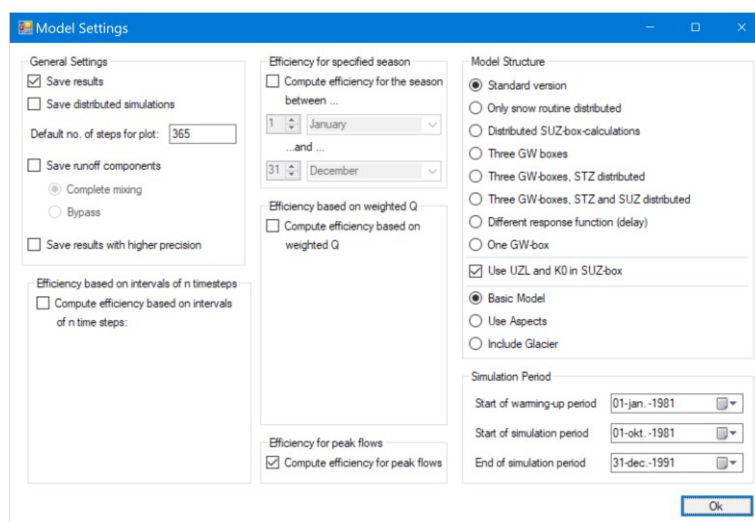
Izpis datoteke Simulation.xml modela HBV-Land:

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<Simulation xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
  <ModelType>Standard</ModelType>
  <ModelVariant>Basic</ModelVariant>
  <StartOfWarmingUpPeriod>1981-01-01T00:00:00</StartOfWarmingUpPeriod>
  <StartOfSimulationPeriod>1981-10-01T00:00:00</StartOfSimulationPeriod>
  <EndOfSimulationPeriod>1991-12-31T00:00:00</EndOfSimulationPeriod>
  <SaveResults>true</SaveResults>
  <SaveDistributedSimulations>false</SaveDistributedSimulations>
  <SaveResultsWithHighPrecision>false</SaveResultsWithHighPrecision>
  <ComputeReffInterval>false</ComputeReffInterval>
  <ComputeReffPeak>true</ComputeReffPeak>
  <ComputeReffSeason>false</ComputeReffSeason>
  <ComputeReffWeightedQ>false</ComputeReffWeightedQ>
  <SeasonalReffStartDay>1</SeasonalReffStartDay>
```

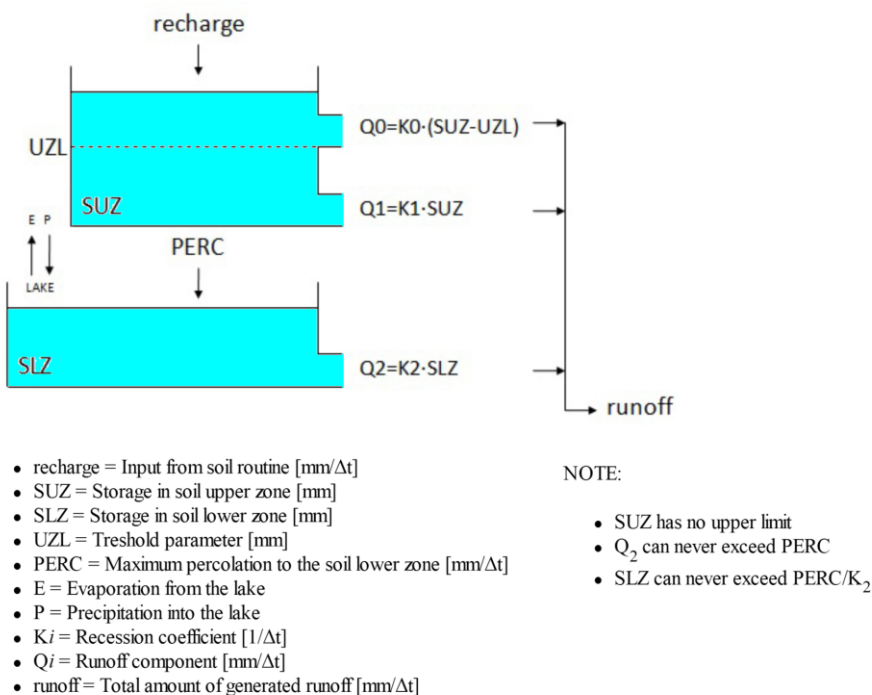
```

<SeasonalReffEndDay>31</SeasonalReffEndDay>
<SeasonalReffStartMonth>January</SeasonalReffStartMonth>
<SeasonalReffEndMonth>December</SeasonalReffEndMonth>
<ReffInterval>
  <ReffInterval>
    <TimeStep>7</TimeStep>
  </ReffInterval>
  <ReffInterval>
    <TimeStep>15</TimeStep>
  </ReffInterval>
</ReffInterval>
<PlotPeriod>365</PlotPeriod>
<UseOldSUZ>true</UseOldSUZ>
<SaveRunoffComponents>false</SaveRunoffComponents>
<Mixing>CompleteMixing</Mixing>
<ReffWeights />
</Simulation>

```



Slika 22: Modelne nastavitve hidrološkega modela HBV-Land.
Figure 22: Model settings of the HBV-Land hydrological model.



Slika 23: Uporaba UZL in K0 v rezervoarju SUZ.
Figure 23: Use of UZL and K0 in the SUZ reservoir.

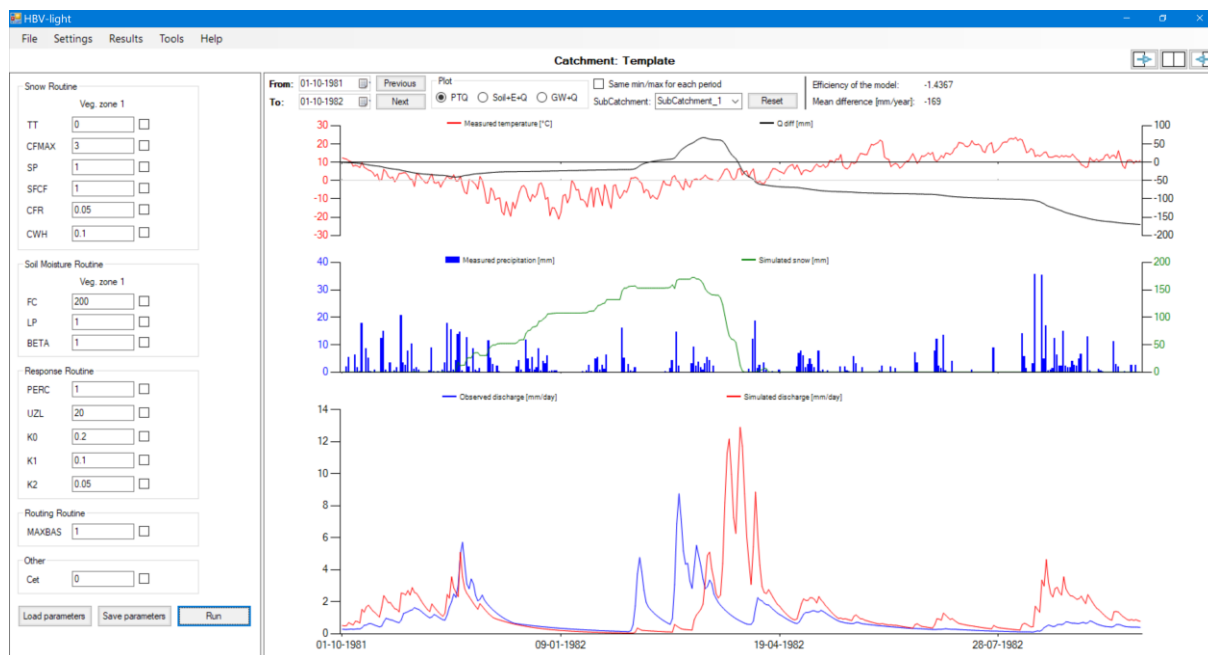
- V. Datoteka **T_MEAN.txt** ni obvezna. Dolgoročno povprečje potencialnega izhlapevanja za določen dan v letu se popravi na njegovo vrednost na dan z uporabo odstopanj temperature od njegove dolgoročne srednje vrednosti in korekcijskega faktorja CET. Datoteka »srednja temperatura« vsebuje dolgoročne srednje vrednosti za temperaturo (°C) in vsebuje 12 vrednosti dolgoročne mesečne srednje vrednosti (Preglednica 7).

Preglednica 7: Datoteka T_MEAN.txt.
Table 7: File T_MEAN.txt.

Medeltemp (Härnevi, Gränvad, Akesta, Sösätra)
−4.66101
−4.18881
−0.55231
4.113548
10.97489
14.11158
16.83401
15.11313
10.44769
6.41085
1.062845
−3.07723

Ko imamo pripravljene podatke, lahko zaženemo grafično verzijo programa HBV-light-GUI.exe, z ukazom "Browse" izberemo mapo ..\HidModel\Template\ in poženemo namenski program s klikom

na okence z ukazom Run. Dobimo rezultat na sliki (Slika 24). Takoj vidimo, da model še ni umerjen, ker sta osnovni črti modra in rdeča na grafu odtokov zelo različno oblikovani in zamaknjeni. Modelska učinkovitost, prikazana z Nash-Sutcliffe-ovim koeficientom, je zelo slaba. Vrednost za $NSE = -1.4367$. Model se izračuna s pred nastavljenimi začetnimi vrednostmi parametrov programa, ki jih samodejno shrani v datoteko ..\Data\Parameter.xml.



Slika 24: Osnovna zaslonka slika neumerjenega modela HBV-Land.

Figure 24: Basic screen picture of the uncalibrated model HBV-Land.

Ko pogledamo v mapo ..\Template\ vidimo, da se mapa ..\Results\ ni kreirala. To moramo nastaviti v programu HBV-light-GUI v ukazih (Settings\Model Settings). Odkljukamo (Save Results) in (Compute efficiency for peak flows). Vse ostalo lahko pustimo tako kot je originalno pred nastavljenjo. Spet zaženemo HBV-light-GUI.exe z Run ukazom. V mapi ..\HidModel\Template\ se je pojavila nova mapa ..\HidModel\Template\Results\ in v njej se zdaj nahajajo sledeče datoteke iz preglednice (Preglednica 8).

Preglednica 8: Originalne datoteke mape ..\Results\ modela HBV-Land.

Table 8: Original files in folder ..\Results\ for the HBV-Land model.

Ime	Velikost	Datum
Peaks.txt	912	24.07.2019 19:48
Results.txt	324'631	24.07.2019 19:48
Summary.txt	1'085	24.07.2019 19:48

Ko pogledamo datoteko Peaks.txt, vidimo, da se vrhovi visokovodnih konic v preglednici (Preglednica 9), zelo razlikujejo. V preglednici je to prikazano s potemljenimi celicami. To je razvidno tudi v sliki (Slika 24), da se izračunane konice (rdeča) ne prekrivajo oziroma ne ujemajo z izmerjenimi (modra).

Preglednica 9: Prikaz izmerjenih in izračunanih visokovodnih konic
neumerjenega primera HBV-Land v datoteki Peaks.txt.

Table 9: The representation of the measured (observed) and calculated(simulated)
high-water peaks of the uncalibrated HBV-Land model in the file Peaks.txt.

Date_Q _{obs}	Q _{obs}	Date_Q _{sim}	Q _{sim}
~	~	~	~
19820304	8.749	19820302	0.576390306
19821129	4.054	19821128	6.757575779
~	~	~	~
19850328	10.685	19850327	3.749338253
19850503	3.635	19850501	5.972185394
~	~	~	~

Opomba: okrajšava »sim« (simulated) pomeni izračunano in »obs«(observed) pomeni izmerjeno.

V mapi ..\Template\Data\ se je obenem pojavila nova datoteka Parameter.xml in spremenjena datoteka Simulation.xml, zaradi odkljukanih (Save Results) in (Compute efficiency for peak flows).

Modelska učinkovitost "Model efficiency" $NSE = -1.437$ je prikazana v preglednici (Preglednica 10), kar pomeni, da je učinkovitost modela zelo slaba.

Preglednica 10: Summary.txt prikazuje rezultat modelske učinkovitosti
neumerjenega primera HBV-Land (SubCatchment1) v HBV-light.

Table 10: Summary.txt shows the result of the model efficiency of
an uncalibrated HBV-Land (SubCatchment1).

Template	SubCatchment_1
Water Balance (mm/year):	
Sum Qsim	464.473047
Sum Qobs	295.567719
Sum Precipitation	732.6224626
Sum AET	262.3952803
Sum PET	525.2479221
Contribution of Q0	0.06426021
Contribution of Q1	0.416597332
Contribution of Q2	0.519142458
Goodness of fit:	
Coefficient of determination	0.202211143

se nadaljuje...

...nadaljevanje

Model efficiency	-1.436706978
Kling-Gupta efficiency	0.015480468
Efficiency for log(Q)	-0.401129621
Flow weighted efficiency	-0.261364855
Mean difference	-168.9053279
Efficiency for peak flows	-2.614141654
Volume Error	0.428539326
MARE Measure	-0.124556821
Lindstrom Measure	-1.493853046
Spearman Rank	0.592118227

Sedaj imamo v HBV-light pripravljen delujoč model, ki ga potrebujemo pri postopkih za povezovanje s PEST-om. Ta model vidimo, da še ni umerjen.

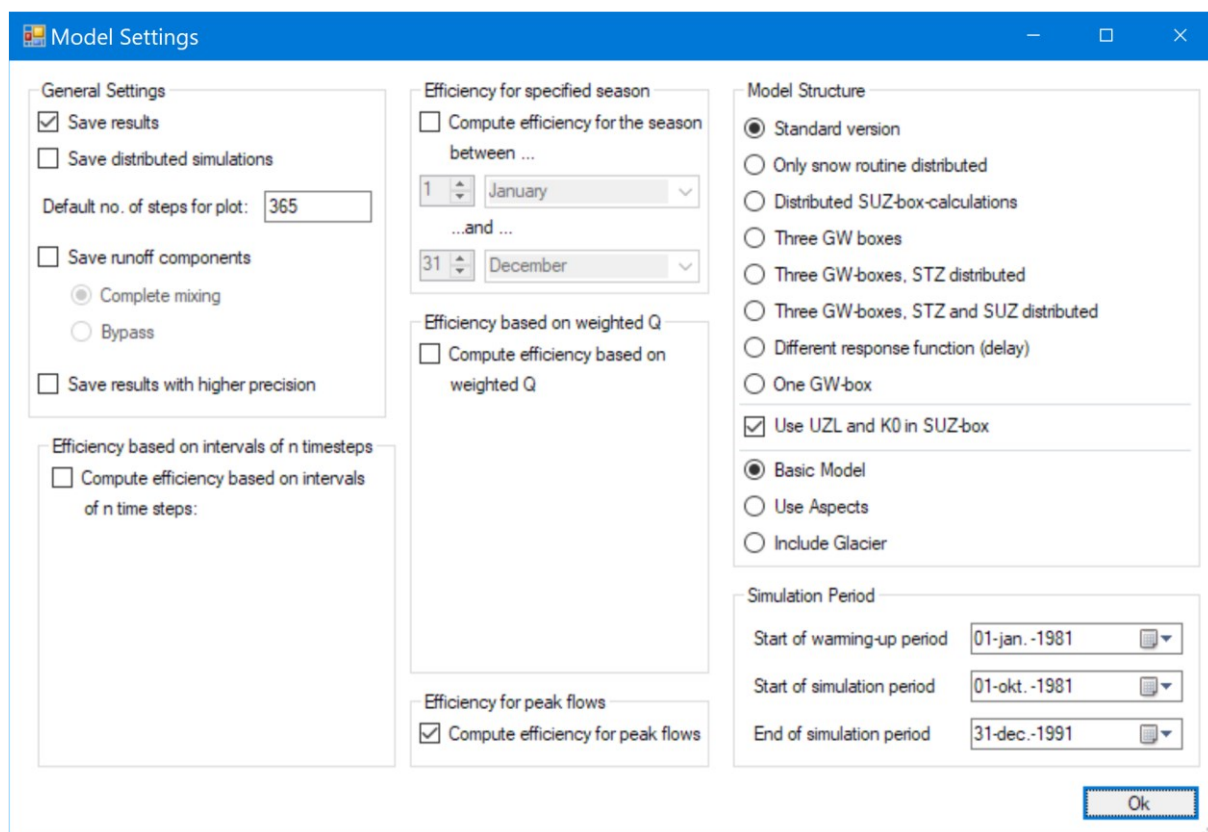
3.1.3 Vzpostavitev povezovanja PEST-a s HBV-light

Osnovni princip povezovanja nadaljujemo na primeru HBV-Land. Za samodejno programsko vodenje izračuna hidrološkega modela HBV-light v procesu umerjanja s PEST orodij moramo izvesti določene povezovalne postopke oziroma pripraviti potrebne povezovalno nadzorne datoteke. V mapo `..\Template\` bomo vnesli predložne, povezovalne in nadzorne datoteke PEST, kot je prikazano na sliki (Slika 9) [80].

3.1.3.1 Priprava nadzorne datoteke (PCF)

Najprej moramo kreirati nadzorno datoteko za PEST (PEST Control File - PCF) s končnico `.pst` (Slika 9). PEST nadzorna datoteka, kot ime pove, kontrolira oziroma nadzira procese s tem, da podaja navodila, funkcije in informacije PEST-u, kaj naj stori. Poimenovali jo bomo `Calib.pst` in vanjo, takšno, kot je na preglednici (Preglednica 1), bomo vpisali vrednosti parametrov, ki so detajlno podani v prilogah (Priloga E) in (Priloga F). Z nadzorno datoteko PEST se je treba dobro spoznati. Treba se je zavedati, da napačno ali slabo podana vrednost nadzornega parametra daje slabe rezultate umerjanja. Tu tudi nastopijo ekspertne izkušnje, pridobljene čez čas in skozi delo z orodji PEST. V prilogi (Priloga F) je detajlno in posebej opisan v stolpcu »Opis« vsak kontrolni PEST-ov parameter.

V sklop (* observation data) v `Calib.pst` vpišemo vse opazovane podatke Q_{obs} , ki se nahajajo v datoteki `Results.txt` oziroma v vhodni podatkovni datoteki `PTQ` za čas umerjevalnega obdobja. Podatkovna datoteka `PTQ` se nahaja v mapi `..\Data\ptq.txt`. Vzamemo samo merjene podatke od začetka simulacijskega obdobja »Start of simulation period«, ki je definiran v HBV-light (GUI) v Model Settings. V našem primeru HBV-Land od datuma 1. 10. 1981 (Slika 25).



Slika 25: Nastavitve »Model Settings« HBV-Land.

Figure 25: "Model Settings" HBV-Land.

Podobno nadaljujemo za podatke Peak, ki se nahajajo v datoteki `..\Template\Results\Peaks.txt` v polju Q_{obs} .

V tem primeru imamo tako 3765 NOBS - število opazovanih vrednosti in to 3744 za Q_{obs} in 21 visokih konic Q_{obs} . Visoke konice izračuna HBV-light po svojih merilih. Datoteka visokih konic odtoka vsebuje datum in merjeni pretok Q_{obs} . Vrh je definiran kot podatkovna točka z vrednostjo Q_{obs} , ki je najmanj trikratna povprečna vrednost Q_{obs} . Poleg tega ima najvišja vrednost najvišjo vrednost Q_{obs} v časovnem oknu 15 dni. Ta omejitev 15 dni velja tudi, če delamo z urnimi vrednostmi.

Zelo pomemben je nadzorni sklop (* parameter data) v katerem definiramo robne pogoje parametrov za začetno vrednost parametra, spodnjo mejo parametra, zgornjo mejo parametra in ime skupine parametra. Ime parametra PARNME je lahko dolgo 12 znakov ali manj. Ker HBV-light računa tudi z več podporečji je primerno imena parametrov številčiti s številko podporečja. V našem primeru HBV-Land imamo že omenjeno samo eno porečje, in to označimo z 01. Na primer 01PERC je ime parametra PERC v prvem podporečju. Priporočene vrednosti robnih pogojev se nahajajo v pregledu parametrov HBV-light v prilogi (Priloga F). V našem primeru HBV-Land umerjamo 16 parametrov.

Ko pripravimo datoteko `Calib.pst`, jo preverimo s programom `PESTCHEK.exe`. `PESTCHEK` je vedno zelo v pomoč pri iskanju napake sintakse ali človeških napak. Ukazi za `PESTCHEK` kot tudi za `TEMPCHEK` in `INSCHEK` so enaki, to je `pestchek pest_control_file_name`.

Opozoriti je treba, da vsak od teh pripomočkov preveri eno napako naenkrat. Zato morate po popravku ene napake znova zagnati program za preverjanje. Z drugimi besedami, za eno datoteko (datoteko

predloge ali nadzorno datoteko) morate znova in znova zagnati pripomoček za preverjanje, dokler več ne pokaže nobenih napak.

V ukazni vrstici v mapi `..\Template\` podamo ukaz `..\HidModel\Template>pestchek calib` in dobimo izpisano:

```
>>>
C:\HidModel\Template>pestchek calib
PESTCHEK Version 16.0. Watermark Numerical Computing.
Errors ----->
No errors encountered.
Warnings ----->
NOPTMAX provided as zero. No optimisation iterations will be carried out;
  objective function and residuals will be recorded for initial parameter
  estimates only.
C:\HidModel\Template>
```

<<<
Če program »pestchek.exe« izpiše kakšne napake jih ustrezno popravimo. Pri opozorilu smo opozorjeni na določeno stanje vrednosti parametra v PEST nadzorni datoteki. V zgornjem primeru je *NOPTMAX*=0 in pomeni, da se bo program izvedel samo enkrat in ne v zanki. Parameter *NOPTMAX* pomeni največje število ponovitev računa (iteracij).

Ko je vse v redu oziroma ko program pestchek ne najde napak (No errors encountered) je Calib.pst PEST nadzorna datoteka uspešno pripravljena.

3.1.3.2 Priprava datoteke z navodili (PIF)

Izhodne datoteke modela se berejo z datotekami z navodili (PEST Instruction File - PIF). Datoteka z navodili v sliki (Slika 9) mora biti na voljo za vse izhodne datoteke modela, iz katerih je treba prebrati vsaj eno število. Navodila zagotavljajo usmerjeno gibanje naprej po izhodni datoteki modela. Navodila v datoteki z navodili obveščajo program, ki jih uporablja za pregledovanje izhodne datoteke modela s štetjem števil vrstic ali iskanjem odlomkov besedila ali kombinacijo obeh.

Pomembno je, da se podatki med programi prenašajo z največjo natančnostjo. Tako naj imajo številke v izhodnih datotekah vsaj šest ali več pomembnih števil. Če je le mogoče se, naj uporablja eksponentni zapis, kjer se število signifikantnih oziroma pomembnih števil takoj opazi (npr. 3.123456E-10).

Na to pripravimo datoteke za nadzorni sklop (* model input/output). Pripravili bomo dve datoteki z navodili (instruction files) za dve enakovredno opazovani skupini merjenih odtokov iz porečja in računanih visokih konic. V HBV-light sta to datoteki `..\HidModel\Template\Results\Peaks.txt` in `..\HidModel\Template\Results\Results.txt`. V PEST-u sta ti dve datoteki z navodili branja rezultatov HBV-light-a Peaks.ins in Results.ins. Ti dve datoteki vsebujeta zapise, ki povedo, kje se nahajajo vrednosti rezultatov v nadzornem sklopu (* observation groups) PEST nadzorne datoteke za opazovani grupi »01mQ« (Preglednica 11) in »peak« (Preglednica 12).

Preglednica 11: PEST navodilna datoteka za opazovano grupo »01mQ«.

Table 11: PEST Instruction File for the observed group "01mQ".

pif \$	
l2	(01mQ_1)17:22
l1	(01mQ_2)17:22
l1	(01mQ_3)17:22
~	~
l1	(01mQ_3742)17:22
l1	(01mQ_3743)17:22
l1	(01mQ_3744)17:22

Preglednica 12: PEST Instruction File for the observed group "peak".

Table 12: PEST navodilna datoteka za opazovano grupo »peak«.

pif \$	
l2	(peak_1)31:48
l1	(peak_2)31:48
l1	(peak_3)31:48
~	~
l1	(peak_19)31:48
l1	(peak_20)31:48
l1	(peak_21)31:48

V obeh preglednicah (Preglednica 11) in (Preglednica 12) je v drugem stolpcu definirana lokacija vrednosti spremenljivke. Na primer (peak_21)31:48 pomeni, da se vrednost za spremenljivko peak_21 beremo od začetka 31 stolpca do konca 48 stolpca zapisano v datoteki ..\HidModel\Template\Results\Peaks.txt.

Ko pripravimo datoteki Peaks.ins in Results.ins ju preverimo s programom INSCHEK.exe

V ukazni vrstici v mapi ..\Template\ podamo ukaz ..\HidModel\Template>inschek calib in dobimo izpisano:

```
>>>
```

```
C:\HidModel\Template>inschek Peaks.ins
```

```
INSCHEK Version 16.0. Watermark Numerical Computing.
```

```
Errors in file Peaks.ins ----->
```

```
No errors encountered.
```

```
21 observations identified in file Peaks.ins: these are listed in file Peaks.obf.
```

```
C:\HidModel\Template>inschek Results.ins
INSCHek Version 16.0. Watermark Numerical Computing.
Errors in file Results.ins ----->
No errors encountered.
3744 observations identified in file Results.ins: these are listed in file
Results.obf.
<<<
```

V primeru HBV-Land opazujemo dve skupini 01mQ (merjeni Q iz podporečja 01) in visoke konice (Peak). Datoteka Peaks.txt vsebuje kontrolni znak TAB (tabulator), ki ga moramo nadomestiti s presledki, da ohranimo stalno lokacijo zapisanih vrednosti. To lahko naredimo tako, da napišemo ustrezen program, ki spremeni tabulatorje v ustrezno število presledkov. Lahko pa to delo preprosto opravimo z zastojnim programom SFK z ukazom »DeTab«, ki je prikazan v prilogi (Priloga B).

3.1.3.3 Priprava datoteke podloge parametrov (PTF)

PEST pripravlja množico vrednosti parametrov, ki jih želi uporabiti model za določeni izračun. Edini način, da lahko model dostopa do teh vrednosti je, da jih prebere iz vhodnih datotek. Da to lahko stori, je treba pripraviti datoteko podloge parametrov (PEST Template File – PTF).

Preden PEST zažene model, spremeni nekatere številke na vhodnih datotekah modela (vrednosti parametrov), tako da so te številke v skladu s tistimi, ki jih želi program za upravljanje v tem posebnem postopku. Lokacije, kjer te številke so, na vhodnih datotekah modela (Slika 9), so označene na predlogi, ki jih pripravi uporabnik. Ena taka datoteka predloge je potrebna za vsako vhodno datoteko modela, na kateri so številke, ki zahtevajo prilagoditev. Vsak parameter je opremljen z imenom.

Za nadzorni sklop (* model input/output) pripravimo datoteko vhodnih podatkov v HBV-light oziroma datoteko podloge parametrov. Datoteko imenujmo Parameter.tpl (Preglednica 13).

Preglednica 13: Datoteka Parameter.tpl.

Table 13: Parameter.tpl file.

```
ptf #
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<Catchment xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
<CatchmentParameters>
<KSI>0.001</KSI>
<KGmin>0.05</KGmin>
<RangeKG>0.1</RangeKG>
<AG>0.1</AG>
<PERC>1</PERC>
<Alpha>0</Alpha>
<UZL>20</UZL>
<K0>0.2</K0>
<K1>0.1</K1>
<K2>0.05</K2>
<MAXBAS>1</MAXBAS>
<Cet>0</Cet>
<PCALT>10</PCALT>
<TCALT>0.6</TCALT>
<Pelev>0</Pelev>
<Telev>0</Telev>
<PART>0.5</PART>
```

se nadaljuje...

...nadaljevanje

```

<DELAY>1</DELAY>
</CatchmentParameters>
<VegetationZone>
<VegetationZoneParameters>
<TT>0</TT>
<CFMAX>3</CFMAX>
<SP>1</SP>
<SFCF>1</SFCF>
<CFR>0.05</CFR>
<CWH>0.1</CWH>
<CFGlacier>1</CFGlacier>
<CFSlope>1</CFSlope>
<FC>200</FC>
<LP>1</LP>
<BETA>1</BETA>
</VegetationZoneParameters>
</VegetationZone>
<SubCatchment>
<SubCatchmentParameters>
<KSI>0.001</KSI>
<KGmin>0.05</KGmin>
<RangeKG>0.1</RangeKG>
<AG>0.1</AG>
<PERC>#01PERC#</PERC>
<Alpha>0</Alpha>
<UZL>#01UZL#</UZL>
<K0>#01K0#</K0>
<K1>#01K1#</K1>
<K2>#01K2#</K2>
<MAXBAS>#01MXBS#</MAXBAS>
<Cet>#01CET#</Cet>
<PCALT>10</PCALT>
<TCALT>0.6</TCALT>
<Pelev>0</Pelev>
<Telev>0</Telev>
<PART>0.5</PART>
<DELAY>1</DELAY>
</SubCatchmentParameters>
<SubCatchmentVegetationZone>
<SubCatchmentVegetationZoneParameters>
<TT>#01TT1#</TT>
<CFMAX>#01CFM1#</CFMAX>
<SP>#01SP1#</SP>
<SFCF>#01SFC1#</SFCF>
<CFR>#01CFR1#</CFR>
<CWH>#01CWH1#</CWH>
<CFGlacier>1</CFGlacier>
<CFSlope>1</CFSlope>
<FC>#01FC1#</FC>
<LP>#01LP1#</LP>
<BETA>#01BET1#</BETA>
</SubCatchmentVegetationZoneParameters>
</SubCatchmentVegetationZone>
</SubCatchment>

```

</Catchment>

Parameter.tpl datoteka ima za osnovo datoteko ..\Tempate\Data\Parameter.xml modela HBV-Land, v kateri v prvi vrstici dodamo oznako ptf #, ki pomeni PEST template file. Znak, ki sledi preslednici # in je ločilo parametrov. Vseh 16 parametrov, ki so obenem podani tudi v PEST nadzorni Calib.pst v oddelku (* parameter groups) je poudarjeno z mastnim tiskom (Preglednica 1).

Kadar koli PEST zažene model, mora večkrat zapolniti Jacobijevo matriko ali rešiti inverzni problem, najprej vnese vrednosti parametrov v vhodne datoteke modela, na položaj, ki ga bere model.

V primeru HBV-Land imamo 16 umerjevalnih parametrov, ki so zapisani v PEST nadzorni datoteki in jih v Parameter.tpl označimo z # PARNME #. Na ta mesta bo PEST v procesu umerjanja vsakič vpisoval nove vrednosti parametrov.

PEST lahko zapiše samo parametre v vhodne tekstovne datoteke ASCII zapisa. Če model zahteva binarno vhodno datoteko, moramo napisati vmesni program, ki binarne podatke, prevede v ASCII obliko, ki jo pričakuje model. V našem primeru HBV-Land, kot že zapisano imamo ta pogoj zagotovljen z XML zapisom, ki je v tekstovnem zapisu.

Ko pripravimo datoteko Parameter.tpl, jo preverimo s programom TEMPTCHEK.exe.

V ukazni vrstici v mapi ..\Template\ podamo ukaz ..\HidModel\Template>**tempchek parameter.tpl** in dobimo izpisano:

```
>>>
C:\HidModel\Template>tempchek parameter.tpl
TEMPCHEK Version 16.0. Watermark Numerical Computing.
Errors in file parameter.tpl ----->
No errors encountered.
16 parameters identified in file parameter.tpl: these are listed in file
parameter.pmt.
C:\HidModel\Template>
<<<
```

V izpisu parameter.tmp tako dobimo 16 parametrov: 01perc, 01luzl, 01k0, 01k1, 01k2, 01mxbs, 01cet, 01ttl, 01cfm1, 01sp1, 01sfc1, 01cfr1, 01cwh1, 01fc1, 01lp1 in 01bet1. Ti parametri se morajo ujemati z imeni parametrov, ki so podani v Calib.pst PEST nadzorni datoteki v preglednici v oddelku 8 (* parameter data). Če program »tempchek.exe« izpiše kakšne napake jih ustrezno popravimo.

Zdaj imamo vse potrebne datoteke PCF, PIF in PTF (s končnicami .pst, .ins. in .tpl) za povezavo PEST in HBV-light. V mapi ..\Template\ Peaks.ins, Results.ins, Calib.pst in Parameter.tpl.

V to isto mapo vpišemo še programe *.cmd z ukazi:

DelP.cmd	... briše nepotrebne odvečne datoteke, ki jih ustvarja PEST (Priloga D)
Model.cmd	... požene HBV-light-CLI (Priloga B)
Regul.cmd	... izvede postopke uteževanja in regularizacije (Priloga C)

3.1.4 Postopki uteževanja in regularizacije

Ko smo pripravili vse potrebne datoteke Calib.pst, Peaks.ins, Results.ins in Parameter.tpl lahko začnemo s postopki umerjanja modela. Tako imamo predloge z definiranimi parametri PTF # (angl. template file, .tpl), navodila za iskanje opazovanih vrednosti PIF\$ (angl. instruction file, .ins) in nadzorna datoteko PCF (angl. control file, .pst). To prikazuje shema, ki upravlja celotni sistem (Slika 9).

Kadar je treba oceniti majhno število parametrov, ni treba vključiti regulacije v nadzorno datoteko PEST. Drugače z velikim številom več sto uporabimo regularizacijo ADDREG1 ali ADDREG2, ki poskrbi za izvedbo regularizacije. Pri zelo parametrizirani inverziji je mogoče uporabiti program ADDREG1 (ali ADDREG2) za hitro dodajanje „želene vrednosti“ Tihonove regulacije v nadzorno datoteko PEST. PEST se lahko nato zažene brez nadaljnje priprave vhodnih datotek. Po zaključku poteka PEST (ali samo eni ponovitvi poteka PEST, v katerem se izračuna Jacobijeva matrika) lahko uporabimo pripomoček SSSTAT, da dobimo celoten obseg statistike parametrov in opazovanj. IDENTPAR se lahko uporabi za izračun identifikacij parametrov; alternativno GENLINPRED se lahko uporabi za izračun identifikacij parametrov in relativnih zmanjšanj negotovosti parametrov. Z uporabo PREDUNC7 lahko dobimo linearno aproksimacijo kovariančne matrike posteriornih parametrov.

Če je treba izvesti inverzijo z učinkovito metodo SVD-assist, lahko uporabimo pripomoček SUPCALC za ugotovitev dimenzionalnosti prostora oziroma razpoznavnosti parametrov. Tako postavimo spodnjo mejo na število super-parametrov, ki jih je treba oceniti. SVDAPREP se lahko nato zažene za avtomatizacijo priprave vhodnih podatkovnih zbirk PEST za inverzijo s pomočjo SVD.

V mapi ..\Template\ iz ukazne vrstice poženemo program Regul.cmd z ukazom ..\HidModel\Template>regul

>>>

C:\HidModel\Template>regul

PEST Version 16.1. Watermark Numerical Computing.

PEST is running in parameter estimation mode.

PEST run record: case calib

(See file calib.rec for full details.)

Model command line:

Model.cmd

Running model

Running model 1 time....

Finished run!

Sum of squared weighted residuals (ie phi) = 6350.5

Contribution to phi from observation group "01mq" = 5922.6

Contribution to phi from observation group "peak" = 427.99

Optimisation complete: optimisation iteration limit of 0 realized.

Total model calls: 1

Recording run statistics

See file calib.rec for full run details.

See file calib.sen for parameter sensitivities.

See file calib.seo for observation sensitivities.

See file calib.res for residuals.

See file calib.svd for history of SVD process.

