

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Mutavčič, D., 2016. Analiza občutljivosti parametrov hidrološkega modela Bolska. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Brilly, M., somentor Vidmar, A.): 58 str.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5812/>

Datum arhiviranja: 18-10-2016

University  
of Ljubljana  
Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Mutavčič, D., 2016. Analiza občutljivosti parametrov hidrološkega modela Bolska. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Brilly, M., co-supervisor Vidmar, A.): 58 pp.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5812/>

Archiving Date: 18-10-2016

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM VODARSTVO IN  
KOMUNALNO INŽENIRSTVO

Kandidat:

**DARKO MUTAVČIČ**

**ANALIZA OBČUTLJIVOSTI PARAMETROV  
HIDROLOŠKEGA MODELA BOLSKA**

Diplomska naloga št.: 325/VKI

**PARAMETER SENSITIVITY ANALYSIS OF  
HYDROLOGICAL MODEL BOLSKA**

Graduation thesis No.: 325/VKI

**Mentor:**

prof. dr. Mitja Brilly

**Somentor:**

viš. pred. mag. Andrej Vidmar

Ljubljana, 14. 09. 2016

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

» Ta stran je namenoma prazna. «

## IZJAVA

Spodaj podpisani/-a študent/-ka Darko Mutavčić, vpisna številka 26300216, avtor/-ica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Analiza občutljivosti parametrov hidrološkega modela Bolska.

### IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

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/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

5. 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.

V/Na: Ljubljani

Datum: 24. 8. 2016

Podpis študenta/-ke:

---

» Ta stran je namenoma prazna. «

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

<b>UDK:</b>	<b>556.06(497.4)(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Darko Mutavčič</b>
<b>Mentor:</b>	<b>prof. dr. Mitja Brilly</b>
<b>Somentor:</b>	<b>viš. pred. mag. Andrej Vidmar</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Analiza občutljivosti parametrov hidrološkega modela Bolska</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>diplomska naloga – univerzitetni študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>XX + 58 str., 50 sl., 6 pregl., 13 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>površinski odtok, Bolska, HBV model, analiza občutljivosti</b>

### **Izvleček**

HBV je konceptualen hidrološki model, ki se uporablja pri hidrološkem napovedovanju in študiju vodnih bilanc. V tem delu je HBV-light modelu podvrženo 190 km<sup>2</sup> veliko porečje Bolske. S pomočjo orodja Monte Carlo Simulacije, ki je vgrajen v HBV-light modelu, smo analizirali individualno občutljivost parametrov, občutljivost s spreminjanjem dveh parametrov in vpliv parametrov na maksimalni pretok pri poplavi. Analize so narejene na podlagi koeficienta učinkovitosti oziroma Nash-Sutcliffovega kriterija. Individualna analiza je pokazala večjo občutljivost parametrov generiranja odtoka glede na parametre ostalih treh računov, predvsem vpliv iztoka srednjega rezervoarja in vpliv iztoka spodnjega rezervoarja na celokupni odtok. Parametri računa akumulacije in taljenja snega so se izkazali kot neobčutljivi za dani model. Ob analizi občutljivosti s spreminjanjem dveh parametrov hkrati smo pri večini kombinacij parametrov opazili medsebojno odvisnost parametrov, kar odraža negotovost v rezultatih. Parametri, ki so izkazali največ vpliva na maksimalni pretok so: K0, K1, UZL, PERC in FC.