```

PARREP Version 16.1. Watermark Numerical Computing.
Reading parameter value file calib.par ----->
Data for 16 parameters read from file calib.par.
Reading file calib.pst and writing file calib1.pst ----->
File calib1.pst written ok.
PWTADJ1 version 16.1. Watermark Numerical Computing.
- reading PEST control file calib.pst for first time...
- file calib.pst read ok.
- reading PEST run record file calib.rec...
- file calib.rec read ok.
- re-reading file calib.pst and writing file calib1.pst...
- file calib.pst read ok.
- file calib1.pst written ok.
ADDREG1 version 16.1. Watermark Numerical Computing.
- file calib1.pst read ok.
- file calib2.pst written ok.
PESTCHEK Version 16.1. Watermark Numerical Computing.
Errors ----->
No errors encountered.
<<<

```

Izvedbo programa regul.cmd smo pognali več PEST programov in dobili smo dve novi datoteki Calib1.pst in Calib2.pst.

Datoteko Calib1.pst je izvedel program za uteževanje **>i64pwtadj1 calib calib1 1**. Določanje uteži je kompleksen problem. Večje vrednosti uteži dodelimo podatkom z manjšim meritvenim šumom. Vendar meritveni šum ni edini, ki ga pri tem upoštevamo. Upoštevati je treba "strukturni šum", ki izhaja iz neustreznosti modela. Strategije ponderiranja, ki lahko sprejmejo strukturni šum obravnava Doherty [20]. S programom, kot je PWTADJ1 se zagotovi, da je prispevek začetni ciljni funkciji vsake skupine približno enaki, 01mq in peak sta enakovredno vidni PEST-u.

V Calib1.pst se je tako izvedlo uteževanje in dobimo nove vrednosti za (*WEIGHT*) v oddelku 10 (* observation data) preglednice (Preglednica 14).

Preglednica 14: Datoteka Calib1.pst.

Table 14: Calib1.pst file.

observation data			
01mq_1	0.281	1.30E-02	01mq
01mq_2	0.272	1.30E-02	01mq
01mq_3	0.267	1.30E-02	01mq
~	~	~	~
01mq_3742	0.701	1.30E-02	01mq

01mq_3743	0.763	1.30E-02	01mq
01mq_3744	0.706	1.30E-02	01mq
peak_1	5.708	4.83E-02	peak

se nadaljuje...

...nadaljevanje

peak_2	4.76	4.83E-02	peak
peak_3	8.749	4.83E-02	peak
~	~	~	~
peak_19	2.482	4.83E-02	peak
peak_20	4.939	4.83E-02	peak
peak_21	2.83	4.83E-02	peak

Datoteko Calib2.pst je izvedel program za PEST kontrolo regularizacijskega postopka **>addreg1 calib1 calib2**. To, je zapisalo regularizacijske postopke v PEST nadzorno datoteko. V Calib2.pst smo dobili dva nova oddelka (* prior information) in (* regularisation). Povečalo se je število opazovanih skupin *OBNME* v (* observation groups) iz 2 na 18. V PEST nadzorni datoteki z imenom Calib2.pst vidimo, da je nastavljen način (regularisation) oziroma vrednost parametra *PESTMODE* se je spremenila iz *PESTMODE=estimation* načina v način *PESTMODE=regularisation*. To je označeno mastnim tiskom v preglednici (Preglednica 15). Izvedla se je regularizacija po metodi Andreja Tihonova, ki je najpogostejše uporabljena metoda regulacije slabo pogojenih problemov [14].

Preglednica 15: PEST Control File datoteka z vneseno regularizacijo.

Table 15: PEST Control File with regularisation.

```
pcf
* control data
restart regularisation
16 3765 16 16 18
1 2 double point 1 0 0
20 -3 0.3 0.005 7 0
3 3 0.005
0.1
50 0.001 3 3 0.0001 3
0 0 0
* singular value decomposition
1
16 5.00E-12
0
* parameter groups
01PERC relative 0.001 0 switch 2 parabolic
01UZL relative 0.001 0 switch 2 parabolic
01K0 relative 0.001 0 switch 2 parabolic
01K1 relative 0.001 0 switch 2 parabolic
01K2 relative 0.001 0 switch 2 parabolic
01MXBS relative 0.001 0 switch 2 parabolic
01CET relative 0.001 0 switch 2 parabolic
01TT1 relative 0.001 0.001 switch 2 parabolic
01CFM1 relative 0.001 0 switch 2 parabolic
01SP1 relative 0.001 0 switch 2 parabolic
01SFC1 relative 0.001 0 switch 2 parabolic
01CFR1 relative 0.001 0 switch 2 parabolic
```

se nadaljuje...

...nadaljevanje

01CWH1 relative 0.001 0 switch 2 parabolic
01FC1 relative 0.001 0 switch 2 parabolic

01LP1 relative 0.001 0 switch 2 parabolic
01BET1 relative 0.001 0 switch 2 parabolic

* parameter data

01PERC log factor 1 0.001 4 01PERC 1 0 1

01UZI log factor 20 0.001 70 01UZI 1 0 1

01K0 log factor 0.2 0.1 0.5 01K0 1 0 1

01K1 log factor 0.1 0.01 0.2 01K1 1 0 1

01K2 log factor 0.05 5E-05 0.1 01K2 1 0 1

01MXBS log factor 1.001 1 2.5 01MXBS 1 0 1

01CET none relative 0.001 0 0.3 01CET 1 0 1

01TT1 none relative 0.001 -2 0.5 01TT1 1 0 1

01CFM1 log factor 3 0.5 5 01CFM1 1 0 1

01SP1 log factor 0.999 0.001 1 01SP1 1 0 1

01SFC1 log factor 0.999 0.001 5 01SFC1 1 0 1

01CFR1 log factor 0.05 0.001 5 01CFR1 1 0 1

01CWH1 log factor 0.1 0.001 5 01CWH1 1 0 1

01FC1 log factor 120 100 550 01FC1 1 0 1

01LP1 log factor 0.999 0.3 1 01LP1 1 0 1

01BET1 log factor 2 1 5 01BET1 1 0 1

* observation groups

01mq

peak

regul_01perc

regul_01uzl

regul_01k0

regul_01k1

regul_01k2

regul_01mxbs

regul_01cet

regul_01tt1

regul_01cfm1

regul_01sp1

regul_01sfc1

regul_01cfr1

regul_01cwh1

regul_01fc1

regul_01lp1

regul_01bet1

* observation data

01mq_1 0.2810000 1.299403E-02 01mq

01mq_2 0.2720000 1.299403E-02 01mq

01mq_3 0.2670000 1.299403E-02 01mq

~

01mq_3742 0.7010000 1.299403E-02 01mq

01mq_3743 0.7630000 1.299403E-02 01mq

01mq_3744 0.7060000 1.299403E-02 01mq

peak_1 5.708000 4.833739E-02 peak

peak_2 4.760000 4.833739E-02 peak

peak_3 8.749000 4.833739E-02 peak

~

peak_19 2.482000 4.833739E-02 peak

```

se nadaljuje...
...nadaljevanje

peak_20  4.939000  4.833739E-02 peak
peak_21  2.830000  4.833739E-02 peak
* model command line
Model.cmd
* model input/output
Parameter.tpl  .\Data\Parameter.xml
Results.ins  .\Results\Results.txt
Peaks.ins  .\Results\Peaks.txt
* prior information
01perc  1.0*log(01perc)=0.0      1.0 regul_01perc
01uzl  1.0*log(01uzl)=1.301030  1.0 regul_01uzl
01k0  1.0*log(01k0)=-0.6989700  1.0 regul_01k0
01k1  1.0*log(01k1)=-1.0      1.0 regul_01k1
01k2  1.0*log(01k2)=-1.301030  1.0 regul_01k2
01mxbs  1.0*log(01mxbs)=4.3407748E-04 1.0 regul_01mxbs
01cet  1.0*01cet=1.0E-03      1.0 regul_01cet
01tt1  1.0*01tt1=1.0E-03      1.0 regul_01tt1
01cfm1  1.0*log(01cfm1)=0.4771213  1.0 regul_01cfm1
01sp1  1.0*log(01sp1)=-4.3451177E-04 1.0 regul_01sp1
01sfc1  1.0*log(01sfc1)=-4.3451177E-04 1.0 regul_01sfc1
01cfr1  1.0*log(01cfr1)=-1.301030  1.0 regul_01cfr1
01cwh1  1.0*log(01cwh1)=-1.0      1.0 regul_01cwh1
01fc1  1.0*log(01fc1)=2.079181  1.0 regul_01fc1
01lp1  1.0*log(01lp1)=-4.3451177E-04 1.0 regul_01lp1
01bet1  1.0*log(01bet1)=0.3010300  1.0 regul_01bet1
* regularisation
1.0E-10 1.05E-10 0.1
1.0 1.0e-10 1.0e10
1.3 1.0e-2 1

```

Do zdaj smo izvedli vse postopke singularnega razcepa, uteževanja in Tihonove regularizacije in lahko končno začnemo postopke za umerjanje modela.

3.1.5 Umerjanje s PEST_HP

Konzolni program za zagon in vzporedno procesiranje PEST_HP na protokolu TCP je zapisan v prilogi (Priloga A).

Vzporedno računanje pomeni uporabo več delavcev - agentov. En sam računalnik lahko podpira več kot enega agenta glede na število procesorskih jeder. Tako se lahko celo z enim računalnikom pospeši postopek umerjanja, da se kar najboljše izkoristijo računalniške moči računalnika.

V ukaznem oknu »Command Prompt« se postavimo v mapo `..\HidModel\` in iz ukazne vrstice poženemo program `Clbrt.cmd` z ukazom `..\HidModel\>CLBRT Calib2`.

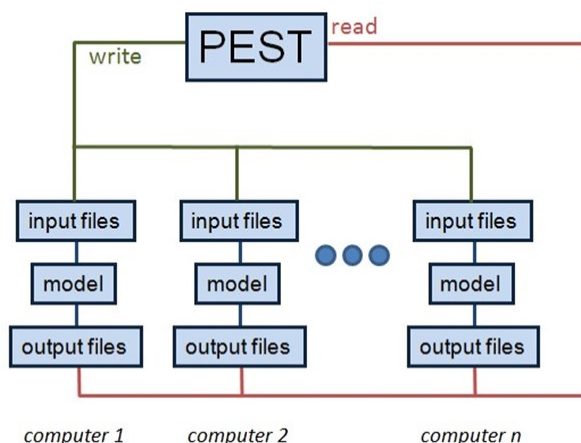
Calib2 je ime nadzorne datoteke `Calib2.pst`.

Program se začne izvajati in na ekranu v ukaznih oknih se začno izpisovati informacije poteka računa.

Program ustvari eno mapo `..\Manager\` in ciklično več map z imenom `..\Agent1\`, `..\Agent2\`, ..., `..\AgentN\`. V vsako od map se prekopira celotna vsebina iz mape `..\Template\`. V `Clbrt.cmd` je

zapisano število logičnih procesorjev na »Host1« v spremenljivki *np*, ki jo ustrezno nastavimo glede na dotični računalnik, na katerem računamo. *Clbrt.cmd* lahko ustrezno dopišemo še druge računalnike Host2, ..., HostN in s tem dodamo še več agentov (Slika 26 in Slika 27) v omrežju. Pomembno je, da vemo, da je to možno narediti, ko imamo veliko parametrov, da pohitrimo izvajanje.

Z izvajanjem postopkov umerjanja v mreži računalnikov (Slika 26) zelo zmanjšamo čas, potreben za umerjanje modela.



Slika 26: Postopek umerjanja v lokalnem omrežju.

Figure 26: Local network calibration procedure.

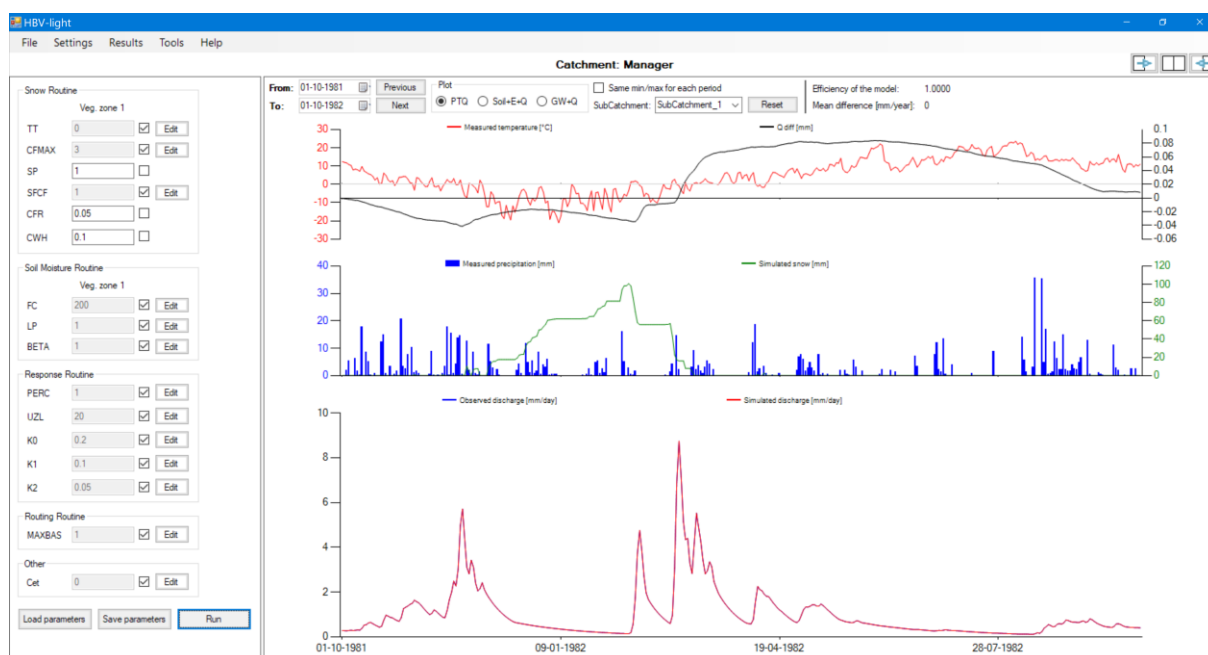


Slika 27: Splošna struktura dela v postopku vzporednega umerjanja.

Figure 27: General structure of the work in parallel calibration procedure.

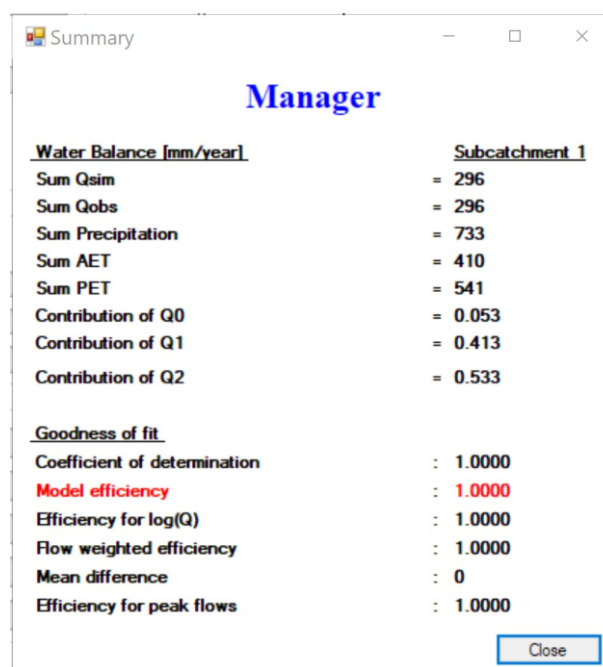
V našem primeru HBV-Land samo umerjanje ni zahtevno, za to izračuna umerjanja nismo izvajali na več računalnikih. Tako je notesnik s 6 jedri in 12 logičnimi procesorji več kot dovolj in model HBV-Land poračuna v manj kot eni minuti.

Po 39 iteracijskih izračunih, kot je zabeleženo v datoteki *Calib2.rei* (Priloga G) se račun konča. Rezultati postopka izračuna vsake iteracije so zapisani v datoteki *Calib2.rec* (Priloga H). V datoteki *Calib2.rec* dobimo $NSE = 1.0000$ in tudi na sliki (Slika 29), kar pomeni popolno ujemanje simuliranih in izmerjenih vrednosti odtokov.



Slika 28: Osnovna zaslonka slika umerjenega modela HBV-Land.

Figure 28: Basic screen image of the calibrated HBV-Land model.

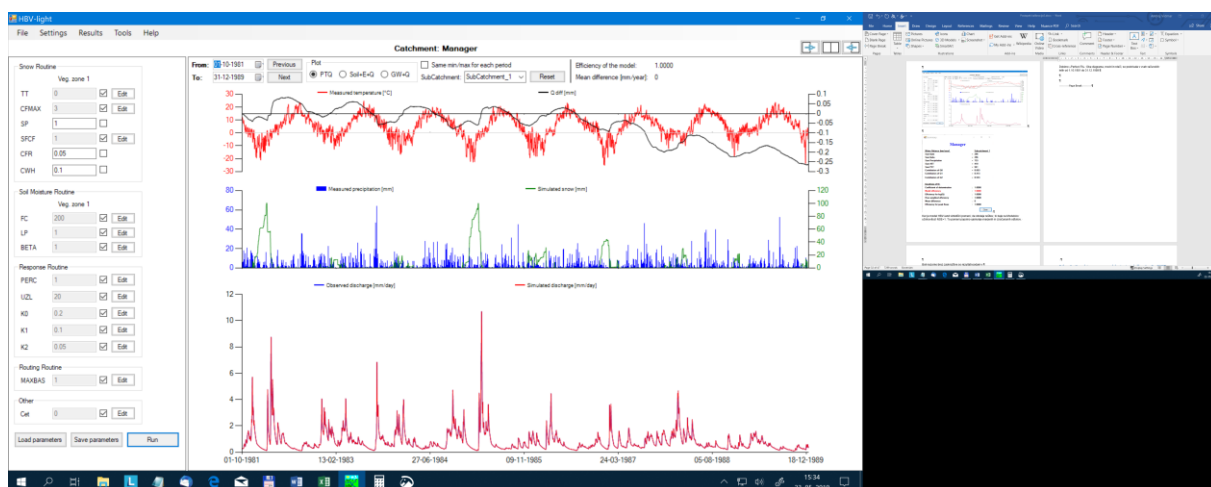


Slika 29: Izris ekrana "Summary" izračuna vodne bilance in parametrov modelne učinkovitosti umerjenega modela HBV-Land.

Figure 29: The "Summary" window display of water balance and model performance modeling of the calibrated model HBV-Land.

Hidrološki model HBV-Land ima izračunan hidrogram brez šuma. Hidrogram odtoka dobimo, ko simuliramo neki dogodek z znanimi vhodnimi podatki in znanimi umerjenimi parametri. Takšen izračun odtoka potem vstavimo v isti model kot merjeni podatek. Pomeni, da obstaja rešitev oziroma takšne vrednosti parametrov, ki dajejo možnost za umerjanje modela z modelsko učinkovitostjo $NSE=1$. V

našem primeru smo hidrološki model HBV-Land umerili iz začetnih vrednosti privzetih parametrov na zelo dober približek umerjenih vrednosti parametrov (Slika 28 in Slika 29, Preglednica 16). To pomeni zelo dobro ujemanje oziroma »Perfect-Fit« merjenih in izračunanih odtokov (Slika 30, Preglednica 16). Oba diagrama modri in rdeči, se prekrivata v vseh računskih letih od 1. 10. 1981 do 31. 12. 1989. Za modelsko učinkovitost za celotno umerjevalno obdobje dobimo $NSE=0.9999998535$ (Preglednica 17). Pri popolnem ujemanju pri poznanih parametrih je $NSE=0.9999998605$. Njuna razlika je samo $7.0E-9$. Za učinkovitost ujemanja konic pretokov za celotno umerjevalno obdobje dobimo $NSE=0.9999999715$. Pri popolnem ujemanju visokih konic pri poznanih parametrih »Best Fit« je $NSE=0.9999999777$ in razlika je $6.2E-09$.



Slika 30: Zaslonska slika umerjenega modela HBV-Land za celotno umerjevalno obdobje.

Figure 30: Screen image of the calibrated HBV-Land model for the whole calibration period.

Po končanju umerjanja smo dobili končne umerjene parametre, ki so zapisani v končnem izračunu, katerega rezultati se nahajajo v mapi izračuna v `.. \Manager\Data\Calib2.par` datoteki. Izračunane vrednosti `Calib2.par` se zelo malo razlikujejo od dejanskih znanih vrednosti "Best Fit".

Preglednica 16: Izračunane in dejanske vrednosti.

Table 16: The calculated and actual values.

Ime_par/ ParName		Privzeto	Izračunano	Znana vrednost	Razlika	%razlike
HBV-light Ime / Name	PEST Ime / Name	Dafault	Calculated_value	Known value	Diff	% diff
PERC	01perc	1	0.6999818	0.7	1.82E-05	2.6E-03
UZL	01uzl	20	20.0008	20	-0.0008	-4.0E-03
K0	01k0	0.2	0.2	0.2	0	0
K1	01k1	0.1	0.08	0.08	0	0
K2	01k2	0.05	0.03	0.03	0	0
MAXBAS	01mxbs	1	2.49969	2.5	0.00031	1.2E-02

se nadaljuje...

...nadaljevanje

Cet	01cet	0	0.099997	0.1	3.00E-06	3.0E-03
TT	01tt1	0	-0.9998	-1	-0.0002	2.0E-02
CFMAX	01cfm1	3	5	5	0	0
SP	01sp1	1	1	1	0	0
SFCF	01sfc1	1	0.7999511	0.8	4.89E-05	6.1E-03
CFR	01cfr1	0.05	0.0499588	0.05	4.12E-05	8.2E-02
CWH	01cwh1	0.1	0.0999685	0.1	3.15E-05	3.2E-02
FC	01fc1	200	250.015	250	-0.015	-6.0E-03
LP	01lp1	1	0.70008	0.7	-8.00E-05	-1.1E-02
BETA	01bet1	1	3.000484	3	-0.000484	-1.6E-02

Brez zaokrožitve so vrednosti vodne balance in rezultati učinkovitosti umerjanja podani v ..\Manager\Results\Summary.txt (Preglednica 17).

Preglednica 17: Datoteka Summary.txt modelske učinkovitosti umerjenega modela.

Table 17: Summary.txt file of the result of the model efficiency of the calibrated model.

SubCatchment_1

Water Balance (mm/year):

Sum Qsim	295.56389900889
Sum Qobs	295.567719017095
Sum Precipitation	732.622462606839
Sum AET	409.890821607593
Sum PET	540.565008996671
Contribution of Q0	0.0534442677279583
Contribution of Q1	0.413266540920568
Contribution of Q2	0.533289191351474

Goodness of fit:

Coefficient of determination	0.99999853981305
Model efficiency	0.99999853573575
Kling-Gupta efficiency	0.999980109706925
Efficiency for log(Q)	0.99999886981231
Flow weighted efficiency	0.9999996414924
Mean difference	0.00382000820480621
Efficiency for peak flows	0.99999971500029
Volume Error	0.999987075692104
MARE Measure	0.99944992522368
Lindstrom Measure	0.999998561142785
Spearman Rank	0.999999299469202

Prikazani rezultati v preglednicah (Preglednica 16) in (Preglednica 17) kažejo na zelo uspešno umerjanje testnega modela HBV-Land. To potrjuje, da je možno nelinearne probleme uspešno reševati z inverznim postopkom GLM ob uporabi Tihonove regularizacije.

Pri umerjanju je zelo koristen PEST-ov program PARREP, ki nam olajša izdelavo nove PEST nadzorne datoteke PCF. PARREP je okrajšava za REPlication PARAmeter. Običajno se uporablja za ustvarjanje nove nadzorne datoteke PEST iz podatkov stare nadzorne datoteke PEST in ustrezne datoteke optimalnih parametrov. Datoteka optimalnih parametrov je nastala pri postopku optimizacije PEST iz stare nadzorne datoteke PEST in ima končnico .PAR. Njen ukaz je naslednji: (parrep parameter_file old_control_file new_control_file).

Primer:

```
>>>
c:\HidModel\Manager>parrep calib2.par calib2.pst calib3.pst
PARREP Version 16.1. Watermark Numerical Computing.
Reading parameter value file calib2.par ----->
Data for 16 parameters read from file calib2.par.
Reading file calib2.pst and writing file calib3.pst ----->
File calib3.pst written ok.
c:\HidModel\Manager>
>>>
```

Uporabnost programa se izkaže, ko se postopek umerjanja vleče v več deset iteracij. Po nekaj iteracijah program zaustavimo in poženemo PARREP. Na to ponovno zaženemo postopek umerjanja modela s popravljenimi vrednostmi nastavitve PEST nadzorne datoteke in/ali z novimi začetnimi vrednostmi, ki so boljši približek rezultatu, in s tem zmanjšamo število iteracij in pohitimo računanje. PARREP zelo olajša interaktivno delo v procesu umerjanja.

3.1.6 Umerjanje z GAP

O orodju GAP je več povedano v poglavju 2.5. To orodje, za samodejno umerjanje hidrološkega modela, imamo v GUI HBV-light. V (Tools) izberemo (GAP optimization) in odprlo se nam bo okno z vsemi nastavitvami (Slika 31). Vse nastavitve z GAP lahko shranimo in nato ponovno uvozimo v ..\Data\GAP_Simulation.xml datoteko.

Pri nastavitvah umerjanja z GAP (angl. GAP optimization) (Slika 31) smo nastavili enake robne pogoje za parametre vegetacijskih con in splošnih parametrov kot pri umerjanju s PEST-om v primeru HBV-Land. Začetni parametri pri prvem umerjanju so bili enaki kot privzete vrednosti (Preglednica 1 in Preglednica 15).

3.1.6.1 Prvo umerjanje z GAP

GAP optimization

Population Settings

Number of parameter sets: 50

Number of populations: 1

Frequency of exchange: 0

Number of PSs which exchange: 0

Reproduction Settings

Probability for optimization between sets: 0.01

Probability for mutation: 0.02

Probability for optimized value: 0

Probability for random value between the old values: 0.16

Probability for taking one of the old values: 0.82

Portion of range for small change (if random between and both values equal): 0

Value of C: 2

Model Settings

No of model runs: 5000

No of runs for local optimization (Powell): 1000

☒ Calibrate 100 times

Goodness of Fit Measure

Population_1

	Obj. Function	Weight
►	Reff	1
*		

Vegetation zone parameters

Parameter	Lower Limit	Upper Limit
TT	-2	1
CFMAX	0.5	6
SP	1	1
SFCF	0.01	1
CFR	0.05	0.05
CWH	0.1	0.1
FC	50	500
LP	0.3	1
BETA	1	5

Catchment parameters

Parameter	Lower Limit	Upper Limit
PERC	0.1	2
UZL	5	50
K0	0.1	0.9
K1	0.01	0.2
K2	5E-05	0.1
MAXBAS	1	5
Cet	0.01	0.3
PCALT	10	10
TCALT	0.6	0.6
Elev. of P	0	0
Elev. of T	0	0

Progress

Calibration: 0 Best fit so far: 0

Population: 0 Done so far: 0

Generation: 0 Done so far (Powell): 0

Estimated endtime:

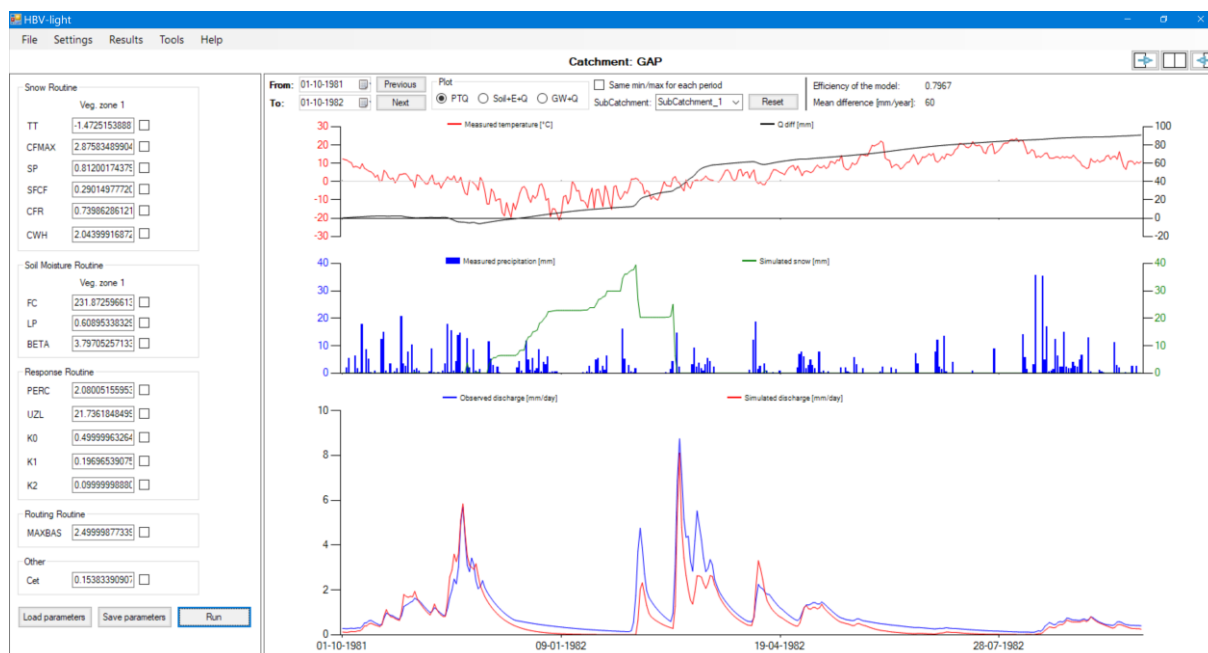
Buttons: Load Settings, Save Settings, Close, Start calibration

Slika 31: Robni pogoji vrednosti parametrov GAP.

Figure 31: Boundary conditions for the values of the parameters of the GAP.

S klikom na gumb (Start calibration) se po 5.000 iteracijah oziroma ponovitvah izračunov modela in še 1.000-krat za izračun lokalnega prilagajanja oziroma lokalne Powell-ove optimizacije se postopek zaključi. Skupno smo model pognali 600.000-krat. Rezultat izračuna optimiziranih parametrov se zapiše v datoteko ..\Results\ GAP_Parameter.xml. Ko uvozimo te nove parametre in poženemo ponovno

model z (Run) dobimo rezultat razviden v sliki (Slika 32). V isti sliki in preglednici (Preglednica 18)) razberemo tudi koeficient modelske učinkovitosti, ki znaša $NSE=0.7967$.



Slika 32: Prvi umerjeni model HBV-Land z GAP.

Figure 32: The first calibrated HBV-Land model with the GAP.

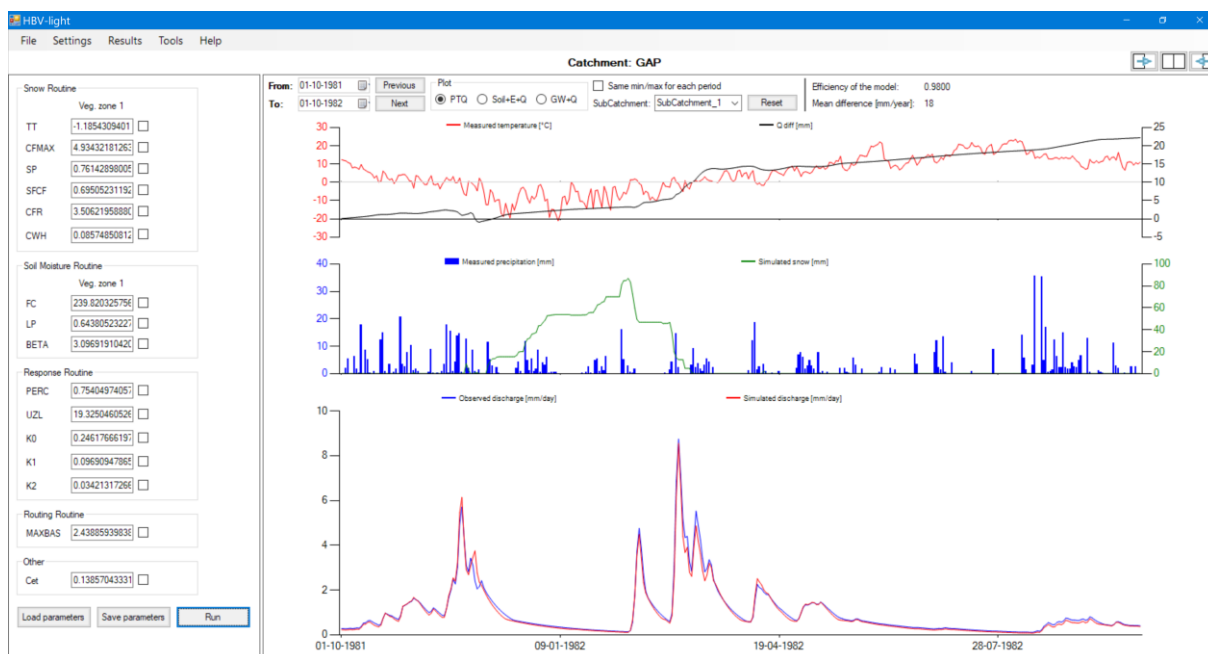
Preglednica 18: Datoteka Summary.txt modelske učinkovitosti umerjenega I. primera HBV-Land z GAP-om.

Table 18: Summary.txt file of the result of the model efficiency of the calibrated case I. of HBV-Land with GAP.

```
GAP_1 SubCatchment_1
Water Balance (mm/year):
Sum Qsim      235.142739697288
Sum Qobs      295.567719017095
Sum Precipitation  732.622462606839
Sum AET       432.618023940041
Sum PET       546.769997506022
Contribution of Q0  0.00817659982631241
Contribution of Q1  0.21814388446024
Contribution of Q2  0.773679515713449
Goodness of fit:
Coefficient of determination  0.852376405494331
Model efficiency  0.796747279600266
Kling-Gupta efficiency  0.780258820504506
Efficiency for log(Q)  -1.19391705758337
Flow weighted efficiency  0.865186155631796
Mean difference  60.4249793198071
Efficiency for peak flows  0.843235049058315
Volume Error  0.795562994765635
MARE Measure  0.587421980548147
Lindstrom Measure  0.77630357907683
Spearman Rank  0.943943901646449
```

3.1.6.2 Drugo umerjanje z GAP

Za drugo umerjanje smo uporabili ponovne iste robne pogoje (Slika 31). Začetne vrednosti parametrov smo prevzeli iz prvega umerjanja. Dobili smo drugačen rezultat (Slika 33) in preglednica (Preglednica 19) kot v prvem primeru (Slika 32). To je značilnost stohastičnih evolucijskih metod umerjanja. Da dobimo dobre rezultate, jih je treba večkrat ponoviti, npr. 50-100 krat. Potem izberemo najboljši rezultat umerjanja.



Slika 33: Drugi umerjeni model HBV-Land z GAP.

Figure 33: The second calibrated HBV-Land model with the GAP.

Preglednica 19: Datoteka Summary.txt modelske učinkovitosti umerjenega II. primera HBV-Land z GAP-om.

Table 19: Summary.txt file of the result of the model efficiency of the calibrated case II. of HBV-Land with the GAP.

GAP_II	SubCatchment_1
Water Balance (mm/year):	
Sum Qsim	277.091362152437
Sum Qobs	295.567719017095
Sum Precipitation	732.622462606839
Sum AET	420.100673832672
Sum PET	545.732486590005
Contribution of Q0	0.0399469921904847
Contribution of Q1	0.410536483199215
Contribution of Q2	0.549516524610301
Goodness of fit:	
Coefficient of determination	0.984274745307254
Model efficiency	0.980031385757463
Kling-Gupta efficiency	0.936389669466692
Efficiency for log(Q)	0.948289244186581
Flow weighted efficiency	0.988436735270372
Mean difference	18.4763568646579

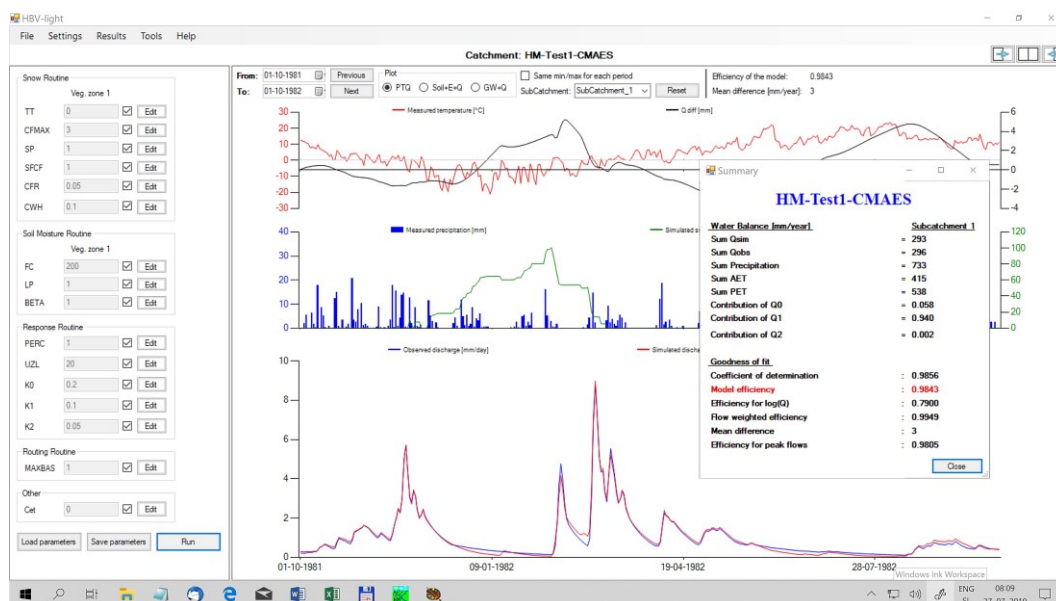
se nadaljuje...
...nadaljevanje

Efficiency for peak flows	0.985866980934948
Volume Error	0.937488583238722
MARE Measure	0.877952124956535
Lindstrom Measure	0.973780244081335
Spearman Rank	0.99292299025717

Ko primerjamo rezultata prvega in drugega umerjanja ugotovimo, da v drugem umerjanju dobimo veliko boljši rezultat modelske učinkovitosti. Ugotovimo tudi, da GAP pri enakih robnih pogojih daje vsakič drugačen rezultat, ki je boljši ali slabši od predhodnih izračunov. GAP deluje naključno in nikoli ne vemo, ali smo dobili dovolj dober nabor parametrov. Vedno se potem vprašamo, ali lahko dobimo še boljši nabor parametrov? Po stotih poizkusih in ponavljanjih smo dobili modelsko učinkovitost okoli $NSE=0.99$. Kot tretje s primerjavo GAP proti PEST umerjanju modela z enakimi začetnimi vrednostmi in enakimi robnimi pogoji vidimo, da GAP daje slabše rezultate. Ugotovimo, da se PEST veliko bolje izkaže (Preglednica 17). PEST pri istih robnih vrednostih parametrov vedno simulira enak rezultat.

3.1.7 Umerjanje s CMA-ES

Za umerjanje HBV-Land izberemo enake nastavitve kot pri umerjanju s PEST_HP v »estimation« načinu. Datoteka Calib.pst iz preglednice (Preglednica 1) je opisana v podpoglavju 3.1.3.1. V ukaznem oknu se postavimo v mapo `..\Template\` in poženemo ukaz CMAES-P: `..\HidModel\Template\cmaes_p calib`. Lahko enako naredimo tudi s programom Clbrt.cmd z ukazom `..\HidModel\Template\>Clbrt Ime-modela calib c`. S »c« smo podali programu krenico za izvajanje globalne optimizacije z CMA-ES. Rezultat je prikazan na sliki (Slika 34) in preglednici (Preglednica 20).



Slika 34: Umerjeni model HBV-Land s CMA-ES.

Figure 34: The calibrated HBV-Land model with the CMA-ES.

Preglednica 20: Datoteka Summary.txt modelske učinkovitosti umerjenega modela HBV-Land s CMA-ES-om.

Table 20: Summary.txt file of the result of the model efficiency of the calibrated HBV-Land model with the CMA-ES.

HBV-Land-CMAES SubCatchment_1	
Water Balance (mm/year):	
Sum Qsim	292.971545201922
Sum Qobs	295.567719017095
Sum Precipitation	732.622462606839
Sum AET	415.458751853199
Sum PET	538.138683466161
Contribution of Q0	0.0582225599077918
Contribution of Q1	0.93951369199764
Contribution of Q2	0.00226374809456786
Goodness of fit:	
Coefficient of determination	0.985640741407374
Model efficiency	0.984329744036117
Kling-Gupta efficiency	0.969943812771889
Efficiency for log(Q)	0.789975220085406
Flow weighted efficiency	0.994899548851775
Mean difference	2.59617381517269
Efficiency for peak flows	0.980452921570776
Volume Error	0.991216314745716
MARE Measure	0.835771658875119
Lindstrom Measure	0.983451375510688
Spearman Rank	0.977658112719518

Preglednica 21: Datoteka calib.rec rezultata umerjanja modela s CMA-ES-om.

Table 21: The calib.rec file result of the model calibration with the CMA-ES.

```

CMAES_P RUN RECORD FILE
Name of PEST control file : calib.pst
Problem dimensions ----->
Number of parameters      : 16
Number of adjustable parameters : 16
Number of observations     : 3765
Number of prior information eqns : 0

Population size (lambda) : 16
Number of parents (mu)   : 16
Recombination weights    : "superlinear decrease"
  Random number seed      : 1111
  Employ SVD hybridization : no
CMA termination criteria ----->
  Relative objective fn improvement      : 1.0E-03
  Number of itns to which this applies  : 40
  Maximum relative parameter change     : 1.0E-03
  Number of itns to which this applies  : 40
  Relative generated obj fn difference   : 1.0E-02
  Number of itns to which this applies  : 10
  Maximum number of iterations          : 122311
Parameter data ----->
Name Transform. Initial Lower_bound Upper_bound
01perc log    1.0    1.0E-03    4.0
01uzl log    20.0    1.0E-03    70.0

```

se nadaljuje...

...nadaljevanje

```
01k0 log 0.2 0.1 0.5
01k1 log 0.1 1.0E-02 0.2
01k2 log 5.0E-02 5.0E-05 0.1
01mxbs log 1.001 1.0 2.5
01cet none 1.0E-03 0.0 0.3
01ttt1 none 1.0E-03 -2.0 0.5
01cfm1 log 3.0 0.5 5.0
01sp1 log 0.999 1.0E-03 1.0
01sfc1 log 0.999 1.0E-03 5.0
01cfr1 log 5.0E-02 1.0E-03 5.0
01cwh1 log 0.1 1.0E-03 5.0
01fc1 log 200.0 100.0 550.0
01lp1 log 0.9990 0.3 1.0
01bet1 log 2.0 1.0 5.0
```

Name Scale Offset

```
01perc 1.00 0.00
01uzl 1.00 0.00
01k0 1.00 0.00
01k1 1.00 0.00
01k2 1.00 0.00
01mxbs 1.00 0.00
01cet 1.00 0.00
01ttt1 1.00 0.00
01cfm1 1.00 0.00
01sp1 1.00 0.00
01sfc1 1.00 0.00
01cfr1 1.00 0.00
01cwh1 1.00 0.00
01fc1 1.00 0.00
01lp1 1.00 0.00
01bet1 1.00 0.00
```

Initial parameter covariance data ----->

Initial SIGMAS computed as 0.25 of (log transformed) parameter bounds.

Name Sigma

```
01perc 0.90052
01uzl 1.21130
01k0 0.17474
01k1 0.32526
01k2 0.82526
01mxbs 9.94850E-02
01cet 7.50000E-02
01ttt1 0.62500
01cfm1 0.25000
01sp1 0.75000
01sfc1 0.92474
01cfr1 0.92474
01cwh1 0.92474
01fc1 0.18509
01lp1 0.13072
01bet1 0.17474
```

RECORD OF OPTIMISATION PROCESS

ITERATION NUMBER 1

Number of function evaluations so far = 1

Lowest objective function so far = 5246.72

se nadaljuje...

...nadaljevanje

```
Contribution from group "01mq"      = 4930.49
Contribution from group "peak"      = 316.236
Iteration number of lowest phi so far = 0
```

```
Lowest phi this iteration = 1251.81
Highest phi this iteration = model_run_failure
```

ITERATION NUMBER 2

```
Number of function evaluations so far = 18
Lowest objective function so far      = 1251.81
Contribution from group "01mq"      = 1148.22
Contribution from group "peak"      = 103.596
Iteration number of lowest phi so far = 1
Lowest phi this iteration = 798.639
Highest phi this iteration = 589335.
```

ITERATION NUMBER 3

```
Number of function evaluations so far = 35
Lowest objective function so far      = 798.639
Contribution from group "01mq"      = 664.033
Contribution from group "peak"      = 134.606
Iteration number of lowest phi so far = 2
Lowest phi this iteration = 2214.80
Highest phi this iteration = 226873.
```

and so on ...

ITERATION NUMBER 417

```
Number of function evaluations so far = 7073
Lowest objective function so far      = 37.2035
Contribution from group "01mq"      = 35.5206
Contribution from group "peak"      = 1.68297
Iteration number of lowest phi so far = 415
```

```
Lowest phi this iteration = 37.1950
Highest phi this iteration = 37.3450
```

ITERATION NUMBER 418

```
Number of function evaluations so far = 7090
Lowest objective function so far      = 37.1950
Contribution from group "01mq"      = 35.4909
Contribution from group "peak"      = 1.70412
Iteration number of lowest phi so far = 417
```

```
Lowest phi this iteration = 37.1503
Highest phi this iteration = 37.3484
```

ITERATION NUMBER 419

```
Number of function evaluations so far = 7107
Lowest objective function so far      = 37.1503
Contribution from group "01mq"      = 35.4334
Contribution from group "peak"      = 1.71688
Iteration number of lowest phi so far = 418
Lowest phi this iteration = 37.2200
Highest phi this iteration = 37.3724
```

COMPLETION OF CMA-ES PROCESS

Reason for termination of CMA-ES process:-

Highest-to-lowest relative objective function difference for generated parameter sets below threshold over 10 successive iterations.

Optimised parameter values ----->

se nadaljuje...

...nadaljevanje

Name	Value
01perc	1.818155E-03
01uzl	27.8436
01k0	0.221566
01k1	7.480828E-02
01k2	3.954229E-03
01mxbs	2.49941
01cet	8.448447E-02
01ttt1	-0.985561
01cfm1	4.80582
01sp1	0.992055
01sfc1	0.832682
01cfr1	2.936890E-03
01cwh1	1.305522E-02
01fc1	270.066
01lp1	0.696283
01bet1	2.98746

See file calib.par for optimised parameter values.

See file calib.unc for optimised covariance matrix.

3.1.8 Vzorejanje rezultatov umerjanja testnega modela

Merila oziroma kazalci učinkovitost rezultatov umerjanja modela so prikazani v preglednici (Preglednica 22) in opisano v članku »Učinkovito umerjanje konceptualnega hidrološkega modela, ki temelji na izboljššanem postopku Gaussa-Levenberg-Marquardt_a« [80].

Preglednica 22: Kazalci za oceno učinkovitosti umerjanja, merila kakovosti modela [81].

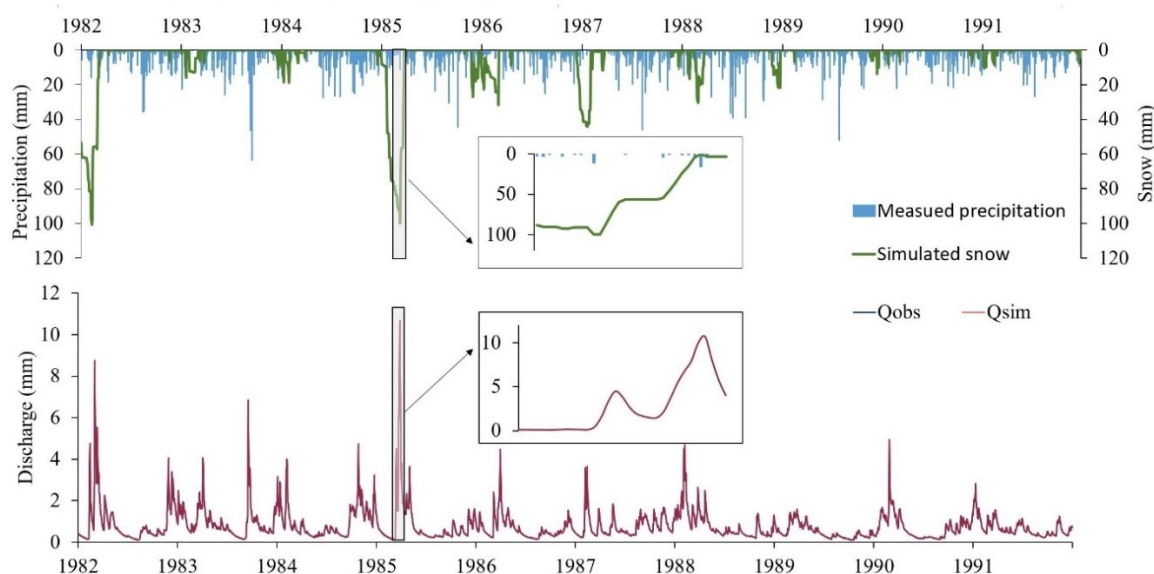
Table 22: Indicators for assessing calibration efficiency, model quality criteria [81].

Opis učinkovitosti	kazalca	Definicija ¹	Vrednost popolnega ujemanja	Območje vrednosti
Koeficient določenosti (R^2)		$\frac{(\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}}))^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2}$	1	$-\infty$ to 1
Modelska učinkovitost (NSE)		$1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}$	1	$-\infty$ to 1
Učinkovitost $\log(Q)$	pri	$1 - \frac{\sum (\ln Q_{obs} - \ln Q_{sim})^2}{\sum (\ln Q_{obs} - \ln \overline{Q_{obs}})^2}$	1	$-\infty$ to 1
Protočno-ponderirana učinkovitost		$1 - \frac{\sum (Q_{obs} / \overline{Q_{obs}})(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} / \overline{Q_{obs}})(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}$	1	$-\infty$ to 1
Srednja razlika		$\frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})}{n} 365$	0	$-\infty$ to ∞
Učinkovitost pretokov	vršnih	$1 - \frac{\sum (peak Q_{obs} - peak Q_{sim})^2}{\sum (peak Q_{obs} - \overline{peak Q_{obs}})^2}$	1	$-\infty$ to 1
Napaka volumna		$1 - \frac{1}{n} \sum \frac{ Q_{obs} - Q_{sim} }{Q_{obs}}$	1	$-\infty$ to 1
MARE merilo		$1 - \frac{1}{n} \sum \frac{ Q_{obs} - Q_{sim} }{Q_{obs}}$	1	$-\infty$ to 1
Lindstrom-ovo merilo		$NSE - 0.1 \frac{ \sum (Q_{obs} - Q_{sim}) }{\sum (Q_{obs})}$	1	$-\infty$ to 1
Spearman-ovo rangiranje		$\frac{\sum (R_{obs} - \overline{R_{obs}})(S_{sim} - \overline{S_{sim}})}{\sqrt{\sum (R_{obs} - \overline{R_{obs}})^2} \sqrt{\sum (S_{sim} - \overline{S_{sim}})^2}}$	1	$-\infty$ to 1
Učinkovitost pretokov	nizkih	$1 - \frac{\sum (low Q_{obs} - low Q_{sim})^2}{\sum (low Q_{obs} - \overline{low Q_{obs}})^2}$	1	$-\infty$ to 1
Razlika pretokov	nizkih	$\sum (low Q_{obs} - low Q_{sim})$	0	$-\infty$ to ∞

¹ Q_{obs} je izmerjeni (opazovani) pretok, Q_{sim} je modelirani (simuliran) pretok, n število časovnih korakov.

Rezultati umerjanja s postopkom GLM so grafično predstavljeni na sliki (Slika 35). Rezultati učinkovitosti umerjanja parametrov so podani v preglednici (Preglednica 23). V drugem stolpcu z oznako "Popolna-vrednost" (angl. Perfect-fit) so podani parametri, ki dajo za učinkovitost umerjanja

modela teoretično vrednost popolnega ujemanja za $NSE=1$. Tretji stolpec v preglednici (Preglednica 23) prikazuje rezultate parametrov, umerjenih z algoritmom GLM z uporabo SVD, in Tihonove regularizacije. Kljub enakim podatkom izračuna smo dobili nekoliko drugačne rezultate, ki jih lahko pripišemo računskemu šumu. Ta šum je najverjetneje v izračunu povzročilo zaokroževanje rezultatov Q_{sim} na tri decimalna mesta, kar je prednastavljeno v samem programu HBV-light.



Slika 35: Opazovani in simulirani odtok s postopkom umerjanja GLM za obdobje od 1. 1. 1982 do 31. 12. 1991.

Figure 35: Observed and simulated runoff by GLM calibration procedure for the period from 1 January 1982 to 31 December 1991.

Izračunani NSE je precej visok, kot je prikazano v tretjem stolpcu preglednice (Preglednica 23). Odstopanja vrednosti v NSE so se pojavila le po desetem decimalnem mestu, vrednost $NSE_{popolna_vrednost} = 0,9999998607$ in $NSE_{GLM} = 0,9999998605$. V referenčni vrednosti srednjih razlik so odstopanja na petem decimalnem mestu. Oboje je mogoče skoraj izenačiti z vrednostjo brezhibnega prileganja izmerjenih in simuliranih odtokov. Učinkovitost umerjanja s CMA-ES, GAP_{13} in GAP_{16} je prikazana v stolpcih 4–6 preglednice (Preglednica 23). Skupna primerjava NSE vseh treh postopkov, uporabljenih v tej študiji, je prikazana na sliki (Slika 36). Na podlagi učinkovitosti modela NSE je mogoče opaziti odlične zmogljivosti tudi za CMA-ES in GAP_{13} , medtem ko je GAP_{16} dosegel najnižji NSE .

Preglednica 23: Rezultati učinkovitosti umerjanja ¹ sintetičnega modela desetletnega obdobja, od 1. 10. 1981 do 31. 12. 1991.

Table 23: Calibration efficiency results¹ of the synthetic model over ten years, i.e., 1 October 1981 to 31 December 1991.

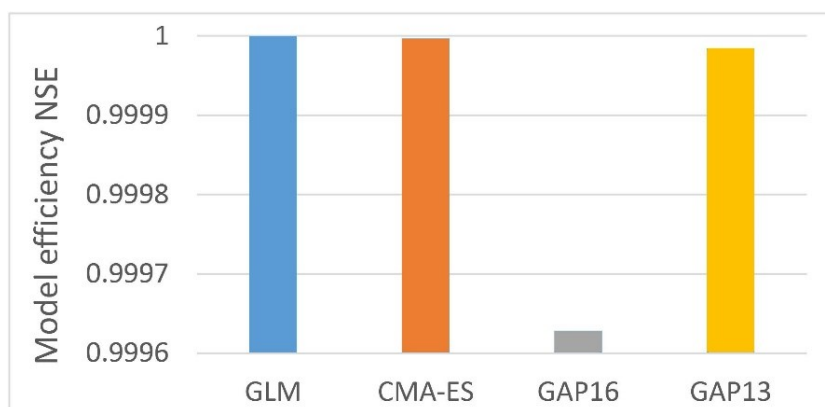
Merila uspešnosti modela ¹	Popolna-vrednost	GLM	CMA-ES	GAP_{16}	GAP_{13}
Koeficient določenosti (R^2)	1	1	0.999999	0.999631	0.999999
Modelska učinkovitost (NSE)	1	1	0.999999	0.999628	0.999989
Učinkovitost Kling-Gupta (KGE)	0.999990	0.999990	0.999902	0.998184	0.999003
Učinkovitost Kling-Gupta "ne-parametrična" (NPE)	0.999844	0.999840	0.999774	0.997672	0.999156
Učinkovitost pri $\log(Q)$	1	1	0.999996	0.998712	0.999946
Pretočno-utežena učinkovitost	1	1	0.999999	0.999777	0.999994

se nadaljuje...

...nadaljevanje

Srednja razlika		0.002825	0.002860	0.023888	-0.53402	0.12956
Učinkovitost vršnih pretokov	1	1	0.999997	0.998706	0.999978	
Napaka volumna	0.999990	0.999990	0.999919	0.998193	0.999562	
MARE merilo	0.999453	0.999450	0.999348	0.990692	0.996568	
Lindstrom-ovo merilo	1	1	0.999991	0.999447	0.999946	
Spearman-ovo rangiranje	1	1	0.999999	0.999688	0.999987	
Učinkovitost nizkih pretokov	1	1	0.999969	0.983838	0.999292	
Razlika nizkih pretokov	0	0	0.044	-1.307	-1.063	

¹ Rezultati so zaokroženi na šesto decimalno.



Slika 36: Predstavitev rezultatov *NSE* za obdobje umerjanja.

Figure 36: Presentation of *NSE* results for the calibration period.

PEST_HP izračuna občutljivost parametrov med samim postopkom umerjanja. Normalizirana občutljivost v drugem stolpcu preglednice (Preglednica 24) prikazuje, koliko se lahko negotovost v izhodu modela porazdeli med različne parametre. Parameter *TT* (temperaturni prag) je najobčutljivejši parameter z normalizirano občutljivostjo 1. Nasprotno sta najmanj občutljiva parametra *CFR* (koeficient zamrzovanja) in *CWH* (zmogljivost zadrževanja vode), oba z normalizirano občutljivostjo 0. Rezultati izračunanih parametrov z GLM, CMA-ES in GAP so prikazani v stolpcih 3–6 preglednice (Preglednica 24). Rezultati, umerjeni s postopkom GLM v tretjem stolpcu preglednice (Preglednica 24), dajejo vrednost, ki je blizu popolne-vrednosti v preglednici (Preglednica 23). Razlike se pojavijo le od četrtega do petega decimalnega mesta zaradi računskega šuma, prikazanega v stolpcu 3 preglednice (Preglednica 24). Vrednosti parametrov, umerjene s postopkom GAP, dajejo razmeroma dobre rezultate (GAP_{16} , $NSE = 0,9996$) v primerjavi z obstoječo hidrološko prakso. Vendar je to v primerjavi z GLM bistveno slabše, kar prikazujeta preglednici (Preglednica 24 in Preglednica 25).

Preglednica 24: Vrednosti posameznih parametrov, določenih v postopku umerjanja.

Table 24: The values of the individual parameters determined in the calibration procedure.

Ime parametra	Normalizirana občutljivost	GLM	CMA-ES	GAP_{16}	GAP_{13}
PERC	0.03	0.700005	0.7000623	0.697142508	0.693526262
UZL	0.07	20.0001	19.99882	19.95660857	20.11814985
K0	0.03	0.20001	0.1998579	0.204047194	0.20075344

se nadaljuje...

...nadaljevanje

K1	0.04	0.08	0.08000101	0.079860003	0.0799286
K2	0.01 0.03	0.0300044	0.030148466	0.029351392	
MAXBAS	0.07 2.49999	2.499148	2.512553604	2.500201514	
CET	0.08 0.100004	0.100003	0.102796635	0.100969107	
TT	1.00 -0.99998	-1.000009	-0.99999999	-0.99999592	
CFMAX	0.02 5.00016	5.034117	5.346262187	4.984995411	
SP	0.13 0.999978	0.9910489	0.879212318	-	
SFCF	0.23 0.799992	0.7997364	0.813747468	0.797604941	
CFR	0.00 0.050009	0.05129717	0.044801671	-	
CWH	0.00 0.100002	0.1000745	0.064851987	-	
FC	0.11 250	250.0022	244.8327906	249.3696183	
LP	0.12 0.700005	0.7000338	0.677129184	0.700118925	
BETA	0.06 3.000014	3.000171	2.871328415	3.005579383	

Prednost uporabe GLM s SVD in Tihonovo regularizacijo v postopku umerjanja je razvidna s primerjanjem vrednosti posameznih relativnih odstopanj glede "prave-vrednosti" parametrov v preglednici (Preglednica 25).

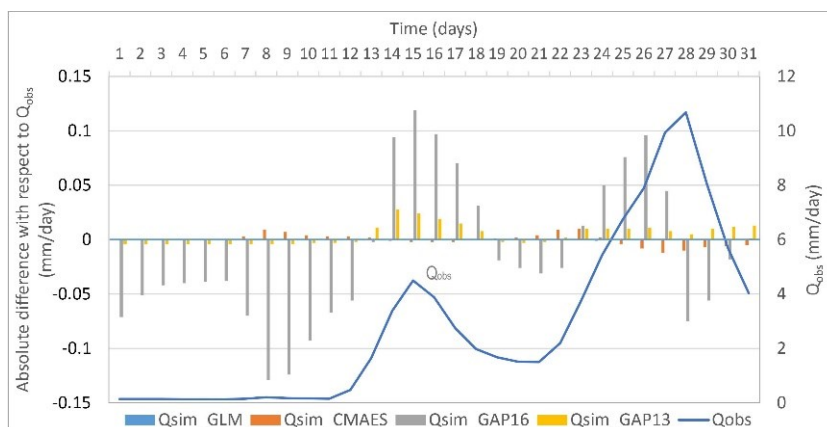
Preglednica 25: Relativni odklon parametra od "prave-vrednosti" v postopku umerjanja.

Table 25: Parameter relative deviation to "perfect fit" in the calibration procedure.

Ime parametra	GLM %	CMA-ES %	GAP16 %	GAP13 %
PERC	0	-0.01	0.41	0.92
UZL	0	0.01	0.22	-0.59
K0	0	0.07	-2.02	-0.38
K1	0	0	0.17	0.09
K2	0	-0.01	-0.49	2.16
MAXBAS	0	0.03	-0.5	-0.01
CET	0	0	-2.8	-0.97
TT	0	0	0	0
CFMAX	0	-0.68	-6.93	0.3
SP	0	0.9	12.08	-
SFCF	0	0.03	-1.72	0.3
CFR	-0.02	-2.59	10.4	-
CWH	0	-0.07	35.15	-
FC	0	0	2.07	0.25
LP	0	0	3.27	-0.02
BETA	0	-0.01	4.29	-0.19

V postopku GLM z regularizacijo je doseženo skoraj popolno ujemanje med dejanskimi in umerjenimi parametri, pri čemer odstopa le 0,02 % CFR (koeficient zmrzovanja), ki prikazan v drugem stolpcu v preglednici (Preglednica 25). To malo odstopanje (šum) je verjetno posledica izračuna. Razlike se pojavijo po tretjem decimalnem mestu. Pojasniti jih je mogoče z enačbo za izračun zamrzovanja taline snega (RM), ki je definirana kot $RM = CFR \cdot CFMAX \cdot (TT - T(t))$ in vsebuje tri parametre in eno spremenljivko [11,59,82,83]. Če ima parameter v funkciji, kot je CFR , neodvisne povezave z drugimi parametri, ga zaradi prevelike parametrizacije ni mogoče ustrezno izračunati. Zato je priporočljivo določiti vrednost takega parametra na podlagi strokovnega znanja modelista. Ker povodje nima

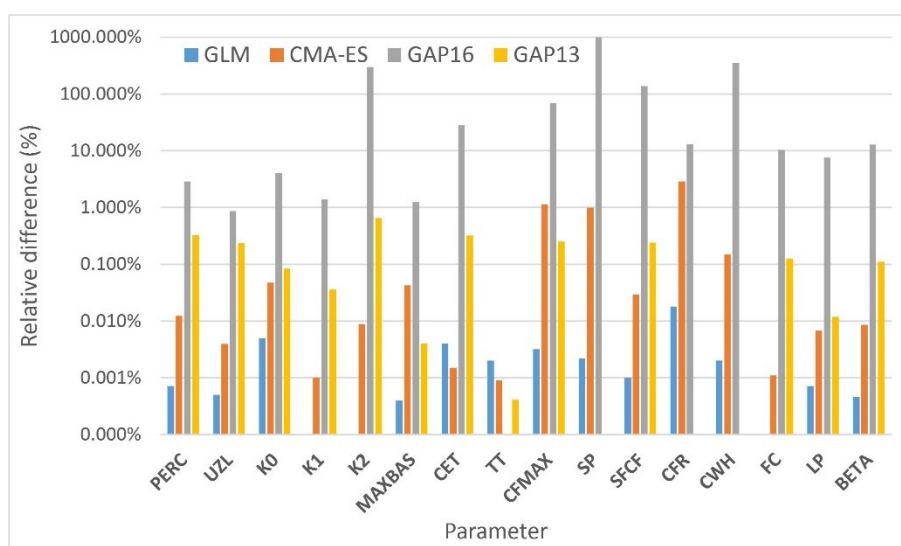
višinskih območij, je bil pojav zamrznitve taline snega tudi v opazovanem obdobju razmeroma redek. Rezultati kalibracijskega postopka z GLM so grafično predstavljeni na slikah (Slika 37 in Slika 38).



Slika 37: Absolutna razlika Q_{obs} za različne postopke umerjanja v obdobju umerjanja od 1. 3. 1985 do 31. 3. 1985.

Figure 37: The absolute difference to Q_{obs} for different calibration procedures in the calibration period from 1 March 1985 to 31 March 1985.

Po drugi strani se vrednosti parametrov, dobljene z umerjanjem z algoritmom GAP, bistveno razlikujejo od pravih vrednosti, uporabljenih za izračun modela HBV-Land (Slika 37, Slika 38 in Preglednica 25). V primeru GAP₁₆ 10 od 16 parametrov odstopa za več kot 1 %; *SP*, *CFR* in *parametri CWH* odstopajo celo za 12 %, 10 % in 35 %. Poleg tega skupno odstopanje parametrov, dobljeno s postopkom GAP₁₆, znaša 82 %. CMA-ES je bil boljši od GAP, vendar slabši od GLM. Največje odstopanje (2,6 %) v CMA-ES je ponovno opaziti za parameter *CFR*. Drugo največje odstopanje (0,7 %) je ugotovljeno za parameter *CFMAX*. Skupno odstopanje parametrov v primeru CMA-ES je 6 %.



Slika 38: Grafična predstavitev kalibriranih parametrov z različnimi metodami za umerjanje.

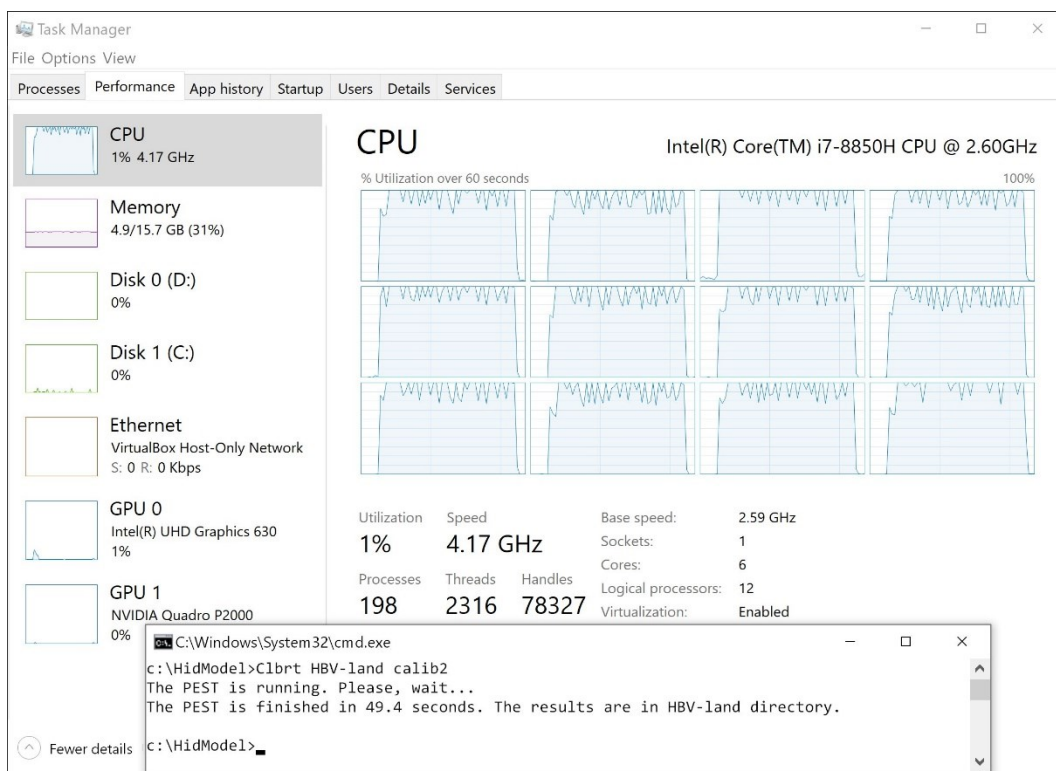
Figure 38: Graphical representation of calibrated parameters with different calibration methods.

Ko se je število parametrov v umerjevalnem nizu z GAP zmanjšalo s 16 na 13, je prišlo do učinkovitejšega umerjanja GAP-a s skupnim odstopanjem parametrov 6 %. Sto umerjenih nizov parametrov je imelo najvišjo, najmanjšo in srednjo vrednost *NSE* enako 0,999989, 0,980133 in

0,994431. Za primerjavo GAP_{16} z drugimi umerjevalnimi metodami je bil izbran niz parametrov z največjim NSE .

Številni raziskovalci so ugotovili, da je umerjanje z majhnim pretokom precej problematično [84,85]. V tej raziskavi je edino umerjanje po postopku GLM omogočilo popolno prileganje pri nizkih pretokih (Preglednica 23), ne da bi uporabili dodatna merila za umerjanje nizov podatkov z nizkim pretokom.

Relativne razlike parametrov s CMA-ES v primerjavi popolnim ujemanjem je blizu GLM, kot je prikazano v drugem stolpcu preglednice (Preglednica 25). Čas umerjanja je lahko včasih pomemben. Čas izvajanja je odvisen od moči računalnika, operacijskega sistema in od meril zaključevanja postopka umerjanja. Na to metriko moramo pogledati relativno in videti, koliko je ena metoda hitrejša ali počasnejša od druge. Za izbrani primer umerjanja hidrološkega modela izračun z vzporednim računanjem po postopku GLM traja manj kot eno minuto (Slika 39), vzporedni izračun CMA-ES traja eno uro in en izračun GAP traja dve minuti in ob tem izvede 6000 modelskih izračunov. Za doseg rezultata, prikazanih v preglednici (Preglednica 25), sto ponovitev izračunov GAP traja približno tri ure in deset minut.



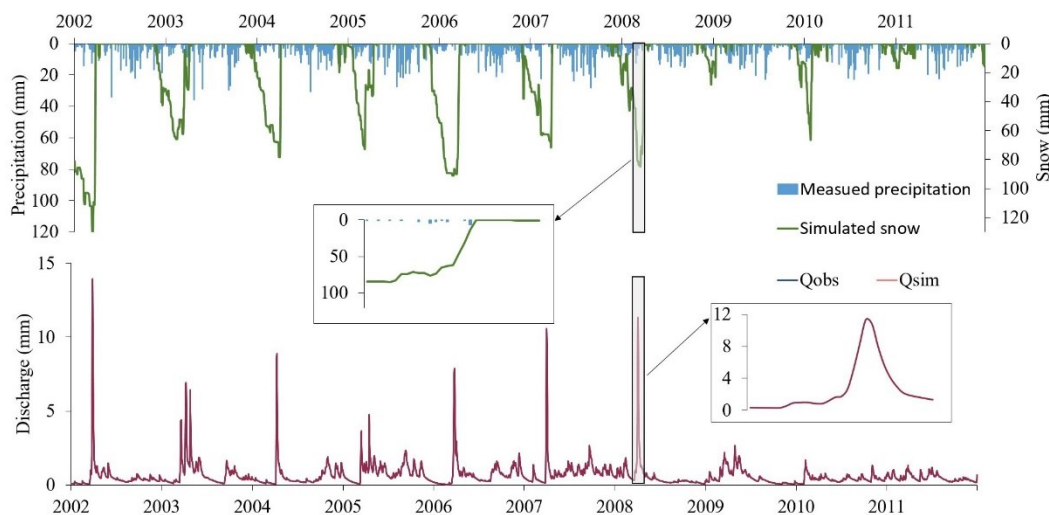
Slika 39: Zasedenost CPU-ja, ko je model umerjen z PEST_HP.

Figure 39: CPU utilization when model is calibrated with PEST_HP.

Postopek GLM je hidrološki model računal 533-krat s 14 iteracijami, CMA-ES 12.937-krat z 925 iteracijami. Za sto ponovitev s postopkom GAP je potrebnih 603.150 izračunov modela. Boljša učinkovitost postopka GLM glede števila potrebnih izračunov modela v primerjavi z metodami evolucijskih CMA-ES in GAP je torej več kot očitna. Poleg tega je postopek umerjanja GLM v vseh primerih izračunal isto vrednost NSE . Vrednosti kalibriranih parametrov so vedno ostale enake, ne glede na število ponovitev postopka umerjanja. Enake ponavljajoče rezultate je mogoče pripisati nestohastičnemu vedenju v postopkih umerjanja GLM [63], v nasprotju s stohastičnimi evolucijskimi

postopki (CMA-ES in GAP v tej primerjavi). Najmanjše odstopanje napak pri ciljni funkciji je bila v postopkih GLM dosežena v vseh primerih.

Rezultati validacije (potrjevanje, angl. validation) so bili podobni rezultatom umerjanja, vendar nekoliko slabši pri vseh postopkih. Vendar pa so razlike, zlasti pri modelih, umerjenih z uporabo GAP, relativno večje. Rezultati validacije s postopkom umerjanja GLM so grafično predstavljeni na sliki (Slika 40).



Slika 40: Obdobje validacije od 1. 1. 2002 do 31. 12. 2011, potrjeno z GLM.

Figure 40: Validation period 1 January 2002 to 31 December 2011, validated with GLM.

Za model, ki temelji na umerjanju GLM, ima *NSE* za obdobje umerjanja in validacije isto vrednost *NSE* = 1 (tabela 7). Za model, ki temelji na kalibracijskih parametrih GAP, se *NSE* zmanjša z 0,9996 za obdobje umerjanja na 0,9983 za obdobje validacije (Preglednica 26).

Preglednica 26: Rezultati validacije modela za obdobje od 1. 10. 2001 do 31. 12. 2011.

Table 26: Validation results of the model for the period 1 October 2001 to 31 December 2011.

Merila uspešnosti modela ¹	Popolna-vrednost	GLM	CMA-ES	GAP ₁₆	GAP ₁₃
Koeficient določenosti (R ²)	1	1	0.999995	0.998259	0.999989
Modelska učinkovitost (<i>NSE</i>)	1	1	0.999994	0.998092	0.999987
Učinkovitost Kling-Gupta (KGE)	0.999987	0.99998	0.99924	0.984518	0.998326
Učinkovitost Kling-Gupta "ne-parametrična" (NPE)	0.999811	0.99981	0.999562	0.987471	0.998312
Učinkovitost pri log(Q)	1	1	0.999992	0.993776	0.999872
Pretočno-utežena učinkovitost	1	1	0.999995	0.998288	0.999996
Srednja razlika	- 0.001665	- 0.0035	0.029267	- 2.79455	- 0.31087
Učinkovitost vršnih pretokov	1	1	0.999982	0.995386	0.999985
Napaka volumna	0.999993	0.99999	0.999879	0.988476	0.998718
MARE merilo	0.999205	0.99921	0.998851	0.970793	0.994208
Lindstrom-ovo merilo	1	1	0.999982	0.99694	0.999859
Spearman-ovo rangiranje	1	1	0.999996	0.998679	0.999981
Učinkovitost nizkih pretokov	1	1	0.999977	0.980824	0.999784
Razlika nizkih pretokov	0.001	- 0.007	0.232	- 11.999	- 2.27

¹ Rezultati so zaokroženi na šesto decimalno mesto.

Brilly et al. [86] so v okviru širše študije poročali o uporabi predlaganega kombiniranega postopka, implementiranega v programski opremi PEST na realnem modelu, to je porečju Savinje v Sloveniji.

Povprečna vrednost NSE za umerjanje modela za 21 podporečij je bila 0,85, kar kaže, da ima predlagana metodologija velik potencial tudi za modeliranje več podporečij. Vendar je to prvi prispevek, ki preizkuša uporabo kombiniranega postopka GLM na sintetičnem modelu padavin in odtoka, kjer so iz modela izključene vse druge vrste šuma, razen umerjevalnega šuma. Primerjava rezultatov vseh treh metod umerjanja, uporabljenih v tej raziskavi, kaže, da je bil umerjevalni šum izključen samo s kombinirano metodo GLM.

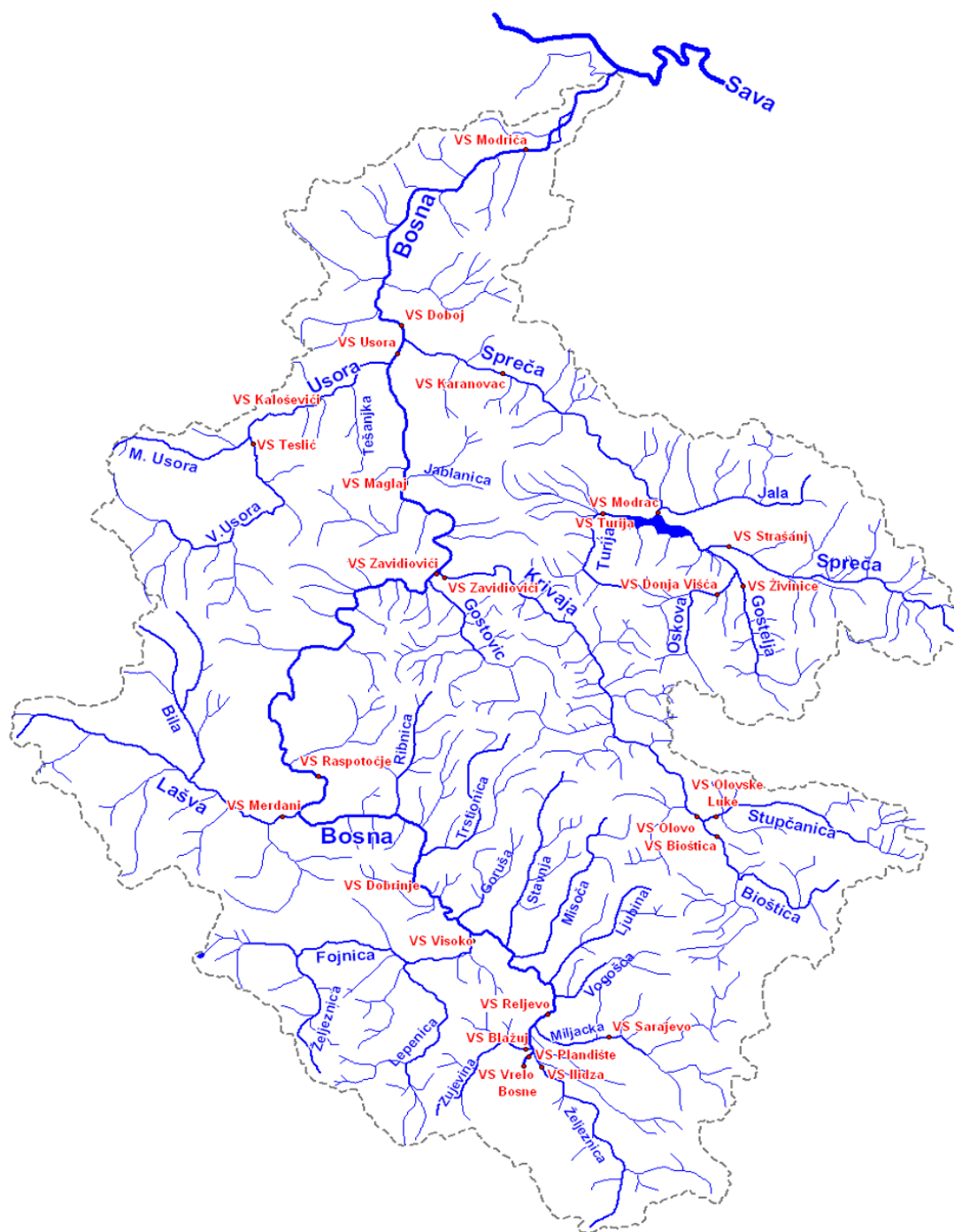
»Ta stran je namenoma prazna«

3.2 UMERJANJE MODELA REKE BOSNE

V maju 2014 so se v spodnjem porečju reke Save pojavile ekstremne poplave, ki so povzročile veliko škodo, kar je imelo katastrofalne posledice. Uničujoče poplave so redkost in edinstven pojav, ki sproži poglobljeno hidrološko analizo. To lahko vključuje uporabo različnih orodij statistične analize, vključno s hidrološkim modeliranjem [87–90]. Na podlagi zbranih podatkov smo analizirali vremenske razmere v porečju Bosne in Hercegovine (BiH) in podali hidrološke razmere, vključno z rezultati analize verjetnosti velikosti zabeleženih padavin in pretokov. Hidrološki model porečja reke Bosne je bil razvit s pomočjo hidrološkega programa HBV-light za učinkovitejšo rekonstrukcijo in napovedovanje takšnih dogodkov. Namreč v katastrofalnem dogodku je bilo več hidroloških postaj uničenih na vodotokih pritokov in spodnjem toku reke Bosne. Uničeno je bilo zaradi velikih hitrosti vodnega toka in predvsem plavja. Vse analize so potrdile, da je bil dogodek v maju 2014 izjemen izredni dogodek, katerega povratno obdobje je močno preseglo 100 let [91].

3.2.1 Opis porečja

Porečje reke Bosne od njenega povirja izliva v reko Savo zajema področje, veliko 10.836 km². Reka teče od juga proti severu. Povirje je v dinaridih z vršaci, ki presegajo 2000 metrov, osrednji del porečja zajema hribovito območje osrednje Bosne. Spodnji del toka poteka po ravninskem območju poplavnega sveta r. Reka teče od juga proti severu. Povirje je v dinaridih z vršaci, ki presegajo 2000 metrov, osrednji del porečja zajema hribovito območje osrednje Bosne. Spodnji del toka poteka po ravninskem območju poplavnega sveta reke Save (Slika 41). Porečje je tudi po geološki sestavi izredno pestro z značilnimi območji krasa.



Slika 41: Hidrografija porečja reke Bosne.

Figure 41: Hydrography of the river basin of Bosnia.

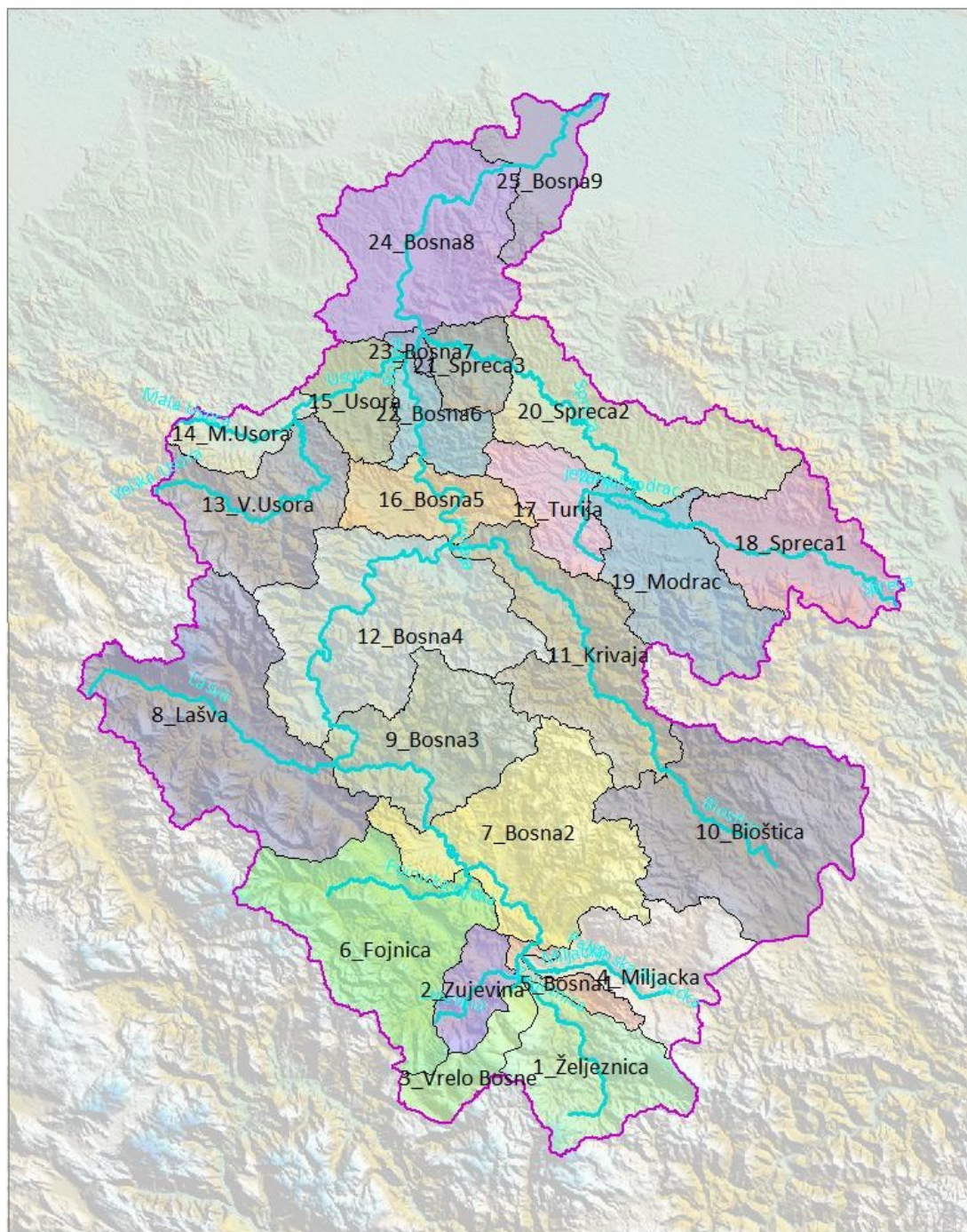
Da bi zagotovili dovolj točen model tako obsežnega in raznovrstnega območja smo porečje razdelili na podporečja, ki so tako velika, kot je to le mogoče, da pokrivajo le področje enega velikega pritoka. Kot rezultat je bilo porečje razdeljeno na 25 podporečij s površinami od 30 do 1.000 km² (Preglednica 27 in Slika 42).

Preglednica 27: Seznam podporečij v porečju reke Bosne s prispevnimi površinami v (km²).Table 27: List of sub-catchments within the Bosna river basin area in (km²).

Št. podporečja	Ime podporečja	Vodotok	Površina podporečja (km ²)
1	Željeznica	Željeznica	433,43
2	Zujevina	Zujevina	155,19
3	Vrelo Bosne	Bosna	169,14
4	Miljacka	Miljacka	412,91
5	Bosna1	Bosna	84,13
6	Fojnica	Fojnica	729,36
7	Bosna2	Bosna	773,76
8	Lašva	Lašva	958,18
9	Bosna3	Bosna	518,46
10	Bioštica i Stupčanica	Krivaja	890,73
11	Krivaja	Krivaja	603,42
12	Bosna4	Bosna	892,00
13	V_Usora	Usora	480,72
14	M_Usora	Usora	158,93
15	Usora	Usora	206,72
16	Bosna 5	Bosna	266,34
17	Turija	Turija	233,03
18	Spreča1	Spreča	463,30
19	Modrac	Spreča	495,87
20	Spreča2	Spreča	596,49
21	Spreča3	Spreča	160,10
22	Bosna6	Bosna	182,29
23	Bosna7	Bosna	29,38
24	Bosna8	Bosna	690,79
25	Bosna9	Bosna	251,54
		Vsa podporečja	10.836,20

Vsa podporečja so bila razdeljena v cone glede na nadmorsko višino (3 cone) in glede na vegetacijo. Višinske cone so do 700 metrov, od 700 do 1400 metrov in nad 1400 metrov. Južni del porečja reke

Bosne je dokaj gorat in posledično imajo podporečja na tem območju po tri cone nadmorske višine (Slika 44, Preglednica 28). Podporečje v ravninskem delu (severni del porečja), kjer nadmorske višine večinoma ne presežejo 700 m, smo razdelili na dve coni nadmorske višine (Slika 44). Vsaka cona nadmorske višine je bila nato razdeljena še v dve skupini glede na pokritost tal (Slika 43) v tako imenovani vegetacijski coni: gozd in polje (ne-gozd).



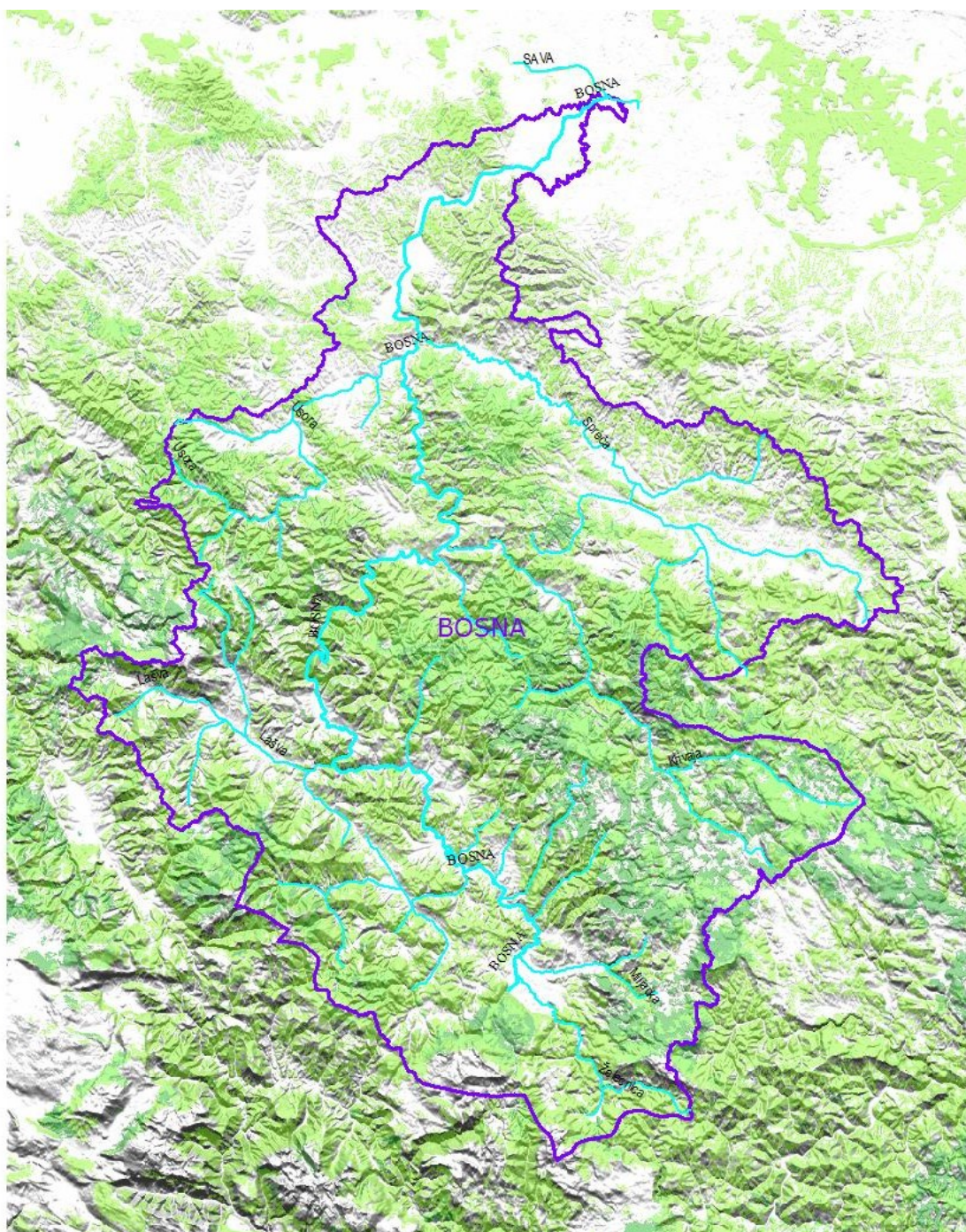
Slika 42: Model porečja reke Bosne z vsemi podporečji zajetimi v modelu.

Figure 42: Model of the Bosnia river basin with all the sub-catchments covered in the model.

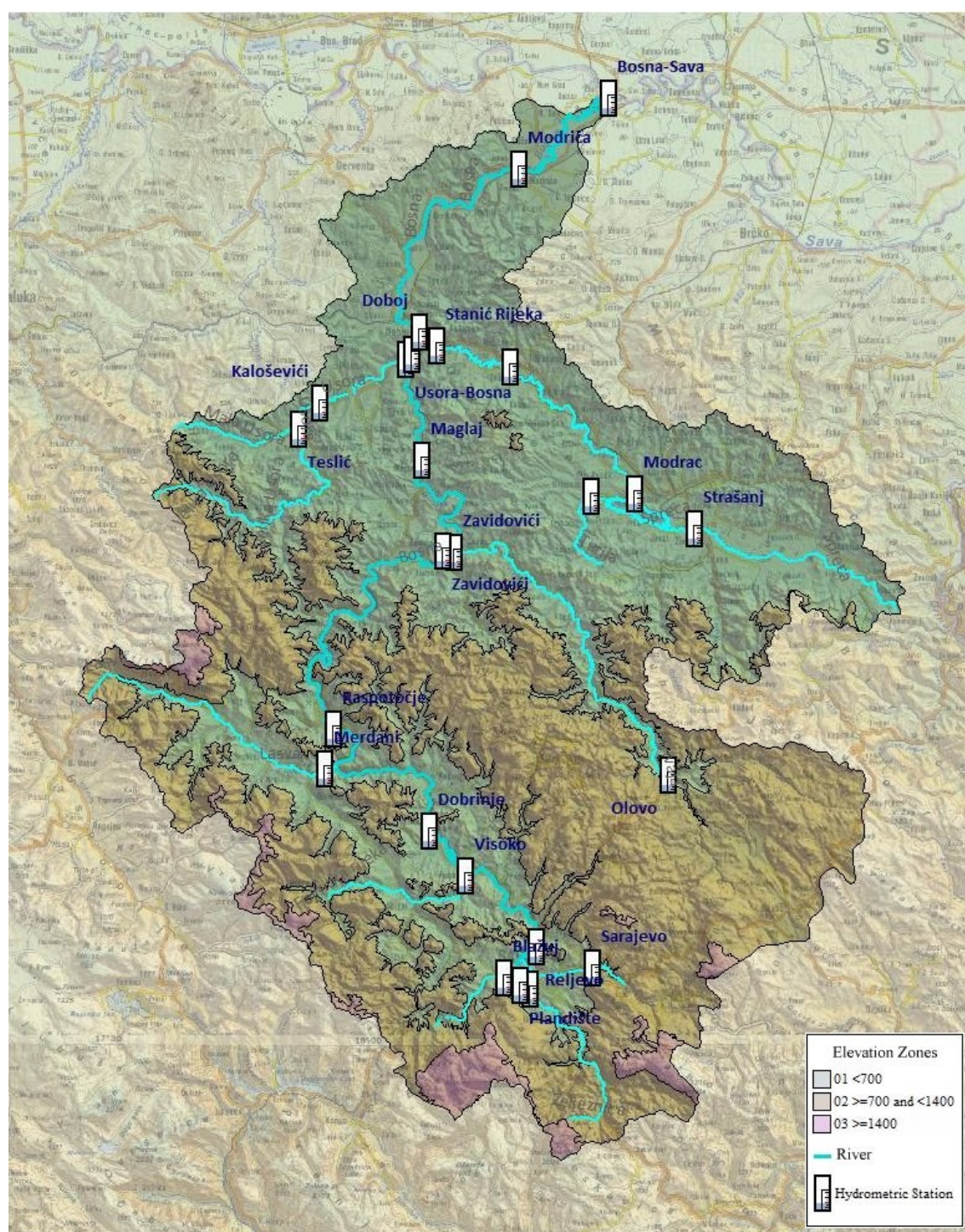
Preglednica 28: Lastnosti podporečij reke Bosne.

Table 28: Properties of Bosnia river catchment.

		(km ²)	(km ²)	(km ²)	(km ²)	(%)	(%)	(%)
#	Ime podporečja	Površina (km ²)	01<700m	02>=700m <1400m	03>=1400m	01<700m	02>=700m <1400m	03>=1400m
1	Željeznica	433.43	43.43	312.49	77.51	0.1	0.72	0.18
2	Zujevina	155.19	71.75	77	6.44	0.46	0.5	0.04
3	Vrelo Bosne	169.14	11.42	62.26	95.46	0.07	0.37	0.56
4	Miljacka	412.91	44.47	335.09	33.35	0.11	0.81	0.08
5	Bosna1	84.13	48.12	34.01	2	0.57	0.4	0.02
6	Fojnica	729.36	238.98	431.59	58.79	0.33	0.59	0.08
7	Bosna2	773.76	281.57	489.38	2.8	0.36	0.63	0
8	Lašva	958.18	318.31	571.28	68.59	0.33	0.6	0.07
9	Bosna3	518.46	225.93	292.53		0.44	0.56	
10	Bioštica	890.73	25.73	865		0.03	0.97	
11	Krivaja	603.42	310.19	293.23		0.51	0.49	
12	Bosna4	892	500.82	391.17		0.56	0.44	
13	V.Usora	480.72	285.35	195.38		0.59	0.41	
14	M.Usora	158.93	143.23	15.69		0.9	0.1	
15	Usora	206.72	206.72			1	0	
16	Bosna5	266.34	261.95	4.39		0.98	0.02	
17	Turija	233.03	232.41	0.63		1	0	
18	Spreca1	463.3	442.22	21.08		0.95	0.05	
19	Modrac	495.87	393.95	101.93		0.79	0.21	
20	Spreca2	596.49	587.29	9.2		0.98	0.02	
21	Spreca3	160.1	158.36	1.73		0.99	0.01	
22	Bosna6	182.29	180.81	1.48		0.99	0.01	
23	Bosna7	29.38	29.38			1		
24	Bosna8	690.79	690.79			1		
25	Bosna9	251.54	251.54			1		
	Skupno	10836.2	5984.72	4506.55	344.94	0.55	0.42	0.03



Slika 43: Vegetacijske cone na območju porečja reke Bosne.
Figure 43: Vegetation zones in the area of the river basin of Bosnia.



Slika 44: Višinske cone porečja reke Bosne.

Figure 44: Elevation zones of the river basin of Bosnia.

3.2.2 Vhodni podatki

Naslednji vhodni podatki so potrebni za umerjanje oziroma za zagon modela:

- padavine za šest postaj,
- temperatura za šest postaj,
- pretok za triindvajset postaj in
- potencialna evapotranspiracija za šest postaj.

Podatki o temperaturi in padavinah so bili pripravljeni z enodnevnim časovnim korakom. Časovni korak podatkov o evapotranspiraciji je po navadi večji kot ta v modelu, zato je potrebna prilagoditev časovnemu koraku modela, kar pa model naredi samodejno. V tem primeru so povprečne mesečne vrednosti (mm/dan), transformirane v eno, dnevni časovni korak z linearno interpolacijo in nato, modificirane z upoštevanjem faktorja ETF z uporabo enačbe (24):

$$\text{Potencialna evapotranspiracija} = E_{pot}(1 + ETF(T - T_{norm})) \quad (24)$$

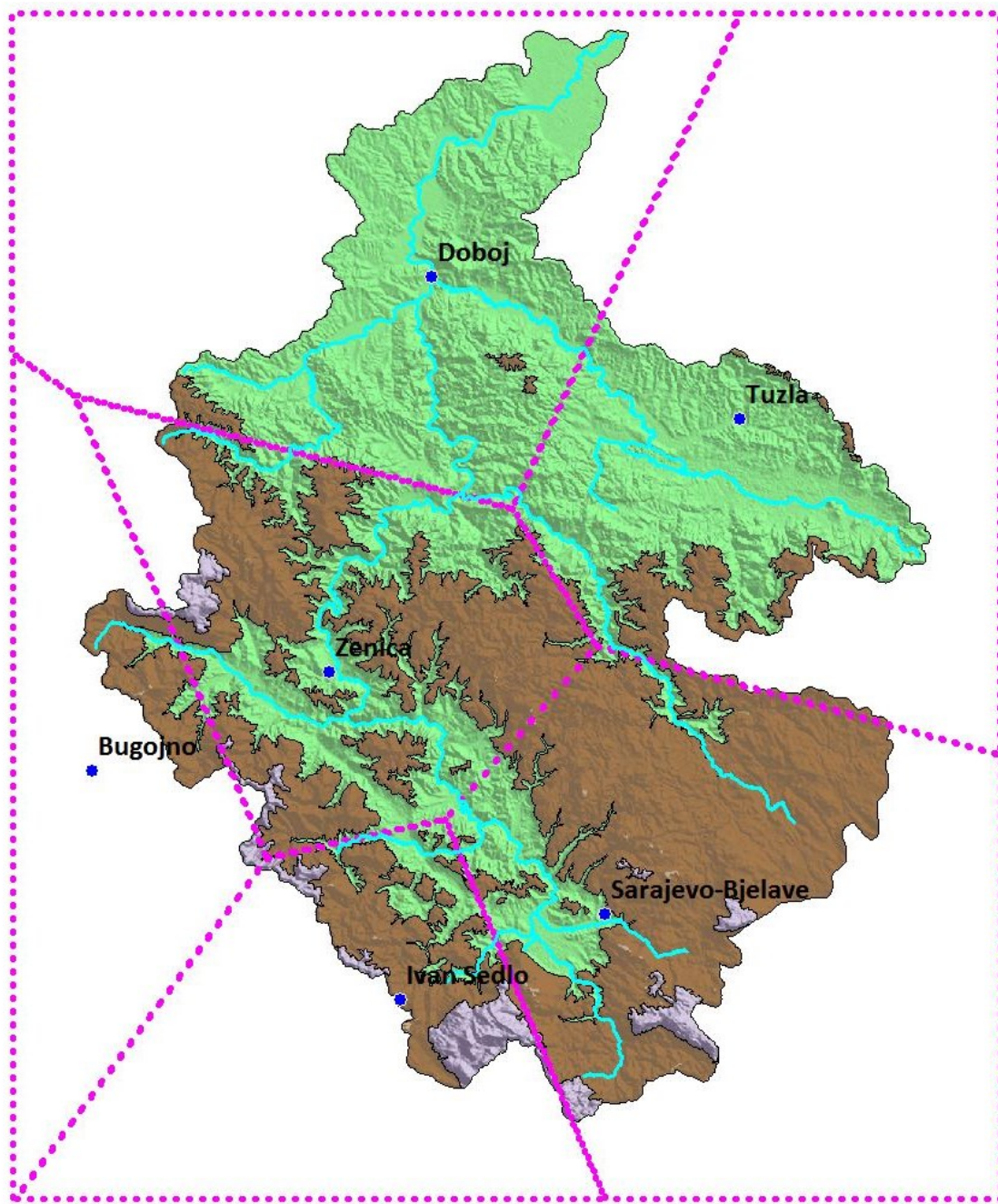
kjer je E_{pot} standardna vrednost potencialne evapotranspiracije, T dejanska temperatura in T_{norm} normalna temperatura posameznega dne v letu.

Za opis področja vplivnih točk, ki predstavljajo posamezne merilne postaje (Slika 45, Preglednica 29) smo uporabili Thiessenove poligone.

Preglednica 29: Seznam padavinskih in temperaturnih postaj ter postaj evapotranspiracije.

Table 29: List of precipitation and temperature stations and evapotranspiration stations.

#	Ime postaje	φ	λ	Nadmorska višina (m n.v.)
1	Sarajevo-Bjelave	43°52'04"	18°25'22"	630
2	Zenica	44°11'57"	17°54'02"	344
3	Tuzla	44°32'31"	18°41'06"	305
4	Bugojno	44°03'43"	17°27'02"	562
5	Ivan Sedlo	43°45'03"	18°02'10"	967
6	Gradačac	44°51'32"	18°26'30"	230
7	Olovo	44°07'74"	18°35'22"	543
11	Doboj	44°44'19"	18°05'42"	147

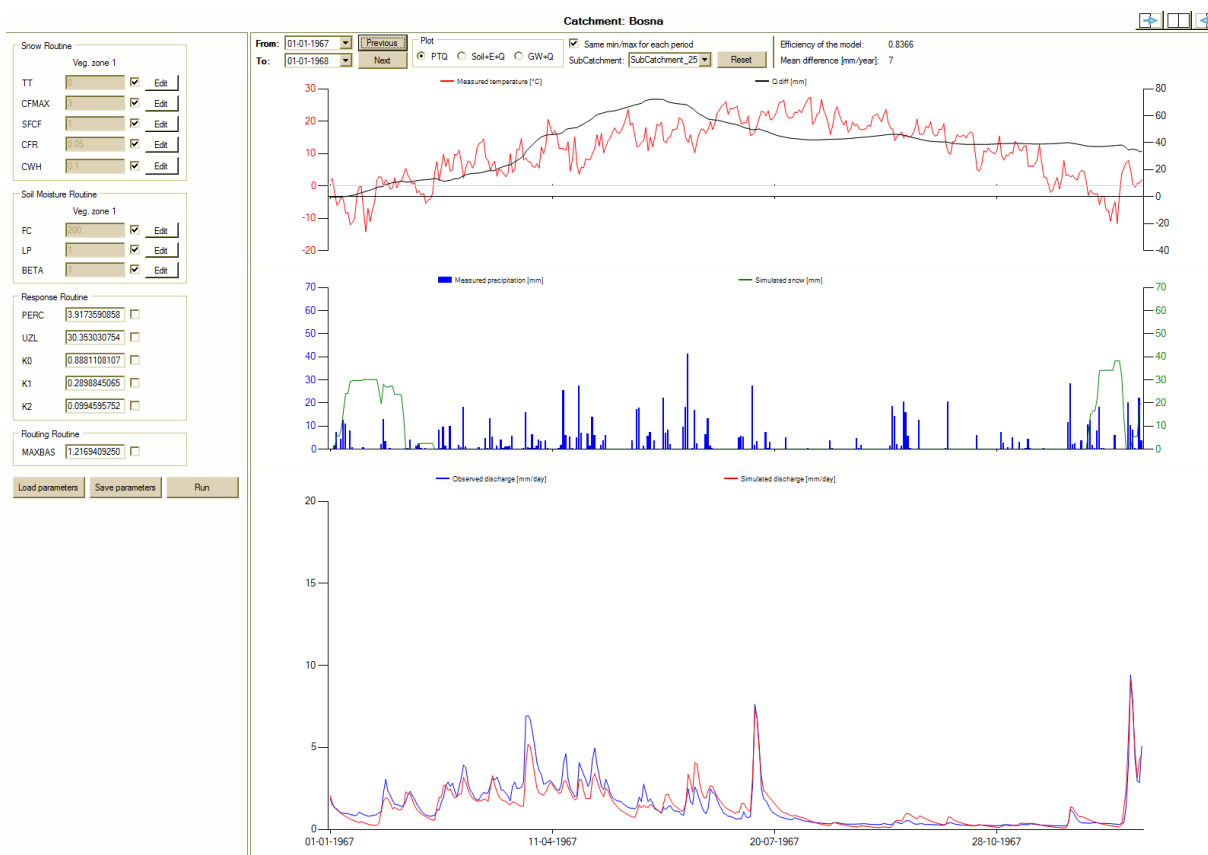


Slika 45: Porečje reke Bosne s padavinskimi postajami in s Thiessenovimi poligoni.

Figure 45: River basin of the river Bosna with the precipitation stations and Thiessen polygons.

3.2.3 Umerjanje in validacija modela

HBV-light model porečja reke Bosne je bil umerjen za obdobje 1. 1. 1964. - 31. 12. 1968. Model smo umerjali s programom PEST in programskimi orodji programa HBV-light. Zaradi časovne stiske smo za umerjanje uporabili tudi orodja samega programa HBV-light imenovanega GAP, ki pa pri tako kompleksnem modelu ne daje najboljših rezultatov, kar je tudi razvidno iz preglednice (Preglednica 30) in slike (Slika 46). Namreč pri umerjanju celotnega porečja ne dobimo najbolj primernih rezultatov za posamezne dele porečja, predvsem za pritoke.



Slika 46: Umerjanje hidrološkega modela za reko Bosno.
Figure 46: Calibration of hydrological model for the river Bosna.

Preglednica 30: Rezultati umerjanja modela 1. 1. 1964 - 31. 12. 1968.
Table 30: Calibration results of the model 1 January 1964 – 31 December 1968.

Vodotok	SL_IME	ID_IME	NSE
Željeznica	Željeznica	01-Ilidža	0,3
Zujevina	Zujevina	02-Blažuj	-0,5
Bosna	Bosna1	03-Plandište	-1,2
Miljacka	Miljacka	04-Sarajevo	-0,1
Bosna	Bosna2	05-Reljevo	0,4
Fojnica	Fojnica	06-Visoko	-1,7
Bosna	Bosna	07-Dobrinje	0,4
Lašva	Lašva	08-Merdani	0,5
Bosna	Bosna3	09-Raspotočje	0,5
Krivaja	Krivaja	10-Olovo	0,1
Krivaja	Krivaja	11-Zavidovići K	0,4

se nadaljuje...

...nadaljevanje

Bosna	Bosna4	12-Zavidovići_B	0,7
V.Usora	V.Usora	13-Teslić	0,3
Usora	M.Usora	14-Kaloševiči	0,3
Usora	Usora	15-Usora-Bosna	0,3
Bosna	Bosna5	16-Maglaj	0,8
Turija	Turija	17-Turija	
Spreča	Spreča1	18-Strašanj	-0,4
Spreča	Modrac	19-Modrac	-0,1
Spreča	Spreča2	20-Karanovac	0,2
Spreča	Spreča3	21-Stanić Rijeka	
Bosna	Bosna6	22-Usora	0,8
Bosna	Bosna7	23-Doboj	0,8
Bosna	Bosna8	24-Modriča	0,8
Bosna	Bosna9	25-Bosna-Sava	0,8

Preglednica 31: Preverjanje modela za obdobje 1. 1. 1984 - 31. 12. 1988.
 Table 31: Model verification for the period 1 January 1984 – 31 December 1988.

Vodotok	SL_IME	ID_IME	NSE
Željeznica	Željeznica	01-Ilidža	0
Zujevina	Zujevina	02-Blažuj	-1,7
Bosna	Bosna1	03-Plandište	-1,8
Miljacka	Miljacka	04-Sarajevo	0,0
Bosna	Bosna2	05-Reljevo	0,6
Fojnica	Fojnica	06-Visoko	-3,8
Bosna	Bosna	07-Dobrinje	-0,1
Lašva	Lašva	08-Merdani	0,2
Bosna	Bosna3	09-Raspotočje	0,4
Krivaja	Krivaja	10-Olovo	-0,2
Krivaja	Krivaja	11-Zavidovići K	0,5

se nadaljuje...

...nadaljevanje

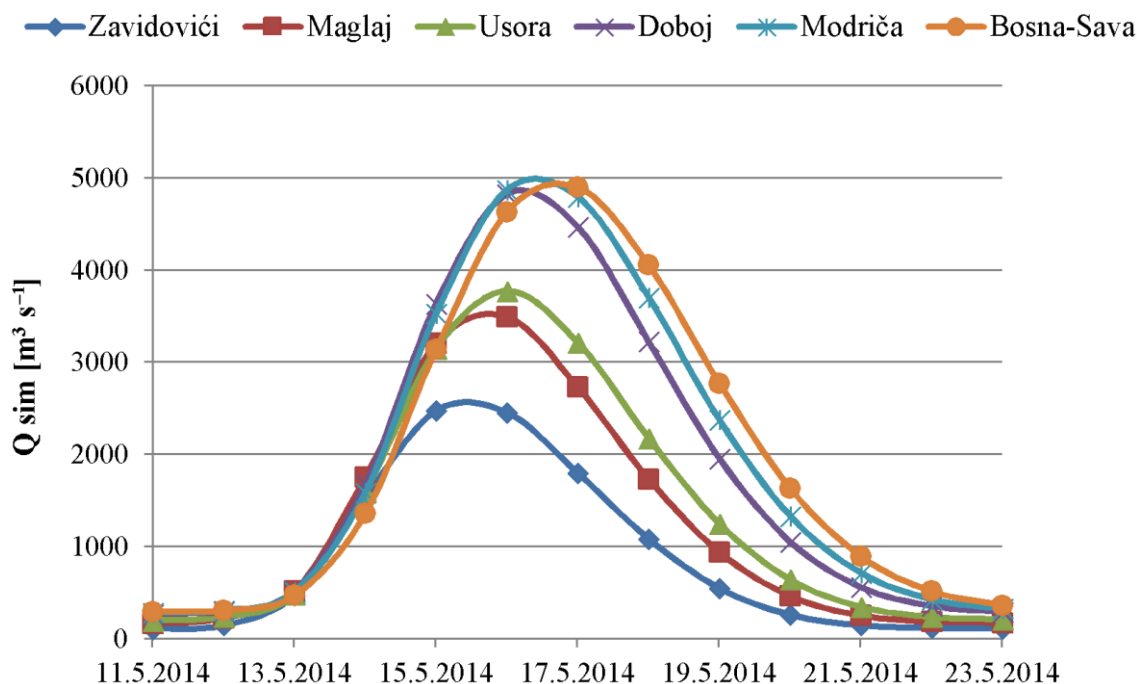
Bosna	Bosna4	12-Zavidovići_B	0,6
V.Usora	V.Usora	13-Teslić	0,3
Usora	M.Usora	14-Kaloševici	0,3
Usora	Usora	15-Usora-Bosna	0,3
Bosna	Bosna5	16-Maglaj	0,7
Turija	Turija	17-Turija	0,4
Spreča	Spreča1	18-Strašanj	0,3
Spreča	Modrac	19-Modrac	0,3
Spreča	Spreča2	20-Karanovac	0,4
Spreča	Spreča3	21-Stanić Rijeka	0,0
Bosna	Bosna6	22-Usora	0,7
Bosna	Bosna7	23-Doboj	0,8
Bosna	Bosna8	24-Modriča	0,8
Bosna	Bosna9	25-Bosna-Sava	0,8

Za preverjanje modela smo izbrali obdobje 1. 1. 1984-31. 12. 1988. Rezultati prilagajanja izračunov meritvam (Preglednica 31) so podobni kot pri umerjanju, kar pomeni, da je model z uporabljenimi orodji ustrezno umerjen.

Boljše rezultate lahko dosežemo samo z uporabo programa PEST za celoten postopek, ker bi zahtevalo več časa. V tem primeru bi tudi za posamezna podporečja dobili boljše rezultate simulacije. Namreč hidrološki sistem porečja je kompleksen z velikimi razlikami med porečjem Lašve, ki je pretežno v krasu. Lašva oblikuje pretoke s precejšnjim časovnim zamikom, porečjem Spreče, ki z zbiralnikom vode Modrac in obsežnim poplavnim območjem oblikuje na sotočju z reko Bosno odtok brez izrazitih največjih vrednosti.

3.2.4 Rezultati izračuna

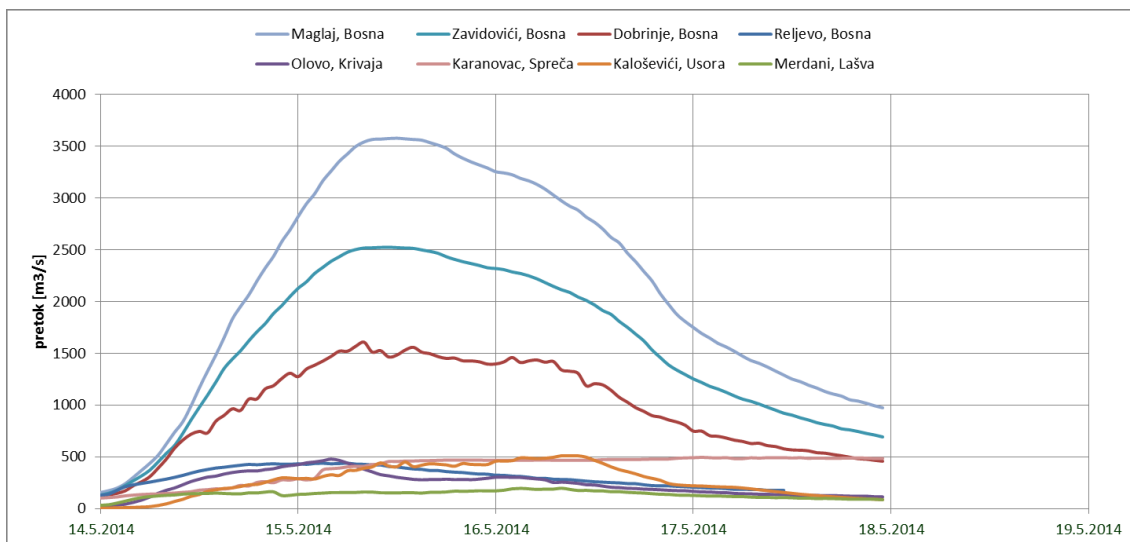
Pojav poplave maja 2014 smo simulirali z dnevnim časovnim korakom za celotno obdobje od začetka leta 2014. Rezultati so prikazani na sliki (Slika 47). Profil Doboj 1 je postavljen pod ustje reke Spreče in profil Doboj 2 se nahaja nad ustjem reke Usore. Rezultati kažejo nekoliko večje vrednosti pretokov in njihovo krajše trajanje. Vzrok je v parametrih modela, ki so umerjeni za nekoliko nižje vrednosti poplav, kot je bil dogodek leta 2014. Preprosto umerjeni parametri ne simulirajo ustrezno vpliva razlivanja vode, ki je v veliki meri zmanjšalo konice poplavnega vala in podaljšalo njegovo trajanje.



Slika 47: Simulirani povprečni dnevni pretoki na reki Bosni.

Figure 47: Simulated mean daily discharges on the Bosna River.

Dogodek poplavljanja v maju 2014 je bil simuliran z dnevnim časovnim korakom za obdobje april - maj 2014. Na sliki (Slika 47) je predstavljen samo ta poplavni dogodek. Modelirani izjemno visoki pretoki trajajo 3 dni kot izmerjeni (Slika 48). Pretoki so dosegli svojo največjo vrednost v Dobroju 16. maja in na sotočju z reko Savo, naslednji dan, 17. maja. Visoki pretoki, simulirani z modelom, so bili zaradi neustrezne simulacije sproščanja vode na poplavnih območjih nekoliko višji od ocenjenega. Koeficienti odtoka za največji poplavni val v maju za Bosno so se gibali med 0,76 (reka Bosna na vodni postaji Modriča) in 0,91 (reka Bosna pod sotočjem s pritokom Usore). Koeficient odtoka za Bosno v mestu Doboj je bil 0,82 [61,92,93].



Slika 48: Izmerjeni hidrogrami poplavnih valov pri poplavi maja 2014.

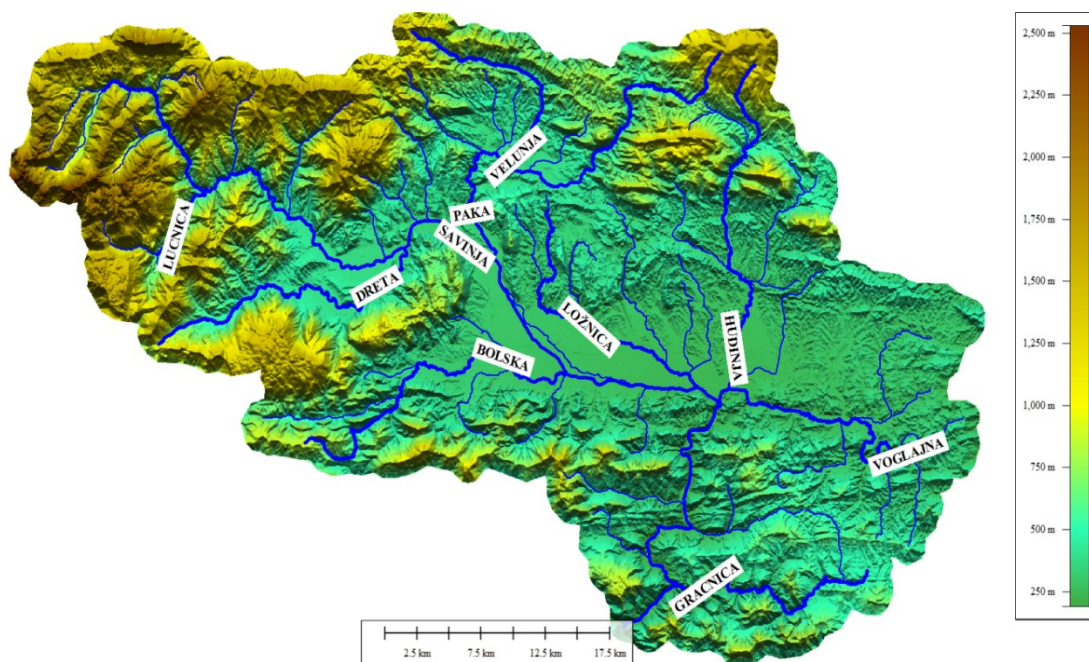
Figure 48: Measured flood wave hydrograms in the flood of May 2014.

Na sliki so prikazani merjeni pretoki na porečju. VP Maglaj je zadnja po toku vode reke Bosne navzdol, ki je prestala poplavni dogodek. Ostale hidrološke postaje dolvodno, kot so Doboj, Modriča in Šamac, so bile poškodovane. Na samo največjo vrednost po reki navzdol od VP Zavidovići je vlivalo sovpadanje maksimalnih pretokov reke Bosne in Krivaje ter sočasen pritok manjših vodotokov ne tem odseku. Reka Lašva ne kaže izrazitega poplavnega vala, je pa imela ves čas visoke pretoke, ki niso presegli pretokov iz leta 2010. Reka Usora je polagoma naraščala in je dosegla največjo vrednost šele 16. maja in je zmanjšala svoje pretoke hkrati z reko Bosno. Pretoki reke Spreče so, polagamo naraščali in so dosegli največjo vrednost 17. maja. Zanimivo je, da je tudi reka Sava dosegla največja vrednost pri vodomerni postaji Šamac neposredno pod vtokom reke Bosne 17. maja. Iz podatkov pretokov reke Save in modela reke Bosne sledi, da so pretoki reke Bosne bili celo nekoliko večji od pretokov reke Save na sotočju.

Vsak pojav ekstremnih poplav je kompleksen in je posledica naključja različnih dejavnikov. Da bi jo lahko razumeli, so potrebne ustrezne analize podatkov in simulacije z dobro umerjenim hidrološkim modelom.

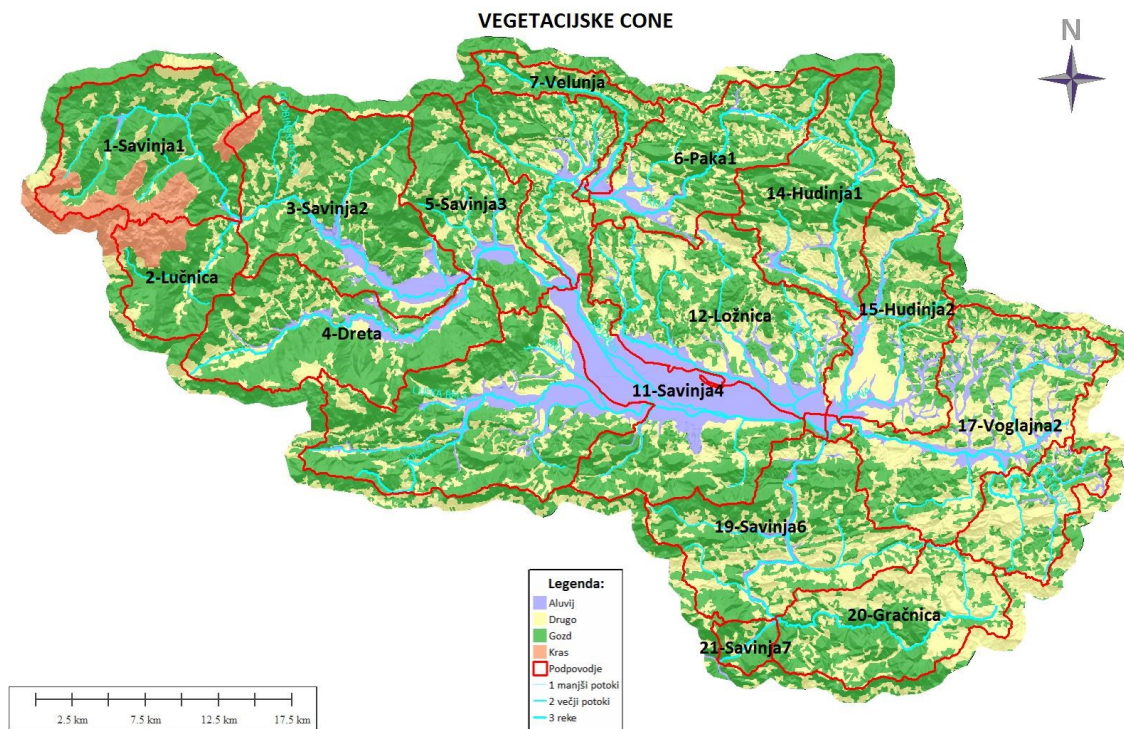
3.3 UMERJANJE MODELA REKE SAVINJE

Savinja je najmočnejši pritok reke Save v Sloveniji. Njeno porečje se razprostira od Savinjskih Alp in Karavank preko Celjske kotline do izliva v Savo (Slika 49). Njen tok je dolg 101.75 km in ima hudourniški značaj. Ob nastopu visokih voda Savinja bistveno prispeva k visokovodni konici spodnjega toka reke Save in pogosto tudi oblikuje vrh poplavnega vala reke Save dolvodno od sotočja. Na sliki (Slika 49) je prikazano porečje Savinje in mreža vodotokov na topografski podlagi. Celotno porečje Savinje pokriva 1852,3 km².



Slika 49: Porečje Savinje z označeno rečno mrežo.
Figure 49: Savinja catchment with marked river network.

Večji desni pritoki Savinje so: Lučnica (Luče), Dreta (Nazarje), Bolska (Prebold) ter Rečica (Laško), večji levi pritoki Savinje so: Paka (Letuš), Ložnica (Levec), Hudinja in Voglajna (Celje) ter Gračnica (Rimske Toplice). Ostali manjši vodotoki so, z vidika vodne bilance in pomembnosti, pri velikih poplavnih dogodkih zanemarljivi. V zgornjem toku Savinje do Nazarij je porečje gorato z nadmorskimi višinami več kot 2000 metrov z najvišjo točko 2429 m. Zgradba površja je iz karbonatnih kamnin, apnenca in dolomita. Srednji, pretežno ravninski del leži med 200 in 400 metri nadmorske višine, grajen iz skrilavcev, tufov, peščenjakov in glin. Na podlagi klasifikacijske sheme SCS [94] prevladujejo hidrološke skupine zemljin B s povprečnim do nizkim odtočnim potencialom in povprečno stopnjo infiltracije vode, od 3.85 do 7.50 mm na uro [95]. Skoraj 60 % porečja pokriva gozd (Slika 50). Aluvialne ravnine in rečne doline so gosteje naseljene in v glavnem namenjene kmetijstvu. Ta področja so tudi najbolj izpostavljena poplavam. Slika 50 prikazuje različna vegetacijska območja v porečju Savinje. Tako smo v modelu ločeno podali kraška območja, območja, pokrita z gozdom, območja, kjer lahko najdemo aluvialne naplavine ter ostala območja, ki ne pripadajo nobenih izmed prej naštetih skupin. Osnova za določitev vegetacijskih območij je bila karta pokrovnosti tal Corine Land Cover (CLC) [96], ki je skupna Evropska klasifikacija rabe tal. Za določitev kraških območij so bili uporabljeni tudi podatki o lokacijah kraških jam na porečju Savinje (predvsem povirni deli porečja, ki so v severozahodnem delu). Nadalje je bila upoštevana tudi osnovna Geološka karta Slovenije v merilu 1:100.000. Modeliranje različnih vegetacijskih območij je pomembno predvsem z vidika prestrežanja padavin, saj ima lahko velik vpliv na odtok vode (lahko zadrži do 25 % ali celo malce več celotne količine padavin). Tako imamo pri območjih, kjer ni vegetacije precej večje vrednosti koeficienta odtoka, kar se seveda lahko odrazi tudi v bolj neugodnih poplavnih razmerah.

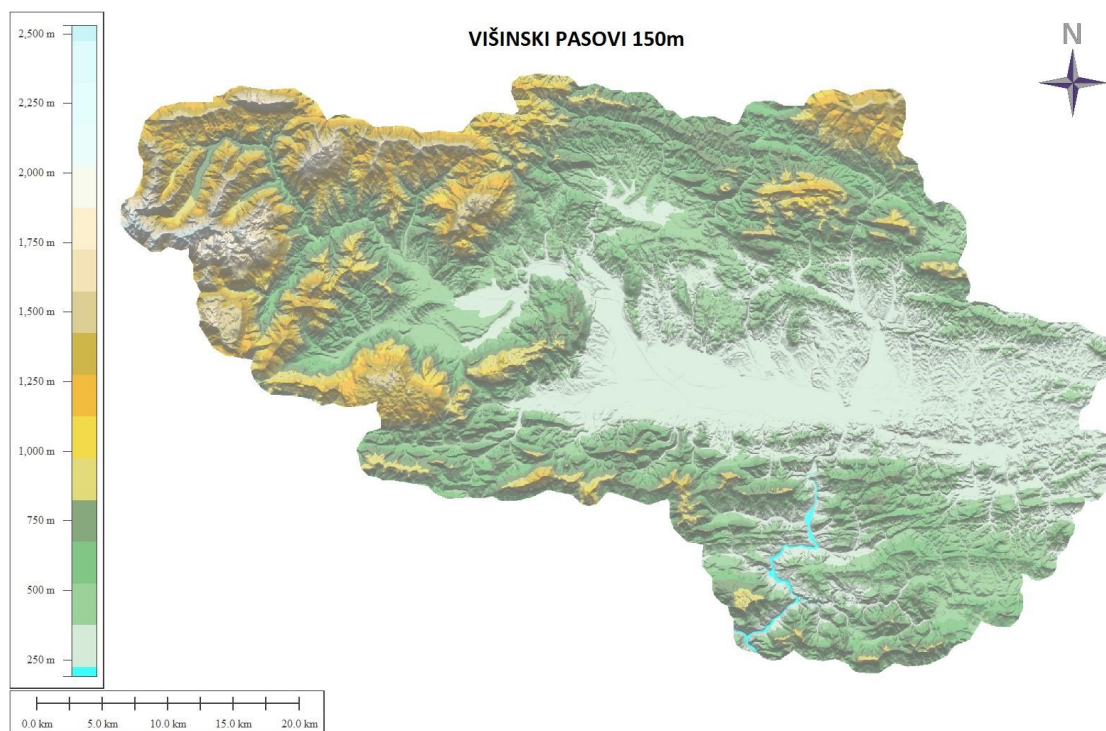


Slika 50: Definirane vegetacijske cone v porečju Savinje.

Figure 50: Defined vegetation zones in the Savinja basin.

Višinska območja pomembno vplivajo na akumuliranje in taljenje snežne odeje ter na procese evapotranspiracije zaradi ustreznega ovrednotenja sprememb temperature. Pri dvigu nadmorske višine

za 1.000 m se temperatura zniža za 9,8 °C. Slika 51 prikazuje definirane višinske pasove v porečju Savinje, ki so bili podani tudi v hidrološkem modelu. Za določitev višinskih pasov smo uporabili digitalni model višin celice 1 m x 1 m, ki je bil določen na podlagi LiDAR-ja (vir: http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas_voda_Lidar@Arso)



Slika 51: Višinski pasovi v porečju Savinje.

Figure 51: Elevation zones in the Savinja catchment.

3.3.1 Umerjanje hidrološkega modela porečja Savinje razdeljenega na 21 prispevnih površin

Pri izdelavi hidrološkega modela Savinje smo najprej definirali shemo porečja, glede na razpoložljive podatke in glede na pomembnost posameznih območij z vidika poplavne varnosti. Definirali smo 21 podporečij in določili vozlišča in območja, kjer poteka propagacija visokovodnih valov (Slika 52).



Slika 52: Računska shema celotnega porečja Savinje z vodomernimi postajami.

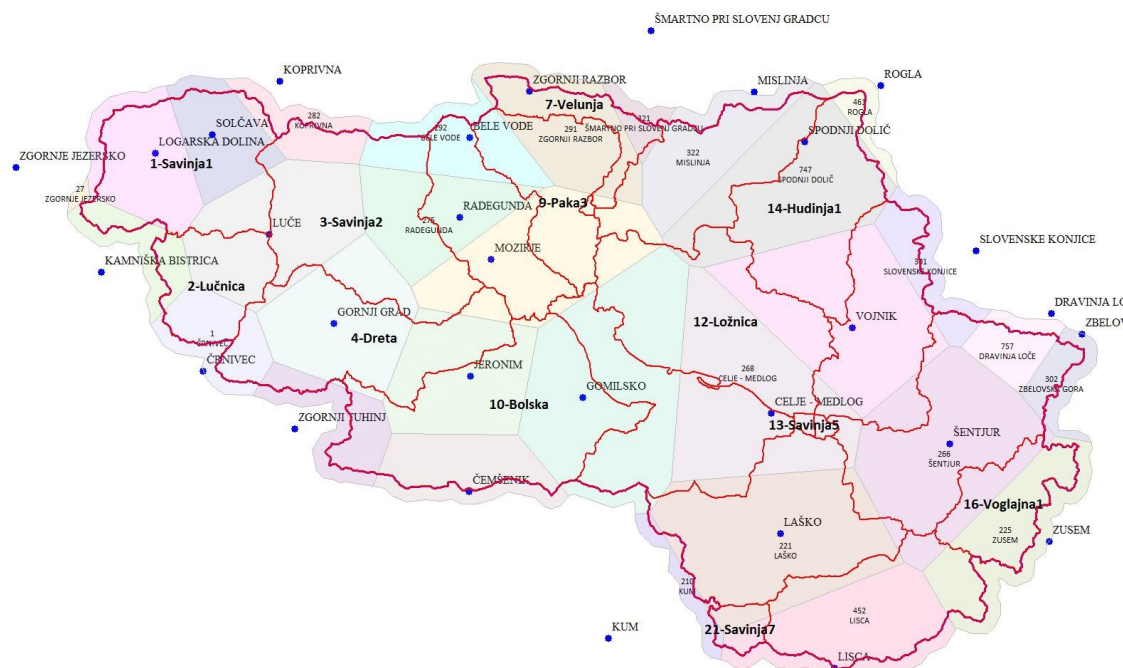
Figure 52: Calculation scheme of the entire Savinja basin with hydrometric stations.

Za simulacijo pretokov so za vsa podporečja potrebni podatki zveznih časovnih serij pretokov, padavin, temperatur zraka in potencialne evapotranspiracije. Časovni korak mora biti enak. Evapotranspiracijo pa se ponavlja podaja kot mesečna časovna serija. Za hidrološki model porečja Savinje smo uporabili urni časovni korak (pretoki, padavine in temperatura), kar omogoča modeliranje hudourniškega odziva Savinje in njenih pritokov.

Padavine poračunamo kot uteženo povprečje izmerjenih padavin izbranega območja (enačba 24):

$$P = \sum_i^N P_i c_i \quad (25)$$

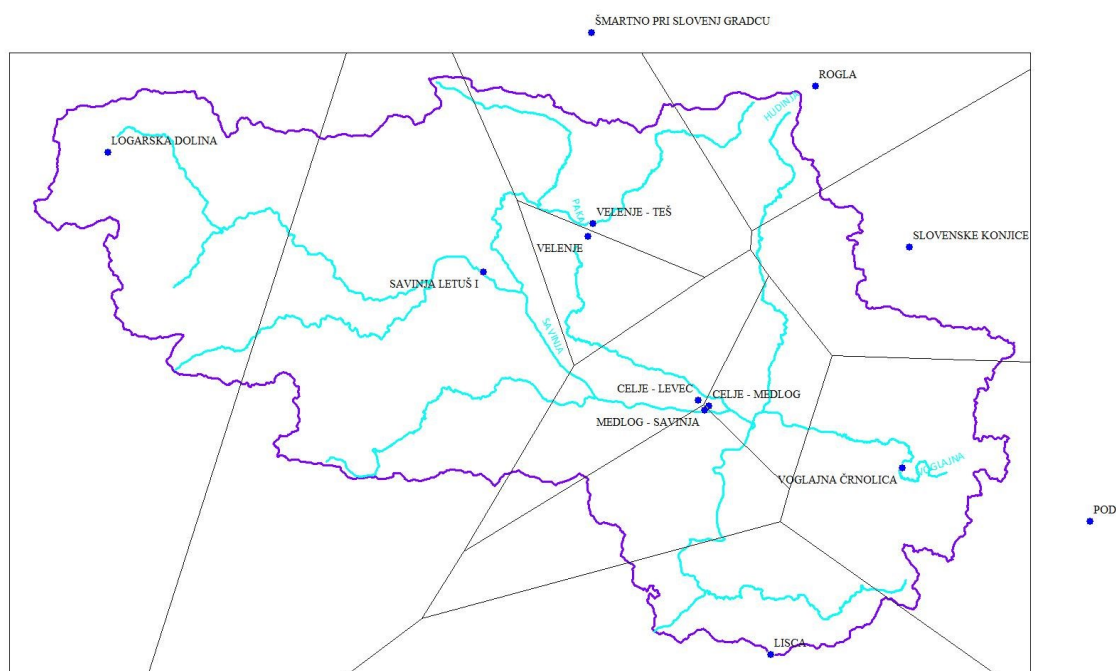
uteži c_i so določene na podlagi Voronoi/Thiessenovih poligonov. Vsaka utež predstavlja delež območja, ki jo pokriva Thiessenov poligon izbrane postaje, proti skupni površini prispevnega območja oziroma podporečja. Slika 53 prikazuje Thiessenove poligone za izbrane padavinske postaje, ki so bile podane v hidrološki model Savinje. Pri tem so bili uporabljeni urni podatki s 33 postaj. Uporabili smo tudi padavinske postaje, kjer so bili na voljo podatki z dnevnim časovnim korakom. S tem smo dosegli bolj enakomerno pokritost porečja s padavinami (Slika 53). Z uporabo Thiessenovih poligonov smo za vsako izmed 21 podporečij (Slika 53) določili delež površine, ki ga posamezna padavinska postaja prispeva k padavinam na celotnem podporečju.



Slika 53: Thiessenovi poligoni za padavinske postaje (urni podatki) na porečju Savinje.

Figure 53: Thiessen polygons for precipitation stations (hourly data) in the Savinja basin.

Za potrebe izračuna taljenja snega in akumulacije vode v snegu so pomembne in potrebne temperature zraka. Izračunane so enako s pomočjo Thiessenovih poligonov kot padavine (Slika 54). V model smo vgradili višinske cone na vsakih 150 metrov, ki so bili izračunani na osnovi digitalnega modela reliefa 1 x 1 m.



Slika 54: Thiessenovi poligoni za 12 temperaturnih postaj na porečju Savinje.

Figure 54: Thiessen polygons for 12 temperature stations in the Savinja basin.

Količina padavin kot temperatura se z nadmorsko višino spreminjata. V modelu to opišemo s parametroma *PCALT* in *TCALT*. Običajno je pri povečanju nadmorske višine za 100 m prirastek padavin 10 % do 20 %, temperatura zraka pa upade za 0.6 °C do 1 °C

Evapotranspiracijo je možno podati na tri načine: s povprečnimi letnimi dnevnimi vrednostmi, s povprečnimi dnevnimi vrednostmi posameznih mesecev ali posebej za časovni korak. Običajno podamo povprečne mesečne vrednosti. Urne ali dnevne vrednosti so potem interpolirane linearno. V hidrološkem modelu Savinje so bili podane povprečne mesečne vrednosti evapotranspiracije, pri tem smo upoštevali naslednje postaje: Celje; Maribor; Starše in Šmartno pri Slovenj Gradcu.

V hidrološkem modelu smo za umerjanje in validacijo modela uporabili tudi podatke 20 vodomernih postaj, ki so prikazane na sliki (Slika 52). Za validacijsko obdobje vse vodomerne postaje niso delovale.

Umerjanje hidrološkega modela z orodjem PEST je potekalo na podatkih iz leta 2007. Preglednica (Preglednica 32) prikazuje rezultate umerjanja hidrološkega modela za definirana podporečja. Povprečna vrednost modelske učinkovitosti Nash-Sutcliffe koeficienta učinkovitosti pri umerjanju je znašala $NSE=0,85$ za podporečja prikazana v preglednici (Preglednica 32). Pri tem smo na več območjih dosegli ujemanje med izmerjenimi ter modeliranimi vrednostmi, ki so presegale $NSE=0,95$.

Preglednica 32: Rezultati umerjanja hidrološkega modela Savinje po 21 podporečjih za leto 2007.

Table 32: Results of the calibrated hydrological model of the Savinja by 21 subcatchments for the year 2007.

Podporečje	Modelska učinkovitost NSE
Savinja-Luče	0,85
Lučnica-Luče	0,89
Savinja-Nazarje	0,96
Dreta-Kraše	0,97
Savinja-Letuš	0,98
Paka-Velenje	0,87
Velunja-Gaberke	0,77
Paka-Šoštanj	0,76
Paka-Rečica	0,6
Bolska-Dolenja vas	0,9
Savinja-Medlog	0,95
Ložnica-Levec	0,93
Savinja-Celje-brv	0,94
Hudinja-Polže	0,83
Hudinja-Škofja vas	0,84

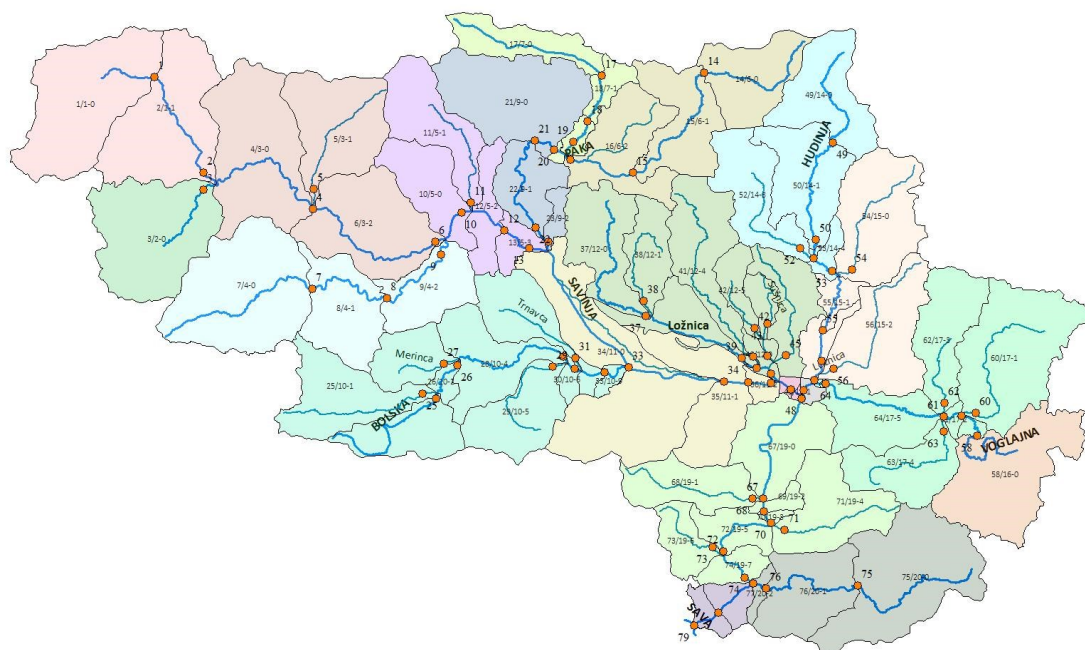
se nadaljuje...

...nadaljevanje

Voglajna-Črnolica	0,77
Voglajna-Celje	0,72
Hudinja-Zagrad	0,83
Savinja-Laško	0,93
Gračnica-Vodiško	0,73
Savinja-Veliko Širje	0,77

3.3.2 Umerjanje hidrološkega modela porečja Savinje razdeljenega na 77 prispevnih površin

Za potrebe hidravličnega modeliranja je bil izdelan še podrobnejši hidrološki model porečja Savinje, kjer smo celotno območje razdelili na 77 prispevnih površin (Slika 55) oziroma podporečij. Enako kot pri prejšnjem bolj grobem modelu je bila tudi v podrobnejšem modelu narejena razdelitev na višinske pasove in vegetacijske cone. Slika 55 prikazuje označena vozlišča modela, ki je bil razdeljen na 77 delov. Tudi v modelu s 77 porečji je bilo potrebno definirati povezave med posameznimi podporečji.

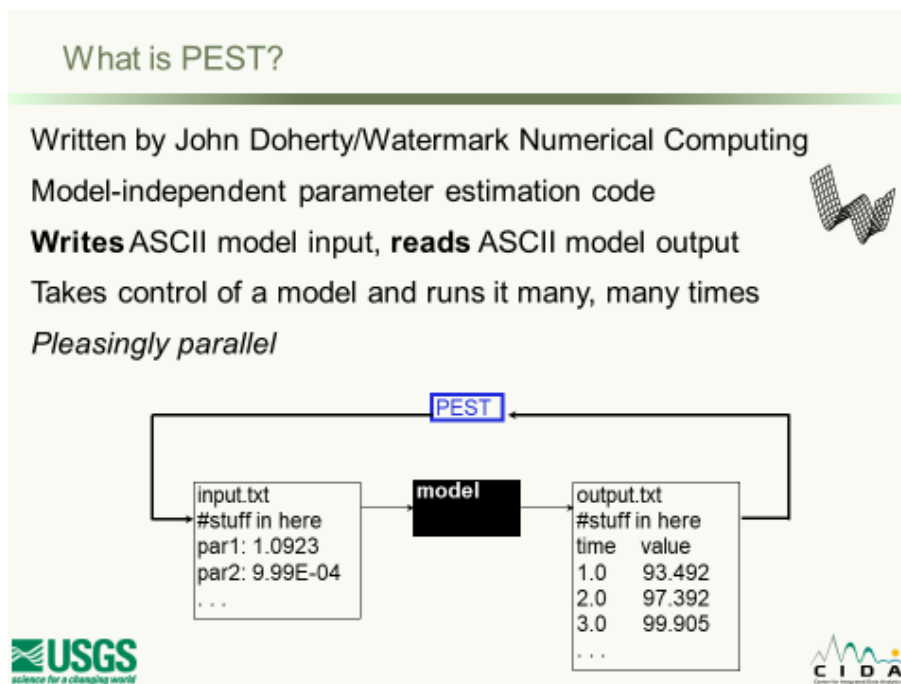


Slika 55: Shema porečja Savinje, ki smo ga razdelili na 77 prispevnih območij.

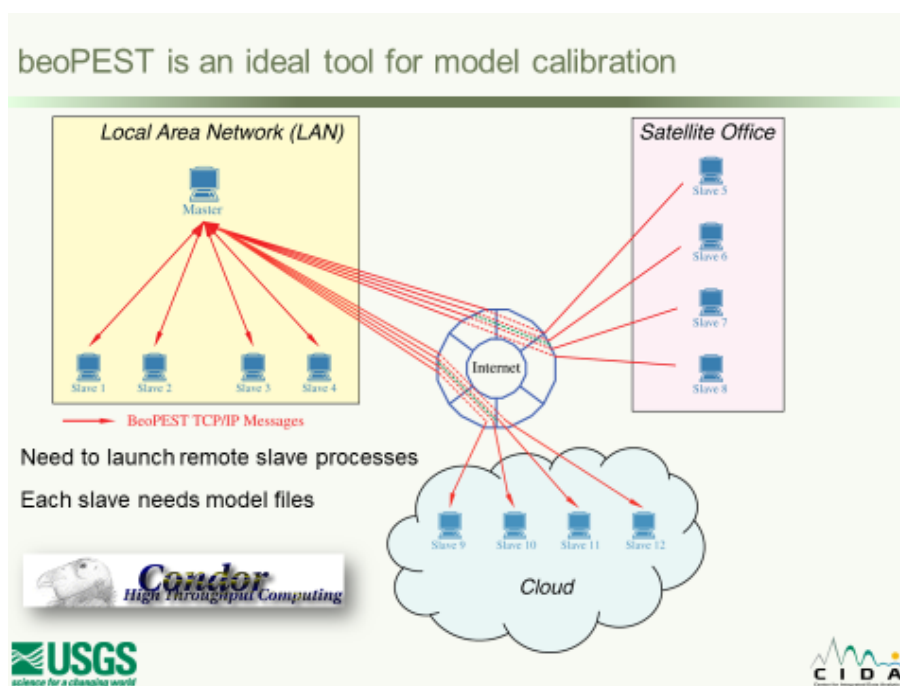
Figure 55: The Savinja basin map, which was divided into 77 sub-catchments.

Pri modeliranju so bili uporabljeni enaki vhodni podatki o padavinah, temperaturah in evapotranspiraciji. Enako sta bili tudi upoštevani porazdelitvi (delni distribuciji) na vegetacijske in višinske cone.

Zaradi velikega števila parametrov (vsako podporečje je definirano s 34 parametri) hidrološkega modela (porečje Savinje je bilo razdeljeno na 77 delov) je bilo za umerjanje modela uporabljeno tudi vzporedno procesiranje z BeoPEST [97] (Slika 56). BeoPEST je zamenjala novejša različica PEST_HP [98]. PEST_HP enako, kakor BeoPEST omogoča sočasno umerjanje modela na več računalnikih. V ta namen so bili uporabljeni računalniki lokalnega omrežja v računalniški učilnici KSH-FGG v načinu TCP-ja (Slika 57).



Slika 56: Kaj je PEST? (povzeto po [99]).
Figure 56: What is PEST? (according to [99]).



Slika 57: Konceptualni prikaz vzporednega umerjanja hidrološkega modela.
Figure 57: Conceptual view of the parallel calibration of the hydrological model.

Računalniški program, ki je bil uporabljen za vzporedno (paralelno) umerjanje hidrološkega modela na več logičnih procesorjih, je prikazan v prilogi (Priloga A). Čas umerjanja za tri podporečja (hidrološki model se zaradi kompleksnosti in velikega števila parametrov umerja po delih) znaša od nekaj minut do več ur (v primeru modela s 77 podporečji), odvisno od podanih začetnih vrednosti parametrov. Boljše kot so začetne vrednosti, hitreje PEST določi ustrezno vrednost parametra. V procesu umerjanja modela PEST upošteva vse urne podatke ter tudi dodatne informacije, ki jih uporabnik modela oceni kot pomembne. V hidrološkem modelu Savinje smo uporabili tudi dodatne meritve pretokov z ultrazvočnim ADP merilnikom in jih podali v HBV-light kot `QobsSample.txt`. Za delo z vzporednim procesiranjem smo morali izdelati dodatne programe, prikazana v poglavju PEST.

Umerjanje hidrološkega modela je potekalo na podatkih iz leta 2007. V preglednici (Preglednica 33) so prikazani rezultati umerjanja hidrološkega modela za definirana podporečja. Povprečna vrednost Nash-Sutcliffe koeficienta (razpon koeficienta med $-\infty$ ter 1, kjer vrednost 1 pomeni popolno ujemanje modeliranih ter opazovanih vrednosti) je pri umerjanju za podporečja prikazana v preglednici (Preglednica 33), znašala 0,86. Pri tem smo pri nekaterih območjih dosegli ujemanje med izmerjenimi ter modeliranimi vrednostmi, ki so presegale 0,95. To je v hidroloških modelih redkost. Modelirani tridnevni poplavni dogodek, ki predstavlja visoke poplavne konice od 18.9.-20.9.2007 pa dosega Nash-Sutcliffe celo 0,99. Tako umerjen hidrološki model se lahko uporabi kot podpora odločanju in za napovedovanje ekstremnih dogodkov. Tudi glede na ta merilo ujemanja lahko vidimo, da je hidrološkemu modelu uspelo relativno dobro ovrednotiti razmere v letu 2007. Ponovno je treba poudariti, da so v modelu kot vhodni podatek bili uporabljeni urni podatki. Rezultate umerjanj na sami Savinji lahko povzamemo z naslednjimi točkami, ki veljajo za poplavni val leta 2007:

- srednja učinkovitost modela same Savinje do Gračnice: $NSE=0,952$;

- srednja učinkovitost modela obdobja od 18.-20. 09. 2007 vrhov konic same Savinje do Gračnice: $NSE=0,988$.

Preglednica 33: Rezultati umerjanja hidrološkega modela Savinje po posameznih podporečjih za dogodek leta 2007.

Table 33: Results of the calibrated hydrological model of Savinja by individual subcatchment for the event in 2007.

Podporečje	Modelska učinkovitost	Modelska učinkovitost
	Nash-Sutcliffe NSE * za bilančno obdobje	Nash-Sutcliffe NSE ** za poplavni val
Savinja-Luče	0.91	0.97
Lučnica-Luče	0.86	0.93
Savinja-Nazarje	0.94	0.96
Dreta-Kraše	0.98	0.99
Savinja-Letuš	0.98	0.99
Paka-Velenje	0.8	0.97
Velunja-Gaberke	0.73	0.8

se nadaljuje...

...nadaljevanje

Paka-Šoštanj	0.78	0.74
Paka-Rečica	0.85	0.88
Bolska-Dolenja vas	0.79	0.95
Savinja-Medlog	0.93	0.99
Ložnica-Levec	0.91	0.92
Savinja-Celje-brv	0.94	0.97
Hudinja-Polže	0.89	0.88
Hudinja-Škofja vas	0.94	0.98
Savinja-Laško	0.92	0.99
Gračnica-Vodiško	0.74	0.75
Savinja-Veliko Širje	0.67	0.67

*računsko obdobje je leto 2007, bilančno obdobje je 1.3.—14.12.2007

**poplavni val od 18.9.-20.9.2007

V preglednici (Preglednica 34) so prikazani rezultati validacije hidrološkega modela na podatkih z leta 1990, ko se je na porečju Savinje zgodil ekstremni dogodek. Tudi za prikaz validacije hidrološkega modela je uporabljeno Nash-Sutcliffe-ovo merilo učinkovitosti modela. Ker leta 1990 niso na voljo podatki z vseh vodomernih postaj (ali postaje niso še bile postavljene ali pa manjka zabeležena vrednost zaradi okvare merilnika), ki so bile uporabljene pri umerjanju modela, so prikazani rezultati za 9 vodomernih postaj, s katerih podatki razpolagamo. Tudi na primeru validacije lahko vidimo, da je povprečna vrednost Nash-Sutcliffeovega koeficienta korelacije znašala 0,85, kar je malo manjše ujemanje kot v procesu umerjanja. To je pri hidroloških analizah prava redkost, saj večinoma v procesu validacije dosežemo vsaj 10-20 % slabše ujemanje kot pri umerjanju. Prikazani rezultati hidrološkega modela na porečju Savinje nakazujejo na to, da se model lahko uporabi tudi hidrološke napovedi v popolnoma novih situacijah.

Preglednica 34: Rezultati validacije hidrološkega modela Savinje po posameznih podporečjih za dogodek leta 1990.

Table 34: Results of the validation of the Savinja hydrological model by individual subcatchments for the event in 1990.

Podporečje	Modelska učinkovitost Nash-Sutcliffe NSE
Savinja-Luče	0,85
Dreta-Kraše	0,90
Savinja-Letuš	0,59

se nadaljuje...

...nadaljevanje

Ložnica-Levec	0,94
Savinja-Celje_brv	0,97
Hudinja-Škofja_vas	0,79
Voglajna-Celje	0,79
Savinja-Laško	0,97
Savinja-Veliko Širje	0,84

Poleg tega smo v procesu validacije (preverbe, potrditve, overbe) modela analizirali tudi dogodka, ki sta se zgodila leta 1998 ter 2010. Slednjega smo zaradi manjše magnitude samega dogodka izpustili iz nadaljnjih analiz, kar pomeni, da dogodek ni tako aktualen z vidika zagotavljanja poplavne varnosti. Pri dogodku leta, ki se je zgodil leta 1998, smo analizirali tudi vrednosti konic poplavnih valov tega dogodka. V preglednici (Preglednica 35) je prikazan povzetek rezultatov modela ter merjenih konic. Za postaje, kjer nismo razpolagali z merjenimi podatki, smo tako tudi rekonstruirali visokovodne valove.

Preglednica 35: Rezultati validacije hidrološkega modela Savinje po posameznih podporečjih za dogodek leta 1998.

Table 35: Results of the validation of the Savinja hydrological model by individual subcatchments for the 1998 event.

Podporečje	Konica pretoka -merjena (m³/s)	Konica pretoka -model (m³/s)
Savinja-Luče	26,3	25,6
Lučnica-Luče	62,3	60,7
Savinja-Nazarje	629,9	626,2
Dreta-Kraše	251,1	250,1
Savinja-Letuš	741,1	725,8
Paka-Velenje	49,9	49,7
Velunja-Gaberke	49,0	13,1
Paka-Šoštanj	81,9	89,3
Paka-Rečica	178,0	172,7
Bolska-Dolenja_vas	193,1	189,7
Savinja-Medlog	Ni podatka	1070,97
Ložnica-Levec	94,0	93,5

se nadaljuje...

...nadaljevanje

Savinja-Celje_briv	Ni podatka	1208,5
Hudinja-Polže	Ni podatka	14,2
Hudinja-Škofja_vas	142,2	124,4
Voglajna-Črnlolica	21,8	22
Voglajna-Celje	118,1	115,4
Hudinja-Voglajna	Ni podatka	268,6
Savinja-Laško	1394,7	1411,0
Gračnica-Vodiško	32,8	32,4
Savinja-Veliko Širje	1457,6	1496,7

3.3.3 Vzporejanje rezultatov umerjanj

Pri svoji doktorski disertaciji je Mira Kobold izdelala model reke Savinje z orodjem HBV [100]. Celotno porečje je bilo razdeljeno na dva dela, del porečja do VP Nazarje in preostali del med VP Nazarje in VP Širje. Višinsko je bilo porečje, razdeljeno na 200 metrov. Za porečje Savinje smo umerjanje modela izvedli za obdobje od oktobra 1993 do decembra 1998 s časovnim korakom en dan (Preglednica 36).

Preglednica 36: Rezultati umerjanja modela z dnevnimi vrednostmi za obdobje 1. 10. 1993-31. 12. 1998.

Table 36: Results of calibration of the model with daily values for the period 1. 10. 1993-31. 12. 1998.

Vodomerna postaja	Nash-Sutcliffov-ovo merilo učinkovitosti- <i>NSE</i>
v.p. Nazarje	0,80
v.p. Veliko Širje	0,79

Umerjanje je opravljeno tudi za krajši časovni korak in za manjšim številom meteoroloških postaj, ker niso vse postaje opremljene z ombrografi.

Preglednica 37: Rezultati umerjanja modela z urnimi podatki za obdobje 1. 1. 1998-31. 12. 1999.

Table 37: Results of calibration of the model with hourly data for the period 1.1.1998-31.12.1999.

Vodomerna postaja	Nash-Sutcliffov-ovo merilo učinkovitosti- <i>NSE</i>
v.p. Nazarje	0,76
v.p. Veliko Širje	0,86

Preglednica 38: Rezultati primerjave obeh modelov za urni korak.

Table 38: Results of the comparison of both models for the hourly step.

Podporečje	Nash-Sutcliffe <i>NSE</i> [86]	Nash-Sutcliffe <i>NSE</i> [100]
Savinja-Nazarje	0,96	0,76
Savinja-Veliko Širje	0,77	0,86

V primeru podporečja Savinja-Nazarje je razvidna veliko boljše modelska učinkovitost novejšega modela. Na vodomerni postaji Savinja-Veliko Širje je pa obratno. Treba se je zavedati, da je postaja Savinja-Veliko Širje pod vplivom zajeze hidroelektrarne HE Vrhovo. Sami vplivi vodenja HE Vrhovo na dejanske pretoke 2007 niso bili narejeni. Tako, da podporečje Savinja-Veliko Širje ni primerljivo.

4 ZAKLJUČKI IN RAZPRAVA

4.1 BISTVENE UGOTOVITVE

V doktorski disertaciji je predstavljen izboljšani postopek umerjanja parametrov Gauss-Levenberg-Marquardt (GLM) v kombinaciji s singularnim razcepom (SVD) in Tihonovo regularizacijo. Umerjalo se je več konceptualnih hidroloških modelov, tako sintetične in kot realne. Postopek smo ovrednotili in primerjali z drugima postopkoma umerjanja, GAP in CMA-ES. Na podlagi rezultatov te študije je ugotovljeno:

- Izboljšani postopek GLM je dosegel skoraj popolno ujemanje med dejanskimi in izračunanim vrednostnimi parametrom sintetičnega modela. Samo eden od 16 parametrov je pokazal odklon za 0,02 %.
- S poznavanjem dejanskih vrednosti parametrov modela, ki so v sintetičnem modelu, lahko preizkušamo različne nastavitve parametrov po.
- S poznavanjem dejanskih vrednosti parametrov modela, ki so v sintetičnem modelu, lahko preizkušamo različne nastavitve parametrov postopka umerjanja.
- Z ustreznimi nastavitvami parametrov umerjanja modela se je šum umerjanja zmanjšal in učinkovitost umerjanja se je izboljšala.
- Samo s postopkom GLM so se umerile natančne vrednosti parametrov HBV-Land modela. Učinkovitost umerjanja je pokazala skoraj popolno ujemanje tako visokih konic kot nizkih pretokov. Z drugimi besedami, le izboljšani postopek GLM, s SVD in Tihonova regularizacijo je bil sposoben odpraviti šum umerjanja.
- Čas izvajanja kombiniranega postopka GLM je bil bistveno krajši od primerjanih postopkov. Za isto študijo primera je bil kombinirani postopek kalibriranja GLM približno 60 in 200-krat krajši kot pri CMA-ES in GAP.
- Postopek umerjanja GLM je v vseh primerih izračunal enako vrednost *NSE*. Vrednosti kalibriranih parametrov se niso spreminjale, in to ne glede na število ponovitev umerjanja. Enake ponavljajoče rezultate lahko pripišemo nestohastičnemu obnašanja umerjanja z GLM postopkom, v nasprotju s stohastičnimi evolucijskimi postopki kot sta CMA-ES in GAP. Najmanjše odstopanje napak v ciljni funkciji je bilo za postopek GLM ugotovljeno v vseh primerih.
- Šum v rezultatih izračuna z metodo GLM je bil pri umerjanju in validaciji praktično enak. Pri umerjanju je torej v rezultatih ostal le računski šum.
- Rezultata umerjanja s postopkom GLM, ki bi obtičal v lokalnem minimumu, nismo zaznali. Postopek GLM se je izkazal za zelo uporabnega pri reševanju linearnih inverznih problemov.
- Z uvedbo Tihonove regularizacije v inverzno rešitev smo uspešno izračunali edinstvene parametre. Z zaporednimi ponovitvami je metoda GLM umerila vse hidrološke modele (HBV-Land, Savinja in Bosna), ne glede na nelinearno razmerje med izhodnimi rezultati in parametri modela.

- Umerjanje sintetičnega modela je omogočilo vpogled v nastali šum in pomanjkljivosti pri načrtovanju postopka umerjanja. Vendar sam proces umerjanja z GLM zahteva strokovno znanje na področju hidrološkega modeliranja in postopka umerjanja. Pomanjkanje strokovnega znanja je tudi razlog, da proces umerjanja z GLM v praksi še ni bil široko implementiran.

4.2 POTRDITEV HIPOTEZ

V doktorski disertaciji so bile zastavljene tri hipoteze:

1. Z uporabo strokovnega znanja oziroma strokovno vodenega interaktivnega postopka umerjanja nastavimo začetne vrednosti parametrov. Z najboljšim poznavanjem določimo ustrezne meje parametrov v obsegu realnih vrednosti. Tako dosežemo boljše rezultate umerjanja modela.
2. Z uporabo GLM postopka, lahko dosežemo odlične rezultate umerjanja na posameznih podporečjih. Koeficient učinkovitosti umerjanja modela Nash-Sutcliffe [15] večinoma doseže veliko višje vrednosti, to je med $NSE=0,95$ in blizu $NSE=1$.
3. Z regularizacijo parametrov lahko bistveno izboljšamo umerjanje modela in dobimo dodatne informacije o razmerju med ustreznimi parametri in s tem zmanjšamo varianco napak.

V doktorski disertaciji je predstavljen izboljšani postopek umerjanja parametrov Gauss-Levenberg-Marquardt (GLM) v kombinaciji s singularnim razcepom (SVD), Tihonovo regularizacijo in CMA-ES. Umerjalo se je več konceptualnih hidroloških modelov, tako sintetične in kot realne. Postopek smo ovrednotili in primerjali z drugima postopkoma umerjanja, GAP in CMA-ES.

Prva hipoteza je potrjena za razvojem postopka, pri katerem določimo najprej parametre s pomočjo stohastične ga postopka CMA-ES in nato z GML izpeljemo še bolj natančno umerjanje parametrov. Na ta način se izognemo nevarnosti padanja v lokalni minimum. S sintetičnimi pretoki in znanimi parametri modela smo izpeljali tudi uspešno umerjanje koeficientov programa za umerjanje, poglavje 3.15. S poznavanjem dejanskih vrednosti parametrov modela, ki so v sintetičnem modelu, lahko preizkušamo različne nastavitve parametrov postopka umerjanja. Z ustreznimi nastavitvami parametrov umerjanja modela se je šum umerjanja zmanjšal in učinkovitost umerjanja se je izboljšala. Umerjanje sintetičnega modela je omogočilo vpogled v nastali šum in pomanjkljivosti pri načrtovanju postopka umerjanja. Vendar sam proces umerjanja z GLM zahteva strokovno znanje na področju hidrološkega modeliranja in postopka umerjanja. Pomanjkanje strokovnega znanja je tudi razlog, da proces umerjanja z GLM v hidrološki praksi še ni v uporabi.

Druga hipoteza je potrjena s testnim modelom in praktičnimi naravnimi modeli. Visoke vrednosti NSE pri umerjanju in verifikaciji modelov potrjujejo, da je z uporabljenim postopkom šum umerjanja modela izločen iz šuma modela. Ostala sta še šum meritev in strukture modela, ki ju lahko tudi bolj natančno analiziramo. Izboljšani postopek GLM je dosegel skoraj popolno ujemanje med dejanskimi in izračunanimi parametri sintetičnega modela. Samo eden od 16 parametrov je pokazal odklon za 0,02 %. Samo s postopkom GLM so se umerile natančne vrednosti parametrov HBV-Land modela. Učinkovitost umerjanja je pokazala skoraj popolno ujemanje tako visokih konic kot nizkih pretokov. Z drugimi besedami, le izboljšani postopek GLM, s SVD in Tihonova regularizacijo je bil sposoben odpraviti šum umerjanja. Postopek umerjanja GLM je v vseh primerih izračunal enako vrednost NSE. Vrednosti kalibriranih parametrov se niso spreminjale, in to ne glede na število ponovitev umerjanja. Enake ponavljajoče rezultate lahko pripišemo nestohastičnemu obnašanju umerjanja z GLM postopkom, v

nasprotju s stohastičnimi evolucijskimi postopki kot sta CMA-ES in GAP. Najmanjše odstopanje napak v ciljni funkciji je bilo za postopek GLM ugotovljeno v vseh primerih. Šum v rezultatih izračuna z metodo GLM je bil pri umerjanju in validaciji praktično enak. Pri umerjanju je torej v rezultatih ostal le še šum meritev in strukturni šum. Rezultata umerjanja s postopkom GLM, ki bi običaj v lokalnem minimumu, s svojim pristopom nismo zaznali. Postopek GLM se je izkazal za zelo uporabnega pri reševanju linearnih inverznih problemov. Vse naštetu v drugi hipotezi je predstavljeno od poglavja 3.1.5 do poglavja 3.2.

Tretja hipoteza je potrjena s testnim modelom, saj omogoča inženirsko primerno točno inverzno rešitev nelinearnih enačb. Tihonova regularizacija je matematični postopek, ki se zadnje čase vse bolj uveljavlja na različnih področjih v inženirski praksi. Postopek regularizacije je prikazan v poglavju 3.1.4. Z uvedbo Tihonove regularizacije v inverzno rešitev smo uspešno izračunali edinstvene parametre. Z zaporednimi ponovitvami je metoda GLM umerila vse hidrološke modele (HBV-Land, Savinja in Bosna), ne glede na nelinearno razmerje med izhodnimi rezultati in parametri modela. Čas izvajanja kombiniranega postopka GLM je bil bistveno krajši od primerjanih postopkov. Za isto študijo primera je bil kombinirani postopek kalibriranja GLM približno 60 in 200-krat krajši kot pri CMA-ES in GAP.

Vse tri hipoteze smo potrdili z rezultati umerjanja sintetičnega modela kot tudi v realnih modelih porečja Savinje in Bosne. Rezultati umerjanja na sintetičnem modelu so potrdili, da lahko z deterministično metodo GLM popolno umerimo parametre in dobimo popolno ujemanje sintetičnih in umerjenih parametrov. S poznavanjem dejanskih vrednosti parametrov modela, kot je primer v sintetičnem modelu, lahko zelo uspešno preizkušamo različne nastavitve parametrov za doseg boljših rezultatov postopka umerjanja. Te pridobljene izkušnje, ugotovitve in uspešne nastavitve določenih parametrov, lahko potem praktično uporabimo v realnih modelih.

5 POVZETEK

V preteklosti so bili razviti različni modeli, ki simulirajo različne hidrološke procese. Vendar so neskladja med simuliranimi in izmerjenimi vrednostmi še vedno pomembna. To mnogim raziskovalcem predstavlja izziv. Modeli vsebujejo veliko parametrov, ki jih ni mogoče neposredno izmeriti. Vrednosti večine teh parametrov so določene v postopku umerjanja, ki pogojuje učinkovitost takšnih modelov. Doktorska disertacija predstavlja uporabo izboljšanega postopka Gaussa-Levenberga-Marquardta (GLM) v kombinaciji s singularnim razcepom enotnih vrednosti (SVD). V postopek je vpeljana Tihonova regularizacija za izboljšanje postopka umerjanja hidrološkega modela. Postopek se je preskusil na prosto dostopnem hidrološkem modelu z uporabo sintetičnega nabora podatkov. Na podlagi več kazalcev učinkovitosti je bilo ugotovljeno, da postopek GLM v kombinaciji s SVD in Tihonovo regularizacijo zagotavlja učinkovito ujemanje zgodovine modela in skoraj popolno umerjanje parametrov. S pomočjo Tihonove regularizacije parametrov se je izdatno izboljšalo umerjanje modela in dosegla minimalna varianca napak. Poleg tega je bilo s primerjavo rezultatov predlaganega postopka z rezultati globalnih evolucijskih postopkov umerjanja ugotovljeno, da je samo umerjanje s kombiniranim postopkom GLM popolnoma simuliralo nizke pretoke. Ne nazadnje je bil šum pri rezultatih izračuna pri kombinirani metodi GLM z regularizacijo Tihonova praktično enak bodisi v postopku umerjanja bodisi v postopku validacije. To kaže, da je v rezultatih ostal le računski šum.

6 SUMMARY

Various models were developed in the past to simulate different hydrological processes. However, discrepancies between simulated and observed values are still significant and pose a challenge to many researchers. The models contain many parameters that cannot be measured directly. The values of most of these parameters are determined in the calibration process, which conditions the efficiency of such models. The doctoral dissertation presents the use of an enhanced Gauss-Levenberg-Marquardt (GLM) procedure in combination with the singular value decomposition (SVD) and Tikhonov regularization to improve the process of hydrological model calibration. The procedure was tested on a freely available hydrological model using a synthetic data set. Based on several efficiency measures, the GLM procedure, in combination with SVD and Tikhonov regularization, was found to provide efficient model history matching and almost perfect parameter calibration. With the help of Tikhonov parameter regularization, the calibration of the model was significantly improved, and the minimum variance of errors was achieved.

Moreover, by comparing the results of the proposed procedure with the results of global evolutionary calibration procedures, it was found that the only calibration using the combined GLM procedure gave a perfect fit in low flows. Last but not least, the noise in the calculation results of the combined GLM method with Tikhonov regularization was practically the same in either the calibration or validation process. This shows that only computational noise remained in the results.

VIRI

1. Vijay P Singh and Donald K. Frevert *Watershed Models (Hardback) - Taylor & Francis; CRC Press, 2005; ISBN 9780849336096.*
2. Beven, K. Rainfall-runoff modelling : the primer / Keith Beven. – 2nd ed. V *John Wiley & Sons, Ltd*; 2010; str. 157–175 ISBN 978-0-470-71459-1.
3. Abbott, M.B.; Bathurst, J.C.; Cunge, J.A.; O’Connell, P.E.; Rasmussen, J. An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, „SHE“, 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *J. Hydrol.* **1986**, 87, 61–77. doi:10.1016/0022-1694(86)90115-0.
4. Peel, M.C.; Blöschl, G. Hydrological modelling in a changing world. *Prog. Phys. Geogr. Earth Environ.* **2011**, 35, 249–261. doi:10.1177/0309133311402550.
5. World Meteorological Organization. *Annual report ... / WMO, World Meteorological Organization. 1994; WMO; WMO, Secretariat: Geneva, 1995; ISBN 9789263108241.*
6. Orth, R.; Staudinger, M.; Seneviratne, S.I.; Seibert, J.; Zappa, M. Does model performance improve with complexity? A case study with three hydrological models. *J. Hydrol.* **2015**, 523, 147–159. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.01.044.
7. Zhang, Y.; Shao, Q.; Zhang, S.; Zhai, X.; She, D. Multi-metric calibration of hydrological model to capture overall flow regimes. *J. Hydrol.* **2016**, 539, 525–538. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.05.053.
8. Solomatine, D.P.; Shrestha, D.L. A novel method to estimate model uncertainty using machine learning techniques. *Water Resour. Res.* **2009**, 45, 1–16. doi:10.1029/2008WR006839.
9. Freer, J.; Beven, K.; Ambrose, B. Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: An application of the GLUE approach. *Water Resour. Res.* 1996, 32, 2161–2173. doi:10.1029/95WR03723.
10. Shrestha, D.L.; Kayastha, N.; Solomatine, D.P. A novel approach to parameter uncertainty analysis of hydrological models using neural networks. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2009**, 13, 1235–1248. doi:10.5194/hess-13-1235-2009.
11. Seibert, J. Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2000**, 4, 215–224. doi:10.5194/hess-4-215-2000.
12. Karahan, H.; Gurarslan, G.; Geem, Z.W. Parameter estimation of the nonlinear muskingum flood-routing model using a hybrid harmony search algorithm. *J. Hydrol. Eng.* **2013**, 18, 352–360. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000608.
13. Gurarslan, G.; Tamer Ayvaz, M. *A new systematic partitioning approach for Muskingum flood routing models*; 2018; Let. 20;.
14. Doherty, J.; Skahill, B.E. An advanced regularization methodology for use in watershed model calibration. *J. Hydrol.* **2006**, 327, 564–577. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.11.058.
15. Golub, G.H.; Von Matt, U. Tikhonov regularization for large scale problems. *Work. Sci. Comput.* **1997**.
16. Harrison, M.T.; Roggero, P.P.; Zavattaro, L. Simple, efficient and robust techniques for automatic multi-objective function parameterisation: Case studies of local and global optimisation using APSIM. *Environ. Model. Softw.* **2019**, 117, 109–133. doi:10.1016/j.envsoft.2019.03.010.
17. Razavi, S.; Gupta, H. V. What do we mean by sensitivity analysis? The need for comprehensive characterization of “global” sensitivity in Earth and Environmental systems models. *Water Resour. Res.* **2015**, 51, 3070–3092. doi:10.1002/2014WR016527.

18. Doherty, J. PEST version 17.0 Dostopno: [www.http://pesthompage.org/Downloads.php](http://pesthompage.org/Downloads.php) (dostopano jan 21, 2020).
19. Doherty, J.; Johnston, J.M. Methodologies for calibration and predictive analysis of a watershed model. *J. Am. Water Resour. Assoc.* **2003**, *39*, 251–265. doi:10.1111/j.1752-1688.2003.tb04381.x.
20. Doherty, J. Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models. *Watermark Numer. Comput.* **2015**. doi:10.1111/gwat.12360.
21. Nash, J.E.; Sutcliffe, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *J. Hydrol.* **1970**, *10*, 282–290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6.
22. Seibert, J. HBV-light model program Dostopno: <https://www.geo.uzh.ch/dam/jcr:2da100b8-5cc4-4626-aa26-3588c914a6b8/HBV-light.zip> (dostopano jan 21, 2010).
23. Doherty, J. The HP Suite Dostopno: [www.http://pesthompage.org/Downloads.php](http://pesthompage.org/Downloads.php) (dostopano jan 21, 2020).
24. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*; John Wiley & Sons, Ltd, 2005; doi:10.1002/0470848944.
25. Figure 2. The drainage basin hydrological system Dostopno: <https://www.alevelgeography.com/drainage-basin-hydrological-system/> (dostopano mar 21, 2020).
26. Westra, S.; Thyer, M.; Leonard, M.; Kavetski, D.; Lambert, M. A strategy for diagnosing and interpreting hydrological model nonstationarity. *Water Resour. Res.* **2014**, *50*, 5090–5113. doi:10.1002/2013WR014719.
27. Kavetski, D.; Kuczera, G.; Franks, S.W. Calibration of conceptual hydrological models revisited: 1. Overcoming numerical artefacts. *J. Hydrol.* **2006**, *320*, 173–186. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.07.012.
28. Kuczera, G.; Renard, B.; Thyer, M.; Kavetski, D. Il n'ya pas de monstres hydrologiques, juste des modèles et des observations avec de grandes incertitudes! *Hydrol. Sci. J.* **2010**, *55*, 980–991. doi:10.1080/02626667.2010.504677.
29. Doherty, J.; Johnston, J.M. Methodologies for calibration and predictive analysis of a watershed model. *J. Am. Water Resour. Assoc.* **2003**, *39*, 251–265. doi:10.1111/j.1752-1688.2003.tb04381.x.
30. Freeze, R.A.; Harlan, R.L. Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model. *J. Hydrol.* **1969**, *9*, 237–258. doi:10.1016/0022-1694(69)90020-1.
31. Refsgaard, J.C.; Knudsen, J. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resour. Res.* **1996**, *32*, 2189–2202. doi:10.1029/96WR00896.
32. Graham, D.N.; Butts, M.B. Flexible integrated watershed modeling with MIKE SHE. V *Watershed Models*; 2005; str. 245–271 ISBN 9781420037432.
33. Merz, R.; Parajka, J.; Blöschl, G. Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses. *Water Resour. Res.* **2011**, *47*. doi:10.1029/2010WR009505.
34. Andréassian, V.; Lerat, J.; Loumagne, C.; Mathevet, T.; Michel, C.; Oudin, L.; Perrin, C. What is really undermining hydrologic science today? *Hydrol. Process.* **2007**, *21*, 2819–2822. doi:10.1002/hyp.6854.
35. Beven, K. How to make advances in hydrological modelling. *Hydrol. Res.* **2019**, *50*, 1481–1494. doi:10.2166/nh.2019.134.
36. Chintalapudi, S.; Sharif, H.; Xie, H. Sensitivity of Distributed Hydrologic Simulations to Ground and Satellite Based Rainfall Products. *Water* **2014**, *6*, 1221–1245. doi:10.3390/w6051221.

37. Shedekar, V.S.; King, K.W.; Brown, L.C.; Fausey, N.R.; Heckel, M.; Harmel, R.D.; Reno, N. *Measurement Errors in Tipping Bucket Rain Gauges under Different Rainfall Intensities and their implication to Hydrologic Models*; 2009; Let. 10; doi:10.13031/2013.27308.
38. Dymond, J.R.; Christian, R. Accuracy of discharge determined from a rating curve. *Hydrol. Sci. J.* **1982**, 27, 493–504. doi:10.1080/02626668209491128.
39. Bonacci, O. The influence of errors in precipitation measurements on the accuracy of the evaporation measurements performed by a class A evaporation pan. *Theor. Appl. Climatol.* **1991**, 43, 181–183. doi:10.1007/BF00867453.
40. Sevruk, B. *Methods of correction for systematic error in point precipitation measurement for operational use*; Secretariat of the World Meteorological Organization: Geneva Switzerland, 1982; ISBN 9789263105899.
41. Westerberg, I.K.; Wagener, T.; Coxon, G.; McMillan, H.K.; Castellarin, A.; Montanari, A.; Freer, J. Uncertainty in hydrological signatures for gauged and ungauged catchments. *Water Resour. Res.* **2016**, 52, 1847–1865. doi:10.1002/2015WR017635.
42. Kuczera, G.; Kavetski, D.; Franks, S.; Thyer, M. Towards a Bayesian total error analysis of conceptual rainfall-runoff models: Characterising model error using storm-dependent parameters. *J. Hydrol.* **2006**, 331, 161–177. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.05.010.
43. Doherty, J.; Welter, D. A short exploration of structural noise. *Water Resour. Res.* **2010**, 46. doi:10.1029/2009wr008377.
44. Kavetski, D.; Qin, Y.; Kuczera, G. The Fast and the Robust: Trade-Offs Between Optimization Robustness and Cost in the Calibration of Environmental Models. *Water Resour. Res.* **2018**, 54, 9432–9455. doi:10.1029/2017WR022051.
45. Beven, K.; Binley, A. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrol. Process.* **1992**, 6, 279–298. doi:10.1002/hyp.3360060305.
46. Shaw, E.M.; Beven, K.J.; Chappell, N.A.; Lamb, R. *Hydrology in practice, fourth edition*; 2017; ISBN 9781482265705. doi:10.1201/9781315274904.
47. Kavetski, D.; Kuczera, G.; Franks, S.W. Calibration of conceptual hydrological models revisited: 2. Improving optimisation and analysis. *J. Hydrol.* **2006**, 320, 187–201. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.07.013.
48. Bergström, S. Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments. *Smhi* **1976**, *RHO* 7, 134. doi:10.1007/s11069-004-8891-3.
49. Bergström, S. The HBV model - its structure and applications. *Swedish Meteorol. Hydrol. Institute, Norrköping* **1992**, 4, 1–33.
50. Smith, M.B.; Vidmar, A. Data set derivation for GIS-based urban hydrological modeling. *Photogramm. Eng. Remote Sensing* **1994**, 60, 67–76.
51. Brilly, M.; Smith, M.; Vidmar, A. *Spatially oriented surface water hydrological modelling and GIS*; 1993;
52. White, J.; Welter, D.; Doherty, J. PEST++ Version 4.2.16 Dostopno: <https://github.com/usgs/pestpp> (dostopano jan 21, 2020).
53. Šraj, M.; Rusjan, S.; Petan, S.; Vidmar, A.; Mikoš, M.; Globevnik, L.; Brilly, M. The experimental watersheds in Slovenia. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2008**, 4, 012051. doi:10.1088/1755-1307/4/1/012051.
54. Lindström, G.; Johansson, B.; Persson, M.; Gardelin, M.; Bergström, S. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *J. Hydrol.* **1997**, 201, 272–288. doi:10.1016/S0022-1694(97)00041-3.
55. Hon, M. IHMS Integrated Hydrological Modelling System.

56. SMHI *Integrated Hydrological Modelling System (IHMS)*; 2012;
57. Graham, L.P.; Graham, L.P. *Division of Hydraulic Engineering Department of Civil and Environmental Engineering Royal Institute of Technology*; 2016; ISBN 917170518X.
58. Keith, B. *Rainfall-runoff modelling : the primer*; Wiley-Blackwell, 2012; ISBN 9780470714591.
59. Seibert, J.; Vis, M.J.P.P. Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2012**, *16*, 3315–3325. doi:10.5194/hess-16-3315-2012.
60. Bergstrom, S. Principles and confidence in hydrological modelling. *Nord. Hydrol.* **1991**. doi:10.2166/nh.1991.0009.
61. Vidmar, A.; Globevnik, L.; Koprivšek, M.; Sečnik, M.; Zabret, K.; Durović, B.; Anzeljc, D.; Kastelic, J.; Kobold, M.; Sušnik, M.; idr. The Bosna River floods in May 2014. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2016**, *16*, 2235–2246. doi:10.5194/nhess-16-2235-2016.
62. Doherty, J. PEST: Model-independent parameter estimation. *Watermark Comput. Corinda, Aust.* **2005**, *2005*, 122.
63. Arsenault, R.; Poulin, A.; Côté, P.; Brissette, F. Comparison of stochastic optimization algorithms in hydrological model calibration. *J. Hydrol. Eng.* **2014**, *19*, 1374–1384. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000938.
64. Doherty, J. PEST Model-Independent Parameter Estimation User Manual Part I: PEST, SENSAN and Global Optimisers. *Watermark Numer. Comput.* **2016**, 393.
65. Doherty, J. *PEST Model-Independent Parameter Estimation User Manual Part II: PEST Utility Support Software*; Brisbane, Australia, 2020;
66. Doherty, J.; White, J.; Welter, D. Pest & pest++. **2018**.
67. Welter, D.E.; Doherty, J.E.; Hunt, R.J.; Muffels, C.T.; Tonkin, M.J.; Schreüder, W.A. Approaches in highly parameterized inversion: PEST++, a Parameter ESTimation code optimized for large environmental models. *Tech. Methods, B. 7, Sect. C5* **2012**, 47. doi:http://dx.doi.org/.
68. Doherty, J. PEST_HP, PEST for Highly Parallelized Computing Environments. *Watermark Numer. Comput.* 2020.
69. Plestenjak Bor *Razširjen uvod v numerične metode*; DMFA - založništvo, 2015; ISBN 9789612122645.
70. Gavin, H. The Levenberg-Marquardt method for nonlinear least squares curve-fitting problems. *Dep. Civ. Environ. Eng. Duke Univ.* **2011**, 1–15.
71. Kotar, A. Vpliv podnebnih sprememb na visoke pretoke Vipave : diplomska naloga. **2013**.
72. Skahill, B.E.; Doherty, J. Efficient accommodation of local minima in watershed model calibration. *J. Hydrol.* **2006**, *329*, 122–139. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.02.005.
73. Lawrence, D.; Haddeland, I.; Langsholt, E. *Calibration of HBV hydrological models using PEST parameter estimation*; 2009; ISBN 9788241006807.
74. Solomatine, D.P.; Dibike, Y.B.; Kukuric, N. Calage automatique de modèles d'écoulement souterrain utilisant des techniques d'optimisation globales. *Hydrol. Sci. J.* **1999**, *44*, 879–894. doi:10.1080/02626669909492287.
75. Press, W.H.; Teukolsky, S.A.; Vetterling, W.T.; Flannery, B.P. *NUMERICAL RECIPES The Art of Scientific Computing Third Edition*; 2007; ISBN 9788578110796. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
76. Hansen, N.; Ostermeier, A. Completely derandomized self-adaptation in evolution strategies. *Evol. Comput.* 2001, *9*, 159–195. doi:10.1162/106365601750190398.

77. Hansen, N.; Müller, S.D.; Koumoutsakos, P. Reducing the time complexity of the derandomized evolution strategy with covariance matrix adaptation (CMA-ES). *Evol. Comput.* **2003**, *11*, 1–18. doi:10.1162/106365603321828970.
78. Vidmar, A. A Quickstart Guide to HBV-light Hydrological Model Calibration using PEST. *Appl. Sci.* **2020**, 1–17. doi:10.3390/app10113841.
79. Doherty, J.J.; Hunt, R.R. Approaches to highly parameterized inversion: a guide to using PEST for groundwater-model calibration. *U. S. Geol. Surv. Sci. Investig. Rep. 2010-5169* **2010**, *70*. doi:2010-5211.
80. Vidmar, A.; Brilly, M.; Sapač, K.; Kryžanowski, A. Efficient Calibration of a Conceptual Hydrological Model Based on the Enhanced Gauss–Levenberg–Marquardt Procedure. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 3841. doi:10.3390/app10113841.
81. Lindström, G. Lake water levels for calibration of the S-HYPE model. *Hydrol. Res.* **2016**, *47*, 672–682. doi:10.2166/nh.2016.019.
82. Hottel, C.; Braun, L.N.; Leibundgut, C.; Rieg, A. Simulation of snowpack and discharge in an alpine karst basin. *Snow glacier Hydrol. Proc. Int. Symp. Kathmandu, 1992* **1993**, 249–260.
83. Konz, M.; Seibert, J. On the value of glacier mass balances for hydrological model calibration. *J. Hydrol.* **2010**, *385*, 238–246. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.02.025.
84. Velázquez, J.A.; Schmid, J.; Ricard, S.; Muerth, M.J.; Gauvin St-Denis, B.; Minville, M.; Chaumont, D.; Caya, D.; Ludwig, R.; Turcotte, R. An ensemble approach to assess hydrological models' contribution to uncertainties in the analysis of climate change impact on water resources. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2013**, *17*, 565–578. doi:10.5194/hess-17-565-2013.
85. Dams, J.; Nossent, J.; Senbeta, T.B.; Willems, P.; Batelaan, O. Multi-model approach to assess the impact of climate change on runoff. *J. Hydrol.* **2015**, *529*, 1601–1616. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.08.023.
86. Brilly, M.; Kryžanowski, A.; Šraj, M.; Bezak, N.; Sapač, K.; Vidmar, A.; Rusjan, S. *Historical, Hydrological and Hydraulics Studies for Sustainable Flood Management Mitja*; InTech, 2018; doi:10.5772/intechopen.74432.
87. Atta-ur-Rahman; Khan, A.N. Analysis of flood causes and associated socio-economic damages in the Hindukush region. *Nat. Hazards* **2011**, *59*, 1239–1260. doi:10.1007/s11069-011-9830-8.
88. Faisal, I.M.; Kabir, M.R. *The Disastrous Flood of 1998 and Long Term Mitigation Strategies for Dhaka City A. NISHAT*; 2003; Let. 28;.
89. Grillakis, M.; Koutroulis, A.; Grillakis, M.G.; Tsanis, I.K.; Koutroulis, A.G. Application of the HBV hydrological model in a flash flood case in Slovenia HELIX-High-End cLimate Impacts and eXtremes View project ISIMIP2b WATER View project Natural Hazards and Earth System Sciences Application of the HBV hydrological model in a flash flood case in Slovenia. *Hazards Earth Syst. Sci.* **2010**, *10*, 2713–2725. doi:10.5194/nhess-10-2713-2010.
90. Silvestro, F.; Rebora, N.; Giannoni, F.; Cavallo, A.; Ferraris, L. The flash flood of the Bisagno Creek on 9th October 2014: An “unfortunate” combination of spatial and temporal scales. *J. Hydrol.* **2016**, *541*, 50–62. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.08.004.
91. Brilly, M.; Vidmar, A.; Globevnik, L.; Maja, K.; Sečnik, M.; Zabret, K.; Janez, K.; Mira, K.; Sušnik, M.; Đurović, B.; idr. *Analiza poplavnega dogodka maja 2014 v Bosni in Hercegovini za porečje reke Bosne Poročilo*;
92. Brilly, M. *Analiza poplavnega dogodka maja 2014 v Bosni in Hercegovini za porečje reke Bosne Poročilo*;
93. Zabret, K.; Hozjan, U.; Kryžanowsky, A.; Brilly, M.; Vidmar, A. Development of model for the estimation of direct flood damage including the movable property. *J. Flood Risk Manag.* **2016**. doi:10.1111/jfr3.12255.

94. TE CHOW, V.E.N. *HYDROLOGIC STUDIES OF FLOODS IN THE UNITED STATES*; 1956;
95. Kobold, M. Hidrološki model Savinje v programskem okolju WMS (watershed model[ing system]) - Mira Kobold, Mojca Sušnik, Janez Polajnar, Jože Uhan, Marjan Bat, Anton Zgonc - Google Books Dostopno: https://books.google.si/books?id=1z_BOgAACAAJ&dq=Kobold+and+Sušnik+2000,+Savinja&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwj29qOQ7_LpAhXEyKYKHbENCjgQ6AEIKTAA (dostopano jun 8, 2020).
96. Feranec, J.; Jaffrain, G.; Soukup, T.; Hazeu, G. Determining changes and flows in European landscapes 1990-2000 using CORINE land cover data. *Appl. Geogr.* **2010**, *30*, 19–35. doi:10.1016/j.apgeog.2009.07.003.
97. Karanovic, M.; Muffels, C.T.; Tonkin, M.J.; Hunt, R.J. *a Graphical User Interface for File and Run Management Across Networks Great Lakes Restoration Initiative*;
98. Doherty, J. The HP Suite, PEST_HP Compatible Programs for Highly Parallelized Computing Environments 2020.
99. Fienen, M.; Hunt, R.; Hydrologists, R. Water into Wine: Condor, PEST, and Hydrologic Modeling Dostopno: <https://research.cs.wisc.edu/htcondor/CondorWeek2012/presentations/fienen-pest.pdf> (dostopano jun 7, 2020).
100. Kobold, M.; Brilly, M. The use of HBV model for flash flood forecasting. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2006**, *6*, 407–417. doi:10.5194/nhess-6-407-2006.

PRILOGE / *APPENDIX*

»Ta stran je namenoma prazna«

Priloga A: Program 'CLBRT.cmd' za vzporedno izvajanje umerjanja**Appendix A: The program 'CLBRT.cmd' for parallel calibration**

Ime programa (angl. Program Name): **CLBRT.cmd**

```
>>>
@Echo Off
:: HBV-light calibration with HP suite: GLM, SVD, (Tihonov) or CMAES
:: Shell script by Andy's Soft (c), UL FGG-KSH, Ljubljana
:: Clbrt.cmd, January 2012, last version April 2020
:: E-mail: andrej.vidmar@fgg.uni-lj.si
:: Cmd: Clbrt (Model_name) (PEST_control_file_name) (c)
::      c ... is an trigger to the CMA-ES global optimization method
:: Exmpl A. Clbrt HBV-Land Calib
::      B. Clbrt HBV-Land Calib c
:: -----
:: Set variables used in script
SETLOCAL EnableDelayedExpansion
SET model=%1
IF [%1]==[] SET /p model= Enter HBV-light model name :
SET pcf=%2
IF [%2]==[] SET /p pcf= Enter PEST control file name :
SET method=pest_hp_mkl & :: Run GML
IF [%3]==[c] SET method=cmaes_hp & :: Run CMA-ES
SET /A np=%NUMBER_OF_PROCESSORS%-2 & :: number of CPU logical procesor minus two
:: Prepare local IPv4 address and port (host1=192.168.1.106 or host1=localhost) or
SET host1=%computername%
SET port1=4004

:: Mirroring Template\ data for %method% to the %model%\ and the Agents\
ROBOCOPY Template %model% /MIR >NUL
FOR /L %%i IN (1,1,%np%) DO (
    ROBOCOPY Template Agent%%i\ /MIR >NUL
)
ECHO The PEST is running. Please, wait...
ECHO Start PEST at %time% >ClbrtTime.txt & TIMER /q

:: Start %method% manager in new command Window in %model%\ directory. /hpstart
START "%model%" /D"%CD%\%model%" /REALTIME %method% %pcf% /h :%port1%

:: Start loop from 1 to %np% PEST_HP agents in new hidden Cmd_Window in Agents\
directories.
FOR /L %%i IN (1,1,%np%) DO (
    START "Agents" /D"%CD%\Agent%%i" /MIN /REALTIME agent_hp %pcf% /h
    %host1%:%port1%
)
:: Start one %method% agent in %model%\ directory.
```

```
START "Agents" /D"%CD%\%model%" /MIN /REALTIME /WAIT agent_hp %pcf% /h
%host1%:%port1%

ECHO Stop PEST at %time% >>ClbrtTime.txt & TIMER /s /nologo >>ClbrtTime.txt

:: After end delete all Agents\ directories.
FOR /L %i IN (1,1,%np%) DO (
    RD /S /Q "Agent%i"
)
FOR /F "delims=" %i IN (ClbrtTime.txt) DO SET "timer=%i"
ECHO The PEST is finished in %timer%. The results are in the %model% directory.
<<<
```

Programsko kodo med oznakami »>>>><< in »<<<<< se kopira ali prepíše v tekstovno datoteko z imenom **CLBRT.cmd**.

Priloga B: Program 'Model.cmd' za zagon HBV-light

Appendix B: Program 'Model.cmd' for starting HBV-light

Ime programa (angl. Program Name): **Model.cmd**

```
>>>
@echo off
:: Run HBV model in the console window
SETLOCAL
:: Run hydrological model from command line
HBV-light-CLI Run .\ SingleRun .\Results
:: command to run SFK - The Swiss File Knife Multi Function Tool.
:: Release 1.9.3 Base/XD Revision 4 of Dec 8 2018.
:: StahlWorks Technologies, http://stahlworks.com/
:: Distributed for free under the BSD License, without any warranty
REM TAB control character to 8 spaces
sfk detab=8 .\Results\Peaks.txt -yes > nul
:: Run program for postprocesing low flow, if needed remove remarks
:: LoFlow
<<<
```

Programsko kodo med oznakami »>>>« in »<<<« se kopira ali prepíše v ASCII tekstovno datoteko z imenom **Model.cmd**.

Priloga C: Program 'Regul.cmd' za uteževanje in regularizacijo parametrov

Appendix C: Program 'Regul.cmd' for weighting and regularization of parameters

Ime programa (angl. Program Name): **Regul.cmd**

```
>>>
@echo off
SETLOCAL
i64pest calib /hpstart & :: 1.st start
parrep calib.par calib.pst calib1.pst 70
i64pwtadj1 calib calib1 1 & :: weighting
addreg1 Calib1 Calib2 & :: regularization
<<<
```

Programsko kodo med oznakami »>>>« in »<<<« oznak se kopira ali prepiše v tekstovno datoteko z imenom **Regul.cmd**.

Priloga D: Program 'DelP.cmd' brisanja nepotrebnih datotek

Appendix D: Program 'DelP.cmd' for deleting unnecessary files

Ime programa (angl. Program Name): **DelP.cmd**

```
>>>
@echo off
SETLOCAL
del Log.txt
del *.obf
del *.rst
del *.sen
del *.seo
del *.res
del *.rei
del *.cnd
del *.mtt
::del *.jac
del *.drf
del *.jst
del *.jco
del *.bak
del *.rsd
del *.svd
del *.rmr
del *.prf
REM del *.par
del *.bpa
del calib?.rei??
del calib?.par??
del *.rnu
del *.rns
del *.rnj
del *.rid
del *.cov
del *.csv
del *.iobj
del *.ipar
del *.isen
del *.jcb
del *.pfm
del *.fpr
<<<
```

Programsko kodo med oznakami »>>>><<<<« se kopira ali prepíše v tekstovno datoteko z imenom **DelP.cmd**. Po potrebi lahko brisanje določene datoteke izkjučimo s pripisom (:: ali REM) pred ukazom del ali dodamo nove končnice.

Priloga E: Parametri nadzorne datoteke PEST**Appendix E: Parameters of the PEST control file**

pcf
* control data
RSTFLE PESTMODE
NPAR NOBS NPARGP NPRIOR NOBSGP (MAXCOMPDIM)
NTPLFLE NINSFLE PRECIS DPOINT (NUMCOM JACFILE MESSFILE) (OBSREREF)
RLAMBD1 RLAMFAC PHIRATSUF PHIREDLAM NUMLAM (JACUPDATE) (LAMFORGIVE) (DERFORGIVE)
RELPARMAX FACPARMAX FACORIG (IBOUNDSTICK UPVECBEND) (ABSPARMAX)
PHIREDSWH (NOPTSWITCH) (SPLITSWH) (DOAUI) (DOSENREUSE) (BOUNDSCALE)
NOPTMAX PHIRE DSTP NPHISTP NPHINORED RELPARSTP NRELPAR (PHISTOPTHRESH) (LASTRUN) (PHIABANDON)
ICOV ICOR IEIG (IRES) (JCOSAVE) (VERBOSEREC) (JCOSAVEITN) (REISAVEITN) (PARSAVEITN) (PARSAVERUN)
* automatic user intervention
MAXAUI AUISTARTOPT NOAUIPHIRAT AUIRESTITN
AUISENSRAT AUIHOLDMAXCHG AUINUMFREE
AUIPHIRATSUF AUIPHIRATACCEPT NAUINOACCEPT
* singular value decomposition
SVDMODE
MAXSING EIGHTHRESH
EIGWRITE
* lsqr
LSQRMODE
LSQR_ATOL LSQR_BTOL LSQR_CONLIM LSQR_ITNLIM
LSQRWRITE
* svd assist
BASEPESTFILE
BASEJACFILE
SVDA_MULBPA SVDA_SCALADJ SVDA_EXTSUPER SVDA_SUPDERCALC SVDA_PAR_EXCL
* sensitivity reuse
SENRELTHRESH SENMAXREUSE
SENALLCALCINT SENPREDWEIGHT SENPIEXCLUDE
* parameter groups
PARGPNME INCTYP DERINC DERINCLB FORCEN DERINCMUL DERMTHD (SPLITTHRESH SPLITRELDIFF SPLITACTION)
(one such line for each of NPARGP parameter groups)
* parameter data
PARNME PARTRANS PARCHGLIM PARVAL1 PARLBNB PARUBND PARGP SCALE OFFSET DERCOM
(one such line for each of NPAR parameters)
PARNME PARTIED
(one such line for each tied parameter)
* observation groups
OBSGNME (GTARG) (COVFLE)

(one such line for each of NOBSGP observation group)
* observation data
OBSNME OBSVAL WEIGHT OBGNME
(one such line for each of NOBS observations)
* derivatives command line
DERCOMLINE
EXTDERFLE
* model command line
COMLINE
(one such line for each of NUMCOM command lines)
* model input/output
TEMPFLE INFLE
(one such line for each of NTPLFLE template files)
INSFLE OUTFLE
(one such line for each of NINSLFE instruction files)
* prior information
PILBL PIFAC * PARNME + PIFAC * log(PARNME) ... = PIVAL WEIGHT OBGNME
(one such line for each of NPRIOR articles of prior information)
* predictive analysis
NPREDMAXMIN (PREDNOISE)
PD0 PD1 PD2
ABSPREDLAM RELPREDLAM INITSCHFAC MULSCHFAC NSEARCH
ABSPREDSWH RELPREDSWH
NPREDNORED ABSPREDSTP RELPREDSTP NPREDSTP
* regularisation
PHIMLIM PHIMACCEPT (FRACPHIM) (MEMSAVE)
WFINIT WFMIN WFMAX (LINREG) (REGCONTINUE)
WFFAC WFTOL IREGADJ (NOPTREGADJ REGWEIGHTRAT (REGSINGTHRESH))
* pareto
PARETO_OBSGROUP
PARETO_WTFAC_START PARETO_WTFAC_FIN NUM_WTFAC_INC
NUM_ITER_START NUM_ITER_GEN NUM_ITER_FIN
ALT_TERM
OBS_TERM ABOVE_OR_BELOW OBS_THRESH NUM_ITER_THRESH (only if ALT_TERM is non-zero)
NOBS_REPORT
OBS_REPORT_1 OBS_REPORT_2 OBS_REPORT_3.. (NOBS_REPORT items)

Priloga F: Pregled privzetih vrednosti parametrov HBV-light**Appendix F: Overview of the default values of HBV-light parameters**

Ime	Enota	Razpon	Privzeto	Opis	PAR_min	PAR_max
Name	Unit	Range	Default		Minimum	Maximum
PERC	mm/ Δt	(0,inf)	1	parameter praga	0.1	20
Alpha	-	(0,inf)	0	koeficient nelinearnosti	0.001	100
UZL	mm	(0,inf)	20	parameter praga	1	100
K0	1/ Δt	(0,1)	0.2	koeficient skladiščenja (ali recesije) 0	0.1	0.999
K1	1/ Δt	(0,1)	0.1	koeficient skladiščenja (ali recesije) 1	0.01	0.6
K2	1/ Δt	(0,1)	0.05	skladiščenje (ali recesija) koeficient 2	1.00E-06	0.3
MAXBAS	Δt	(1,100)	1	dolžina trikotne utežne funkcije	1	20
Cet	1/°C	(0,1)	0	potencialni korekcijski faktor izhlapevanja	0.001	1
PCALT	%/100m	(-inf,inf)	10	sprememba padavin z nadmorsko višino	8	16
TCALT	°C/100m	(-inf,inf)	0.6	sprememba temperature z višino	0.5	0.8
Pelev	m	(-inf,inf)	0	nadmorska višina podatkov o padavinah v datoteki PTQ	0.001	3000
Telev	m	(-inf,inf)	0	nadmorska višina podatkov o temperaturi v datoteki PTQ	0.001	3000
PART	-	(0,1)	0.5	del napajanja, ki se doda v polje podzemne vode 1	0.001	1
DELAY	Δt	(0,inf)	1	čas, v katerem je polnjenje enakomerno porazdeljeno	0.001	10
TT	°C	(-inf,inf)	0	temperaturni prag	-2	1
CFMAX	mm/ Δt °C	(0,inf)	3	faktor stopnje Δt	0.05	10
SP	-	(0,1)	1	sezonska spremenljivost v faktorju stopnje- Δt	0.2	1
SFCF	-	(0,inf)	1	korekcijski faktor sneženja	0.2	3
CFR	-	(0,inf)	0.05	koeficienta zamrznitve	0.04	0.06
CWH	-	(0,inf)	0.1	sposobnost zadrževanja vode	0.05	0.15
CFGlacier	-	(0,inf)	1	korekcijski faktor ledenika	0.001	5

FC	mm	(0,inf)	200	maksimalno skladiščenje vlage v tleh	10	700
LP	-	(0,1)	1	vrednost vlažnosti tal, nad katero AET doseže PET	0.1	1
BETA	-	(0,inf)	1	parameter, ki določa relativni prispevek k odtoku iz dežja ali taljenja snega	1	10

V stolpcu PEST_min in PEST_max so podane vrednosti, ki so se uporabile kot primer dobre prakse na osnovi preteklih izkušenj umerjanja različnih hidroloških modelov. Na primerih Savinje in reke Bosne [61,86].

Opis	Description
parameter praga	threshold parameter
koeficient nelinearnosti	non-linearity coefficient
parameter praga	threshold parameter
koeficient skladiščenja (ali recesije) 0	storage (or recession) coefficient 0
koeficient skladiščenja (ali recesije) 1	storage (or recession) coefficient 1
skladiščenje (ali recesija) koeficient 2	storage (or recession) coefficient 2
dolžina trikotne utežne funkcije	length of the triangular weighting function
potencialni korekcijski faktor izhlapevanja	potential evaporation correction factor
sprememba padavin z nadmorsko višino	change of precipitation with elevation
sprememba temperature z višino	change of temperature with elevation
nadmorska višina podatkov o padavinah v datoteki PTQ	elevation of precipitation data in the PTQ file
nadmorska višina podatkov o temperaturi v datoteki PTQ	elevation of temperature data in the PTQ file
del napajanja, ki se doda v polje podzemne vode 1	a portion of the recharge which is added to groundwater box 1
čas, v katerem je polnjenje enakomerno porazdeljeno	the period over which recharge is evenly distributed
temperaturni prag	threshold temperature
faktor stopnje Δt	degree- Δt factor
sezonska spremenljivost v faktorju stopnje- Δt	seasonal variability in degree- Δt factor
korekcijski faktor sneženja	snowfall correction factor
koeficienta zamrznitve	refreezing coefficient
sposobnost zadrževanja vode	water holding capacity
korekcijski faktor ledenika	glacier correction factor

maksimalno skladiščenje vlage v tleh	maximum soil moisture storage
vrednost vlažnosti tal, nad katero AET doseže PET	soil moisture value above which AET reaches PET
parameter, ki določa relativni prispevek k odtoku iz dežja ali taljenja snega	the parameter that determines the relative contribution to runoff from rain or snowmelt

Priloga G: Razlike merjenih in simuliranih vrednosti datoteke Calib2.rei**Appendix G: The differences between measured and simulated values of Calib2.rei file****MODEL OUTPUTS AT END OF OPTIMISATION ITERATION NO. 35:**

Note that weights have been adjusted in accordance with regularisation target objective function.

Name	Group	Measured	Modelled	Residual	Weight
01mq_1	01mq	0.281	0.281	0.00	1.3099400E-02
01mq_2	01mq	0.272	0.272	0.00	1.3099400E-02
01mq_3	01mq	0.267	0.267	0.00	1.3099400E-02
~					
01mq_3742	01mq	0.701	0.701	0.00	1.3099400E-02
01mq_3743	01mq	0.763	0.762	1.00E-03	1.3099400E-02
01mq_3744	01mq	0.706	0.706	0.00	1.3099400E-02
peak_1	peak	5.708000	5.715229	-7.229E-03	4.8618220E-02
peak_2	peak	4.76	4.755700	4.300E-03	4.8618220E-02
peak_3	peak	8.749000	8.745064	3.936E-03	4.8618220E-02
peak_4	peak	4.054000	4.055955	-1.955E-03	4.8618220E-02
~					
peak_19	peak	2.482000	2.482295	-2.450E-04	4.8618220E-02
peak_20	peak	4.939000	4.941184	-2.184E-03	4.8618220E-02
peak_21	peak	2.83	2.831016	-1.016E-03	4.8618220E-02

Priloga H: Izvleček iz datoteke zabeležbe postopka izračuna Calib2.rec**Appendix H: The extract from the log file of the process calculates Calib2.rec****PEST RUN RECORD: CASE calib2**

PEST_HP Version: 16.1

PEST run mode:-

Regularisation mode

Case dimensions:-

Number of parameters	:	16
Number of adjustable parameters	:	16
Number of parameter groups	:	16
Number of observations	:	3765
Number of prior estimates	:	16

Model command line(s):-

Model.cmd

Model interface files:-

Templates:

Parameter.tpl

for model input files:

.\Data\Parameter.xml

(Parameter values written using double precision protocol.)

(Decimal point always included.)

Instruction files:

Results.ins

Peaks.ins

for reading model output files:

.\Results\Results.txt

.\Results\Peaks.txt

Singular value decomposition:-

Perform SVD on $XtQX$ or $Q^{(1/2)}X$: $XtQX$

Max. number of singular values to employ : 16

Ratio of lowest/highest singular value : 5.000000E-12

Record eigenvectors in SVD file : no

Derivatives calculation:-

Param group	Increment type	Increment low bound	Increment central	Forward or (central)	Multiplier Method (central)
01perc	relative	1.0000E-03	none	switch	2.000 parabolic
01uzl	relative	1.0000E-03	none	switch	2.000 parabolic
01k0	relative	1.0000E-03	none	switch	2.000 parabolic
01k1	relative	1.0000E-03	none	switch	2.000 parabolic
01k2	relative	1.0000E-03	none	switch	2.000 parabolic
01mxbs	relative	1.0000E-03	none	switch	2.000 parabolic
01cet	relative	1.0000E-03	none	switch	2.000 parabolic
01tt1	relative	1.0000E-03	1.00E-02	switch	2.000 parabolic
01cfm1	relative	1.0000E-03	none	switch	2.000 parabolic
01sp1	relative	1.0000E-03	none	switch	2.000 parabolic
01sfc1	relative	1.0000E-03	none	switch	2.000 parabolic
01cfr1	relative	1.0000E-03	none	switch	2.000 parabolic
01cwh1	relative	1.0000E-03	none	switch	2.000 parabolic
01fc1	relative	1.0000E-03	none	switch	2.000 parabolic
01lp1	relative	1.0000E-03	none	switch	2.000 parabolic
01bet1	relative	1.0000E-03	none	switch	2.000 parabolic

Parameter definitions:-

Name	Trans-formation	Change limit	Initial value	Lower bound	Upper bound
01perc	log	factor	1.00000	1.000000E-03	4.00000
01uzl	log	factor	20.0000	1.000000E-03	70.0000
01k0	log	factor	0.200000	0.100000	0.500000
01k1	log	factor	0.100000	1.000000E-02	0.200000
01k2	log	factor	5.000000E-02	5.000000E-05	0.100000
01mxbs	log	factor	1.00000	0.990000	2.50000
01cet	none	relative	1.000000E-03	0.00000	0.300000
01tt1	none	relative	1.000000E-03	-2.00000	0.500000
01cfm1	log	factor	3.00000	0.500000	5.00000
01sp1	log	factor	0.990000	1.000000E-03	1.00000
01sfc1	log	factor	0.990000	1.000000E-03	5.00000
01cfr1	log	factor	5.000000E-02	1.000000E-03	5.00000
01cwh1	log	factor	0.100000	1.000000E-03	5.00000
01fc1	log	factor	120.000	100.000	550.000
01lp1	log	factor	0.990000	0.300000	1.00000
01bet1	log	factor	2.00000	1.00000	5.00000

Name	Group	Scale	Offset	Model command number
------	-------	-------	--------	----------------------

01perc	01perc	1.00000	0.00000	1
01uzl	01uzl	1.00000	0.00000	1
01k0	01k0	1.00000	0.00000	1
01k1	01k1	1.00000	0.00000	1
01k2	01k2	1.00000	0.00000	1
01mxbs	01mxbs	1.00000	0.00000	1
01cet	01cet	1.00000	0.00000	1
01ttt1	01ttt1	1.00000	0.00000	1
01cfm1	01cfm1	1.00000	0.00000	1
01sp1	01sp1	1.00000	0.00000	1
01sfc1	01sfc1	1.00000	0.00000	1
01cfr1	01cfr1	1.00000	0.00000	1
01cwh1	01cwh1	1.00000	0.00000	1
01fc1	01fc1	1.00000	0.00000	1
01lp1	01lp1	1.00000	0.00000	1
01bet1	01bet1	1.00000	0.00000	1

Prior information:-

Prior info name	Factor	Parameter	Prior information	Weight
01perc	1.00000	* log(01perc)	= 0.00000	1.000
01uzl	1.00000	* log(01uzl)	= 1.30103	1.000
01k0	1.00000	* log(01k0)	= -0.698970	1.000
01k1	1.00000	* log(01k1)	= -1.00000	1.000
01k2	1.00000	* log(01k2)	= -1.30103	1.000
01mxbs	1.00000	* log(01mxbs)	= 0.00000	1.000
01cet	1.00000	* 01cet	= 1.000000E-03	1.000
01ttt1	1.00000	* 01ttt1	= 1.000000E-03	1.000
01cfm1	1.00000	* log(01cfm1)	= 0.477121	1.000
01sp1	1.00000	* log(01sp1)	= -4.364805E-03	1.000
01sfc1	1.00000	* log(01sfc1)	= -4.364805E-03	1.000
01cfr1	1.00000	* log(01cfr1)	= -1.30103	1.000
01cwh1	1.00000	* log(01cwh1)	= -1.00000	1.000
01fc1	1.00000	* log(01fc1)	= 2.07918	1.000
01lp1	1.00000	* log(01lp1)	= -4.364805E-03	1.000
01bet1	1.00000	* log(01bet1)	= 0.301030	1.000

Prior Info Name	Observation Group
01perc	regul_01perc
01uzl	regul_01uzl
01k0	regul_01k0
01k1	regul_01k1
01k2	regul_01k2
01mxbs	regul_01mxbs
01cet	regul_01cet

01tt1	regul_01tt1
01cfm1	regul_01cfm1
01sp1	regul_01sp1
01sfc1	regul_01sfc1
01cfr1	regul_01cfr1
01cwh1	regul_01cwh1
01fc1	regul_01fc1
01lp1	regul_01lp1
01bet1	regul_01bet1

Observations:-

Observation name	Observation	Weight	Group
01mq_1	0.281000	1.3099E-02	01mq
01mq_2	0.272000	1.3099E-02	01mq
01mq_3	0.267000	1.3099E-02	01mq

~ and so forth

01mq_3742	0.701000	1.3099E-02	01mq
01mq_3743	0.763000	1.3099E-02	01mq
01mq_3744	0.706000	1.3099E-02	01mq
peak_1	5.70800	4.8618E-02	peak
peak_2	4.76000	4.8618E-02	peak
peak_3	8.74900	4.8618E-02	peak

~ and so forth

peak_19	2.48200	4.8618E-02	peak
peak_20	4.93900	4.8618E-02	peak
peak_21	2.83000	4.8618E-02	peak

Control settings:-

Initial lambda	: 20.000
Lambda adjustment factor	: iteration-dependent
Value of variable governing adjustment	: -3.0000
Sufficient new/old phi ratio per optimisation iteration	: 0.30000
Limiting relative phi reduction between lambdas	: 1.00000E-02
Maximum trial lambdas per iteration	: 10
Forgive model run failure during lamda testing	: no
Forgive model run failure during Jacobian runs	: no
Perform Broyden's update of Jacobian matrix	: no
Undertake observation re-referencing	: no

Maximum factor parameter change (factor-limited changes) : 3.0000
 Maximum relative parameter change (relative-limited changes) : 3.0000
 Fraction of initial parameter values used in computing
 change limit for near-zero parameters : 1.00000E-04
 Allow bending of parameter upgrade vector : no
 Allow parameters to stick to their bounds : no

Relative phi reduction below which to begin use of
 central derivatives : 0.10000
 Iteration at which to first consider derivatives switch : 1

Relative phi reduction indicating convergence : 0.50000E-02
 Number of phi values required within this range : 4
 Maximum number of consecutive failures to lower phi : 4
 Minimal relative parameter change indicating convergence : 0.50000E-02
 Number of consecutive iterations with minimal param change : 4
 Maximum number of optimisation iterations : 50

Attempt automatic user intervention : no
 Attempt reuse of parameter sensitivities : no
 Scale parameters by their bounds : no

File saving options: -

Save best JCO file : yes
 Save multiple JCO files : no
 Save multiple REI files : no
 Save multiple PAR files : no

Extra settings for regularisation mode:-

Target/current measurement objective function ratio : 0.10000
 Acceptable/target measurement objective function ratio : 1.0500
 Minimum target measurement objective function value : 1.00000E-10
 Terminate inversion when measurement obj. fn. below target : yes

Initial regularisation weight factor : 1.0000
 Minimum regularisation weight factor : 1.00000E-10
 Maximum regularisation weight factor : 1.00000E+10

Weight factor solution adjustment ratio : 1.3000
 Weight factor solution tolerance : 1.00000E-02
 Automatic inter-regularisation group weights adjustment : yes
 Use sensitivities or number of items : sensitivities

```
Implement memory conservation          : no
Declare all regularisation information as linear      : no
```

OPTIMISATION RECORD

INITIAL CONDITIONS:

```
Current regularisation weight factor      = 1.0000
Current value of measurement objective function = 2.0000
Current value of regularisation objective function = 6.26837E-14
```

```
Sum of squared weighted residuals (ie phi)      = 2.0000
Contribution to phi from observation group "01mq" = 1.0000
Contribution to phi from observation group "peak" = 0.99999
Contribution to phi from observation group "regul_01perc" = 0.0000
Contribution to phi from observation group "regul_01uz1" = 1.88011E-17
Contribution to phi from observation group "regul_01k0" = 1.88011E-17
Contribution to phi from observation group "regul_01k1" = 0.0000
Contribution to phi from observation group "regul_01k2" = 1.88011E-17
Contribution to phi from observation group "regul_01mxbs" = 0.0000
Contribution to phi from observation group "regul_01cet" = 0.0000
Contribution to phi from observation group "regul_01tt1" = 0.0000
Contribution to phi from observation group "regul_01cfm1" = 2.05031E-15
Contribution to phi from observation group "regul_01sp1" = 6.00293E-24
Contribution to phi from observation group "regul_01sfc1" = 6.00293E-24
Contribution to phi from observation group "regul_01cfr1" = 1.88011E-17
Contribution to phi from observation group "regul_01cwh1" = 0.0000
Contribution to phi from observation group "regul_01fc1" = 6.05394E-14
Contribution to phi from observation group "regul_01lp1" = 6.00293E-24
Contribution to phi from observation group "regul_01bet1" = 1.88011E-17
```

Current parameter values

```
01perc 1.00000
01uz1 20.0000
01k0 0.200000
01k1 0.100000
01k2 5.000000E-02
01mxbs 1.00000
01cet 1.000000E-03
01tt1 1.000000E-03
01cfm1 3.00000
01sp1 0.990000
01sfc1 0.990000
01cfr1 5.000000E-02
01cwh1 0.100000
01fc1 120.000
```

```
01lp1    0.990000
01bet1   2.00000
```

```
OPTIMISATION ITERATION NO.      : 1
Model calls so far               : 1
Current regularisation weight factor      : 1.0000
Current value of measurement objective function : 2.0000
Current value of regularisation objective function : 6.26837E-14
Note: regularisation objective function is not comparable between
iterations because of IREGADJ regularisation weights adjustment.
```

```
Starting phi for this iteration      : 2.0000
Contribution to phi from observation group "01mq"      : 1.0000
Contribution to phi from observation group "peak"      : 0.99999
Contribution to phi from observation group "regul_01perc": 0.0000
Contribution to phi from observation group "regul_01uz1" : 1.88011E-17
Contribution to phi from observation group "regul_01k0" : 1.88011E-17
Contribution to phi from observation group "regul_01k1" : 0.0000
Contribution to phi from observation group "regul_01k2" : 1.88011E-17
Contribution to phi from observation group "regul_01mxbs": 0.0000
Contribution to phi from observation group "regul_01cet" : 0.0000
Contribution to phi from observation group "regul_01tt1" : 0.0000
Contribution to phi from observation group "regul_01cfm1": 2.05031E-15
Contribution to phi from observation group "regul_01sp1" : 6.00293E-24
Contribution to phi from observation group "regul_01sfc1": 6.00293E-24
Contribution to phi from observation group "regul_01cfr1": 1.88011E-17
Contribution to phi from observation group "regul_01cwh1": 0.0000
Contribution to phi from observation group "regul_01fc1" : 6.05394E-14
Contribution to phi from observation group "regul_01lp1" : 6.00293E-24
Contribution to phi from observation group "regul_01bet1": 1.88011E-17
```

Regularisation weights adjustment....

```
Group Name  Weights adjustment ratio from previous iteration
regul_01perc 1.00000
regul_01uz1  1.00000
regul_01k0   1.00000
regul_01k1   1.00000
regul_01k2   1.00000
regul_01mxbs 1.00000
regul_01cet  1.00000
regul_01tt1  1.00000
regul_01cfm1 1.00000
regul_01sp1  1.00000
regul_01sfc1 1.00000
regul_01cfr1 1.00000
regul_01cwh1 1.00000
```

```

regul_01fc1    1.00000
regul_01lp1    1.00000
regul_01bet1   1.00000
FRACPHIM-adjusted target measurement objective function : 0.20000

```

```

Re-calculated regularisation weight factor          : 0.12259
New starting objective function for this itn. (ie. phi) : 2.0000
Contribution to phi from observation group "01mq"      : 1.0000
Contribution to phi from observation group "peak"      : 0.99999
Contribution to phi from observation group "regul_01perc": 0.0000
Contribution to phi from observation group "regul_01uzl" : 2.82546E-19
Contribution to phi from observation group "regul_01k0" : 2.82546E-19
Contribution to phi from observation group "regul_01k1" : 0.0000
Contribution to phi from observation group "regul_01k2" : 2.82546E-19
Contribution to phi from observation group "regul_01mxbs": 0.0000
Contribution to phi from observation group "regul_01cet" : 0.0000
Contribution to phi from observation group "regul_01tt1" : 0.0000
Contribution to phi from observation group "regul_01cfm1": 3.08124E-17
Contribution to phi from observation group "regul_01sp1" : 9.02131E-26
Contribution to phi from observation group "regul_01sfc1": 9.02131E-26
Contribution to phi from observation group "regul_01cfr1": 2.82546E-19
Contribution to phi from observation group "regul_01cwh1": 0.0000
Contribution to phi from observation group "regul_01fc1" : 9.09797E-16
Contribution to phi from observation group "regul_01lp1" : 9.02131E-26
Contribution to phi from observation group "regul_01bet1": 2.82546E-19

```

```

Lambda = 20.000  ----->
Phi = 1.6393    ( 0.820 of starting phi)
Meas. fn. = 1.6393
Regul. fn. = 3.11132E-03

```

```

Lambda = 7.3681  ----->
Phi = 1.5935    ( 0.797 of starting phi)
Meas. fn. = 1.5934
Regul. fn. = 7.11345E-03

```

```

Lambda = 2.7144  ----->
Phi = 1.2436    ( 0.622 of starting phi)
Meas. fn. = 1.2423
Regul. fn. = 8.64054E-02

```

```

Lambda = 1.0000  ----->
Phi = 1.1401    ( 0.570 of starting phi)
Meas. fn. = 1.1353
Regul. fn. = 0.32367

```

```

Lambda = 0.36840  ----->

```

Phi = 1.4896 (0.745 of starting phi)

Meas. fn. = 1.4880

Regul. fn. = 0.10595

No more lambdas: phi rising

Current parameter values		Previous parameter values	
01perc	1.16615	01perc	1.00000
01uzl	17.3961	01uzl	20.0000
01k0	0.134110	01k0	0.200000
01k1	0.104910	01k1	0.100000
01k2	4.905000E-02	01k2	5.000000E-02
01mxbs	1.11994	01mxbs	1.00000
01cet	7.130000E-04	01cet	1.000000E-03
01tt1	3.319000E-03	01tt1	1.000000E-03
01cfm1	2.57373	01cfm1	3.00000
01sp1	1.00000	01sp1	0.990000
01sfc1	0.895577	01sfc1	0.990000
01cfr1	1.666670E-02	01cfr1	5.000000E-02
01cwh1	7.129400E-02	01cwh1	0.100000
01fc1	157.301	01fc1	120.000
01lp1	0.769116	01lp1	0.990000
01bet1	2.15662	01bet1	2.00000

Maximum factor change (factor-limited params): 3.000 ("01cfr1")
 Maximum relative change (relative-limited params): 2.319 ("01tt1")
 Maximum relative change (all params): 2.319 ("01tt1")

~ and so one to the last iteration number 35...

~~~~~

OPTIMISATION ITERATION NO. : 35

Model calls so far : 1224

Current regularisation weight factor : 2.12972E-05

Current value of measurement objective function : 2.25352E-06

Current value of regularisation objective function : 1.4563

Note: regularisation objective function is not comparable between iterations because of IREGADJ regularisation weights adjustment.

Starting phi for this iteration : 2.25418E-06

Contribution to phi from observation group "01mq" : 1.39009E-06

Contribution to phi from observation group "peak" : 8.63433E-07

Contribution to phi from observation group "regul\_01perc": 1.09738E-11

Contribution to phi from observation group "regul\_01uzl" : 6.46941E-17

Contribution to phi from observation group "regul\_01k0" : 7.42293E-16

Contribution to phi from observation group "regul\_01k1" : 4.24067E-12

Contribution to phi from observation group "regul\_01k2" : 2.23525E-11  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01mxbs": 7.18223E-11  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01cet" : 4.47910E-12  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01tt1" : 4.49877E-10  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01cfm1": 2.23233E-11  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01sp1" : 8.64122E-15  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01sfc1": 3.94167E-12  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01cfr1": 3.68406E-14  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01cwh1": 1.89602E-14  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01fc1" : 4.60715E-11  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01lp1" : 1.02781E-11  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01bet1": 1.41319E-11  
 All frozen parameters freed.

Regularisation weights adjustment....

Group Name Weights adjustment ratio from previous iteration

regul\_01perc 1.00000  
 regul\_01uzl 1.00000  
 regul\_01k0 1.00000  
 regul\_01k1 1.00000  
 regul\_01k2 1.00000  
 regul\_01mxbs 1.00000  
 regul\_01cet 1.00000  
 regul\_01tt1 1.00000  
 regul\_01cfm1 1.00000  
 regul\_01sp1 1.00000  
 regul\_01sfc1 1.00000  
 regul\_01cfr1 1.00000  
 regul\_01cwh1 1.00000  
 regul\_01fc1 1.00000  
 regul\_01lp1 1.00000  
 regul\_01bet1 1.00000

FRACPHIM-adjusted target measurement objective function : 2.25352E-07

Re-calculated regularisation weight factor : 1.63825E-05

New starting objective function for this itn. (ie. phi) : 2.25391E-06

Contribution to phi from observation group "01mq" : 1.39009E-06  
 Contribution to phi from observation group "peak" : 8.63433E-07  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01perc": 6.49340E-12  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01uzl" : 3.82805E-17  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01k0" : 4.39226E-16  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01k1" : 2.50927E-12  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01k2" : 1.32263E-11  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01mxbs": 4.24984E-11  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01cet" : 2.65035E-12  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01tt1" : 2.66200E-10  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01cfm1": 1.32091E-11

Contribution to phi from observation group "regul\_01sp1" : 5.11315E-15  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01sfc1": 2.33235E-12  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01cfr1": 2.17992E-14  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01cwh1": 1.12191E-14  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01fc1" : 2.72613E-11  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01lp1" : 6.08169E-12  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01bet1": 8.36205E-12  
 param "01cfm1" frozen: gradient and update vectors out of bounds  
 param "01sp1" frozen: gradient and update vectors out of bounds

Lambda = 9.68873E-05 ----->  
 Phi = 2.07466E-06 ( 0.920 of starting phi)  
 Meas. fn. = 2.07427E-06  
 Regul. fn. = 1.4568

Lambda = 4.44996E-06 ----->  
 Phi = 2.07466E-06 ( 0.920 of starting phi)  
 Meas. fn. = 2.07427E-06  
 Regul. fn. = 1.4568

No more lambdas: relative phi reduction between lambdas less than 0.0100

| Current parameter values |              | Previous parameter values |              |
|--------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| 01perc                   | 0.698909     | 01perc                    | 0.698964     |
| 01uzl                    | 20.0174      | 01uzl                     | 20.0174      |
| 01k0                     | 0.200550     | 01k0                      | 0.200590     |
| 01k1                     | 8.003000E-02 | 01k1                      | 8.004000E-02 |
| 01k2                     | 2.998000E-02 | 01k2                      | 2.999000E-02 |
| 01mxbs                   | 2.49998      | 01mxbs                    | 2.49994      |
| 01cet                    | 0.100340     | 01cet                     | 0.100374     |
| 01tt1                    | -0.995130    | 01tt1                     | -0.994920    |
| 01cfm1                   | 5.00000      | 01cfm1                    | 5.00000      |
| 01sp1                    | 1.00000      | 01sp1                     | 1.00000      |
| 01sfc1                   | 0.798815     | 01sfc1                    | 0.798755     |
| 01cfr1                   | 4.900560E-02 | 01cfr1                    | 4.897310E-02 |
| 01cwh1                   | 9.859690E-02 | 01cwh1                    | 9.852230E-02 |
| 01fc1                    | 249.978      | 01fc1                     | 249.971      |
| 01lp1                    | 0.700029     | 01lp1                     | 0.700006     |
| 01bet1                   | 3.00294      | 01bet1                    | 3.00292      |

Maximum factor change ( factor-limited params): 1.001 ("01cwh1")  
 Maximum relative change (relative-limited params): 3.3873E-04 ("01cet")  
 Maximum relative change ( all params): 7.5719E-04 ("01cwh1")

Optimisation complete: relative parameter change less than 5.0000E-03  
 over 4 successive iterations.

Total model calls: 1258

The model has been run one final time using best parameters.  
Thus all model input files contain best parameter values, and model  
output files contain model results based on these parameters.

#### OPTIMISATION RESULTS

Covariance matrix and parameter confidence intervals cannot be determined:-  
Some form of regularisation was implemented so these are not applicable.

Use the PREDUNC7 utility to obtain a full posterior covariance matrix.

Parameters ----->

| Parameter | Estimated value |
|-----------|-----------------|
| 01perc    | 0.698909        |
| 01uzl     | 20.0174         |
| 01k0      | 0.200550        |
| 01k1      | 8.003000E-02    |
| 01k2      | 2.998000E-02    |
| 01mxbs    | 2.49998         |
| 01cet     | 0.100340        |
| 01ttt1    | -0.995130       |
| 01cfm1    | 5.00000         |
| 01sp1     | 1.00000         |
| 01sfc1    | 0.798815        |
| 01cfr1    | 4.900560E-02    |
| 01cwh1    | 9.859690E-02    |
| 01fc1     | 249.978         |
| 01lp1     | 0.700029        |
| 01bet1    | 3.00294         |

See file calib2.sen for parameter sensitivities.  
Note that these sensitivities include effects of regularisation observations.

Regularisation Weight Factor ----->

Optimised regularisation weight factor = 1.63825E-05

Pertinent observation and prior information weights shown below are  
calculated using this weight factor.

Note that the target measurement objective function was not achieved.

Observations ----->

| Observation | Measured | Calculated | Residual | Weight | Group |
|-------------|----------|------------|----------|--------|-------|
|-------------|----------|------------|----------|--------|-------|

|       |          |          |         |            |      |
|-------|----------|----------|---------|------------|------|
| 1mq_1 | 0.281000 | 0.281000 | 0.00000 | 1.3099E-02 | 01mq |
| 1mq_2 | 0.272000 | 0.272000 | 0.00000 | 1.3099E-02 | 01mq |
| 1mq_3 | 0.267000 | 0.267000 | 0.00000 | 1.3099E-02 | 01mq |

|          |          |          |               |            |      |
|----------|----------|----------|---------------|------------|------|
| 1mq_3742 | 0.701000 | 0.701000 | 0.00000       | 1.3099E-02 | 01mq |
| 1mq_3743 | 0.763000 | 0.762000 | 1.000000E-03  | 1.3099E-02 | 01mq |
| 1mq_3744 | 0.706000 | 0.706000 | 0.00000       | 1.3099E-02 | 01mq |
| eak_1    | 5.70800  | 5.71523  | -7.228559E-03 | 4.8618E-02 | peak |
| eak_2    | 4.76000  | 4.75570  | 4.299843E-03  | 4.8618E-02 | peak |
| eak_3    | 8.74900  | 8.74506  | 3.936492E-03  | 4.8618E-02 | peak |

|        |         |         |               |            |      |
|--------|---------|---------|---------------|------------|------|
| eak_19 | 2.48200 | 2.48229 | -2.949976E-04 | 4.8618E-02 | peak |
| eak_20 | 4.93900 | 4.94118 | -2.184395E-03 | 4.8618E-02 | peak |
| eak_21 | 2.83000 | 2.83102 | -1.015577E-03 | 4.8618E-02 | peak |

Prior information ----->

| rior  | Provided      | Calculated    | Residual      | Weight     | Group        |
|-------|---------------|---------------|---------------|------------|--------------|
| 1perc | 0.00000       | -0.155580     | 0.155580      | 1.6382E-05 | regul_01perc |
| 1uzl  | 1.30103       | 1.30141       | -3.776676E-04 | 1.6382E-05 | regul_01uzl  |
| 1k0   | -0.698970     | -0.697777     | -1.192666E-03 | 1.6382E-05 | regul_01k0   |
| 1k1   | -1.00000      | -1.09675      | 9.674718E-02  | 1.6382E-05 | regul_01k1   |
| 1k2   | -1.30103      | -1.52317      | 0.222138      | 1.6382E-05 | regul_01k2   |
| 1mxbs | 0.00000       | 0.397937      | -0.397937     | 1.6382E-05 | regul_01mxbs |
| 1cet  | 1.000000E-03  | 0.100340      | -9.934000E-02 | 1.6382E-05 | regul_01cet  |
| 1tt1  | 1.000000E-03  | -0.995130     | 0.996130      | 1.6382E-05 | regul_01tt1  |
| 1cfm1 | 0.477121      | 0.698970      | -0.221849     | 1.6382E-05 | regul_01cfm1 |
| 1sp1  | -4.364805E-03 | 0.00000       | -4.364805E-03 | 1.6382E-05 | regul_01sp1  |
| 1sfc1 | -4.364805E-03 | -9.755384E-02 | 9.318904E-02  | 1.6382E-05 | regul_01sfc1 |
| 1cfr1 | -1.30103      | -1.30975      | 8.724289E-03  | 1.6382E-05 | regul_01cfr1 |
| 1cwh1 | -1.00000      | -1.00614      | 6.136740E-03  | 1.6382E-05 | regul_01cwh1 |
| 1fc1  | 2.07918       | 2.39790       | -0.318721     | 1.6382E-05 | regul_01fc1  |
| 1lp1  | -4.364805E-03 | -0.154884     | 0.150519      | 1.6382E-05 | regul_01lp1  |
| 1bet1 | 0.301030      | 0.477547      | -0.176517     | 1.6382E-05 | regul_01bet1 |

See file calib2.res for more details of residuals in graph-ready format.

See file calib2.seo for composite observation sensitivities.

Objective function ----->

Sum of squared weighted residuals (ie phi) = 2.07466E-06

Contribution to phi from observation group "01mq" = 1.26534E-06  
 Contribution to phi from observation group "peak" = 8.08935E-07  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01perc" = 6.49627E-12  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01uzl" = 3.82805E-17  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01k0" = 3.81765E-16  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01k1" = 2.51209E-12  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01k2" = 1.32436E-11  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01mxbs" = 4.24997E-11  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01cet" = 2.64854E-12  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01tt1" = 2.66312E-10  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01cfm1" = 1.32091E-11  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01sp1" = 5.11315E-15  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01sfc1" = 2.33071E-12  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01cfr1" = 2.04277E-14  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01cwh1" = 1.01073E-14  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01fc1" = 2.72633E-11  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01lp1" = 6.08054E-12  
 Contribution to phi from observation group "regul\_01bet1" = 8.36236E-12

Optimised measurement objective function = 2.07427E-06  
 Optimised regularisation weight factor = 1.63825E-05  
 Optimised regularisation objective function = 1.4568

**Correlation coefficient** = **1.0000**  
 (Includes measurement observations only.)

#### Analysis of residuals ----->

All residuals:-

Number of residuals with non-zero weight = 3781  
 Mean value of non-zero weighted residuals = 5.4817E-06  
 Maximum weighted residual (observation "peak\_16") = 5.6905E-04  
 Minimum weighted residual (observation "peak\_1") = -3.5144E-04  
 Standard variance of weighted residuals = 5.5104E-10  
 Standard error of weighted residuals = 2.3474E-05

Note: the above variance was obtained by dividing the objective function by the number of system degrees of freedom (ie. number of observations with non-zero weight plus number of prior information articles with non-zero weight minus the number of adjustable parameters.)  
 If the degrees of freedom is negative the divisor becomes the number of observations with non-zero weight plus the number of prior information items with non-zero weight.

Residuals for observation group "01mq":-

Number of residuals with non-zero weight = 3744

|                                                     |               |
|-----------------------------------------------------|---------------|
| Mean value of non-zero weighted residuals           | = 5.6400E-06  |
| Maximum weighted residual (observation "01mq_1273") | = 2.4889E-04  |
| Minimum weighted residual (observation "01mq_1255") | = -1.0480E-04 |
| "Variance" of weighted residuals                    | = 3.3796E-10  |
| "Standard error" of weighted residuals              | = 1.8384E-05  |

Note: the above "variance" was obtained by dividing the sum of squared residuals by the number of items with non-zero weight.

Residuals for observation group "peak":-

|                                                   |               |
|---------------------------------------------------|---------------|
| Number of residuals with non-zero weight          | = 21          |
| Mean value of non-zero weighted residuals         | = -1.8958E-05 |
| Maximum weighted residual (observation "peak_16") | = 5.6905E-04  |
| Minimum weighted residual (observation "peak_1")  | = -3.5144E-04 |
| "Variance" of weighted residuals                  | = 3.8521E-08  |
| "Standard error" of weighted residuals            | = 1.9627E-04  |

Note: the above "variance" was obtained by dividing the sum of squared residuals by the number of items with non-zero weight.

Residuals for observation group "regul\_01perc":-

|                                                  |              |
|--------------------------------------------------|--------------|
| Number of residuals with non-zero weight         | = 1          |
| Mean value of non-zero weighted residuals        | = 2.5488E-06 |
| Maximum weighted residual (observation "01perc") | = 2.5488E-06 |
| Minimum weighted residual (observation "01perc") | = 2.5488E-06 |
| "Variance" of weighted residuals                 | = 6.4963E-12 |
| "Standard error" of weighted residuals           | = 2.5488E-06 |

Note: the above "variance" was obtained by dividing the sum of squared residuals by the number of items with non-zero weight.

Residuals for observation group "regul\_01uzl":-

|                                                 |               |
|-------------------------------------------------|---------------|
| Number of residuals with non-zero weight        | = 1           |
| Mean value of non-zero weighted residuals       | = -6.1871E-09 |
| Maximum weighted residual (observation "01uzl") | = -6.1871E-09 |
| Minimum weighted residual (observation "01uzl") | = -6.1871E-09 |
| "Variance" of weighted residuals                | = 3.8281E-17  |
| "Standard error" of weighted residuals          | = 6.1871E-09  |

Note: the above "variance" was obtained by dividing the sum of squared residuals by the number of items with non-zero weight.

Residuals for observation group "regul\_01k0":-

|                                                |               |
|------------------------------------------------|---------------|
| Number of residuals with non-zero weight       | = 1           |
| Mean value of non-zero weighted residuals      | = -1.9539E-08 |
| Maximum weighted residual (observation "01k0") | = -1.9539E-08 |
| Minimum weighted residual (observation "01k0") | = -1.9539E-08 |

"Variance" of weighted residuals = 3.8177E-16  
 "Standard error" of weighted residuals = 1.9539E-08

Note: the above "variance" was obtained by dividing the sum of squared residuals by the number of items with non-zero weight.

Residuals for observation group "regul\_01k1":-

Number of residuals with non-zero weight = 1  
 Mean value of non-zero weighted residuals = 1.5850E-06  
 Maximum weighted residual (observation "01k1") = 1.5850E-06  
 Minimum weighted residual (observation "01k1") = 1.5850E-06  
 "Variance" of weighted residuals = 2.5121E-12  
 "Standard error" of weighted residuals = 1.5850E-06

Note: the above "variance" was obtained by dividing the sum of squared residuals by the number of items with non-zero weight.

Residuals for observation group "regul\_01k2":-

Number of residuals with non-zero weight = 1  
 Mean value of non-zero weighted residuals = 3.6392E-06  
 Maximum weighted residual (observation "01k2") = 3.6392E-06  
 Minimum weighted residual (observation "01k2") = 3.6392E-06  
 "Variance" of weighted residuals = 1.3244E-11  
 "Standard error" of weighted residuals = 3.6392E-06

Note: the above "variance" was obtained by dividing the sum of squared residuals by the number of items with non-zero weight.

Residuals for observation group "regul\_01mxbs":-

Number of residuals with non-zero weight = 1  
 Mean value of non-zero weighted residuals = -6.5192E-06  
 Maximum weighted residual (observation "01mxbs") = -6.5192E-06  
 Minimum weighted residual (observation "01mxbs") = -6.5192E-06  
 "Variance" of weighted residuals = 4.2500E-11  
 "Standard error" of weighted residuals = 6.5192E-06

Note: the above "variance" was obtained by dividing the sum of squared residuals by the number of items with non-zero weight.

Residuals for observation group "regul\_01cet":-

Number of residuals with non-zero weight = 1  
 Mean value of non-zero weighted residuals = -1.6274E-06  
 Maximum weighted residual (observation "01cet") = -1.6274E-06  
 Minimum weighted residual (observation "01cet") = -1.6274E-06  
 "Variance" of weighted residuals = 2.6485E-12  
 "Standard error" of weighted residuals = 1.6274E-06

Note: the above "variance" was obtained by dividing the sum of squared residuals by the number of items with non-zero weight.

Residuals for observation group "regul\_01tt1":-

|                                                 |              |
|-------------------------------------------------|--------------|
| Number of residuals with non-zero weight        | = 1          |
| Mean value of non-zero weighted residuals       | = 1.6319E-05 |
| Maximum weighted residual (observation "01tt1") | = 1.6319E-05 |
| Minimum weighted residual (observation "01tt1") | = 1.6319E-05 |
| "Variance" of weighted residuals                | = 2.6631E-10 |
| "Standard error" of weighted residuals          | = 1.6319E-05 |

Note: the above "variance" was obtained by dividing the sum of squared residuals by the number of items with non-zero weight.

Residuals for observation group "regul\_01cfm1":-

|                                                  |               |
|--------------------------------------------------|---------------|
| Number of residuals with non-zero weight         | = 1           |
| Mean value of non-zero weighted residuals        | = -3.6344E-06 |
| Maximum weighted residual (observation "01cfm1") | = -3.6344E-06 |
| Minimum weighted residual (observation "01cfm1") | = -3.6344E-06 |
| "Variance" of weighted residuals                 | = 1.3209E-11  |
| "Standard error" of weighted residuals           | = 3.6344E-06  |

Note: the above "variance" was obtained by dividing the sum of squared residuals by the number of items with non-zero weight.

Residuals for observation group "regul\_01sp1":-

|                                                 |               |
|-------------------------------------------------|---------------|
| Number of residuals with non-zero weight        | = 1           |
| Mean value of non-zero weighted residuals       | = -7.1506E-08 |
| Maximum weighted residual (observation "01sp1") | = -7.1506E-08 |
| Minimum weighted residual (observation "01sp1") | = -7.1506E-08 |
| "Variance" of weighted residuals                | = 5.1131E-15  |
| "Standard error" of weighted residuals          | = 7.1506E-08  |

Note: the above "variance" was obtained by dividing the sum of squared residuals by the number of items with non-zero weight.

Residuals for observation group "regul\_01sfc1":-

|                                                  |              |
|--------------------------------------------------|--------------|
| Number of residuals with non-zero weight         | = 1          |
| Mean value of non-zero weighted residuals        | = 1.5267E-06 |
| Maximum weighted residual (observation "01sfc1") | = 1.5267E-06 |
| Minimum weighted residual (observation "01sfc1") | = 1.5267E-06 |
| "Variance" of weighted residuals                 | = 2.3307E-12 |
| "Standard error" of weighted residuals           | = 1.5267E-06 |

Note: the above "variance" was obtained by dividing the sum of squared residuals by the number of items with non-zero weight.

Residuals for observation group "regul\_01cfr1":-

|                                                  |              |
|--------------------------------------------------|--------------|
| Number of residuals with non-zero weight         | = 1          |
| Mean value of non-zero weighted residuals        | = 1.4293E-07 |
| Maximum weighted residual (observation "01cfr1") | = 1.4293E-07 |
| Minimum weighted residual (observation "01cfr1") | = 1.4293E-07 |
| "Variance" of weighted residuals                 | = 2.0428E-14 |
| "Standard error" of weighted residuals           | = 1.4293E-07 |

Note: the above "variance" was obtained by dividing the sum of squared residuals by the number of items with non-zero weight.

Residuals for observation group "regul\_01cwh1":-

|                                                  |              |
|--------------------------------------------------|--------------|
| Number of residuals with non-zero weight         | = 1          |
| Mean value of non-zero weighted residuals        | = 1.0053E-07 |
| Maximum weighted residual (observation "01cwh1") | = 1.0053E-07 |
| Minimum weighted residual (observation "01cwh1") | = 1.0053E-07 |
| "Variance" of weighted residuals                 | = 1.0107E-14 |
| "Standard error" of weighted residuals           | = 1.0053E-07 |

Note: the above "variance" was obtained by dividing the sum of squared residuals by the number of items with non-zero weight.

Residuals for observation group "regul\_01fc1":-

|                                                 |               |
|-------------------------------------------------|---------------|
| Number of residuals with non-zero weight        | = 1           |
| Mean value of non-zero weighted residuals       | = -5.2214E-06 |
| Maximum weighted residual (observation "01fc1") | = -5.2214E-06 |
| Minimum weighted residual (observation "01fc1") | = -5.2214E-06 |
| "Variance" of weighted residuals                | = 2.7263E-11  |
| "Standard error" of weighted residuals          | = 5.2214E-06  |

Note: the above "variance" was obtained by dividing the sum of squared residuals by the number of items with non-zero weight.

Residuals for observation group "regul\_01lp1":-

|                                                 |              |
|-------------------------------------------------|--------------|
| Number of residuals with non-zero weight        | = 1          |
| Mean value of non-zero weighted residuals       | = 2.4659E-06 |
| Maximum weighted residual (observation "01lp1") | = 2.4659E-06 |
| Minimum weighted residual (observation "01lp1") | = 2.4659E-06 |
| "Variance" of weighted residuals                | = 6.0805E-12 |
| "Standard error" of weighted residuals          | = 2.4659E-06 |

Note: the above "variance" was obtained by dividing the sum of squared residuals by the number of items with non-zero weight.

Residuals for observation group "regul\_01bet1":-

|                                           |               |
|-------------------------------------------|---------------|
| Number of residuals with non-zero weight  | = 1           |
| Mean value of non-zero weighted residuals | = -2.8918E-06 |

Maximum weighted residual (observation "01bet1") = -2.8918E-06

Minimum weighted residual (observation "01bet1") = -2.8918E-06

"Variance" of weighted residuals = 8.3624E-12

"Standard error" of weighted residuals = 2.8918E-06

Note: the above "variance" was obtained by dividing the sum of squared residuals by the number of items with non-zero weight.

## Priloga I: Članki avtorja povezani z doktorsko disertacijo

### Appendix I: Author's articles related to the doctoral dissertation

- 1) Vidmar, A.; Brilly, M.; Sapač, K.; Kryžanowski, A. Efficient Calibration of a Conceptual Hydrological Model Based on the Enhanced Gauss–Levenberg–Marquardt Procedure. *Appl. Sci.* 2020, 10, 3841. doi:10.3390/app10113841.
- 2) Vidmar, A. A Quickstart Guide to HBV-light Hydrological Model Calibration using PEST. *Appl. Sci.* 2020, 1–17.
- 3) Vidmar, A.; Globevnik, L.; Koprivšek, M.; Sečnik, M.; Zabret, K.; Durović, B.; Anzeljc, D.; Kastelic, J.; Kobold, M.; Sušnik, M.; idr. The Bosna River floods in May 2014. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2016**, 16, 2235–2246. doi:10.5194/nhess-16-2235-2016.
- 4) Smith, M.B.; Vidmar, A. Data set derivation for GIS-based urban hydrological modeling. *Photogramm. Eng. Remote Sensing* **1994**, 60, 67–76.
- 5) Brilly, M.; Kryžanowski, A.; Šraj, M.; Bezak, N.; Sapač, K.; Vidmar, A.; Rusjan, S. Historical, Hydrological and Hydraulics Studies for Sustainable Flood Management. V *Achievements and Challenges of Integrated River Basin Management*; InTech, 2018. doi:10.5772/intechopen.74432.
- 6) Brilly, M.; Šraj, M.; Vidmar, A.; Primožič, M.; Koprivšek, M. Climate Change Impact on Flood Hazard in the Sava River Basin. *Handb. Environ. Chem.* **2015**, 31, 27–52. doi:10.1007/978-3-662-44034-6\_2.