» Ta stran je namenoma prazna. «



## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDK:** 556.06(497.4)(043.2)  
**Author:** Darko Mutavčič  
**Supervisor:** Prof. Mitja Brilly, Ph.D.  
**Cosupervisor:** Sen. Lect. Andrej Vidmar, M.Sc.  
**Title:** Parameter sensitivity analysis of hydrological model Bolska  
**Document type:** Graduating Thesis – University studies  
**Scope and tools:** XX + 58 p., 50 fig., 6 tab., 13 eq.  
**Keywords:** Runoff, Bolska catchment, HBV model, sensitivity analysis

### **Abstract:**

Conceptual hydrological model HBV is extensively used in operational hydrological forecasting and water balance studies. In this paper, we apply the HBV model on 190 km<sup>2</sup> basin Bolska. Using the tools of Monte Carlo simulation, which is built in the HBV-light model, we analyzed the individual sensitivity of the parameters, a sensitivity by changing the two parameters and the influence of parameters on the maximum flow in the flood. Analysis were done on the basis of Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient. Individual analysis showed greater sensitivity of response routine parameters with respect to other three routines; it is most clearly seen through the influence of the middle box outflow and lower box outflow on the total runoff. Parameters of the snow routine have proved to be insensitive. By varying two parameters simultaneously the sensitivity analysis revealed interdependence of parameters in most of parameter combinations, reflecting the uncertainty in the results. Parameters that showed the most influence on the maximum flow are: K0, K1, UZL, PERC and FC.

» Ta stran je namenoma prazna. «

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Mitji Brillyju in somentorju viš. pred. mag. Andreju Vidmarju za vse usmeritve pri nastajanju tega zaključnega dela. Prav tako se zahvaljujem vsem bližnjim za podporo in vzpodbudo.

» Ta stran je namenoma prazna. «

## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1	Hidrološki krog.....	2
1.2	Površinski odtok.....	3
1.3	Modeliranje površinskega odтока.....	4
<b>2</b>	<b>HBV-LIGHT MODEL</b> .....	<b>9</b>
2.1	Kratek opis HBV modela.....	10
2.2	HBV-light programska oprema.....	12
2.2.1	<i>Vhodni podatki</i> .....	12
2.2.2	<i>Izhodni podatki</i> .....	14
2.2.3	<i>Parametri modela</i> .....	14
2.2.4	<i>Tipi modela</i> .....	16
2.2.5	<i>Umerjanje modela</i> .....	17
<b>3</b>	<b>POREČJE BOLSKA</b> .....	<b>18</b>
3.1	Opis porečja ter sestava in oblikovanost površja.....	18
3.2	Hidrogeografske značilnosti in poplave.....	20
3.2.1	<i>Poplavni dogodek 18.9.2007</i> .....	22
<b>4</b>	<b>ANALIZA OBČUTLJIVOSTI PARAMETROV</b> .....	<b>26</b>
4.1	Zgradba modela.....	27
4.2	Individualna analiza občutljivosti parametrov.....	29
4.3	Analiza občutljivosti s spreminjanjem dveh parametrov hkrati.....	32
4.4	Analiza vpliva parametrov na maksimalni pretok ob poplavi.....	33
<b>5</b>	<b>REZULTATI</b> .....	<b>34</b>
5.1	Rezultati 4.2.....	35
5.2	Rezultati 4.3.....	40
5.3	Rezultati 4.4.....	47
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČEK</b> .....	<b>52</b>
<b>7</b>	<b>VIRI</b> .....	<b>54</b>

» Ta stran je namenoma prazna. «

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Prikaz parametrov modela.....	15
Preglednica 2: Izmerjene vrednosti dnevni padavin in uteži Thiessenovih poligonov za padavinske postaje porečja Bolske do vodomerne postaje Dolenja vas II (Štrukelj, 2008).....	24
Preglednica 3: Izsek iz PTQ datoteke. ....	27
Preglednica 4: Mesečne povprečne vrednosti iz EVAP.....	27
Preglednica 5: Parametri HBV modela, njihov razpon in optimizirane vrednosti.....	31
Preglednica 6: Višinske cone .....	31

» Ta stran je namenoma prazna. «



## KAZALO SLIK

Slika 1: Grafična reprezentacija globalnega hidrološkega kroga (Trenberth in sod., 2007) .....	2
Slika 2: Komponente tipičnega hidrograma (Pugelj, 2012) .....	4
Slika 3: Klasifikacija modelov za primer površinskega odtoka (prirejeno po Refsgaard, 1996). .....	6
Slika 4: Grafični vmesnik HBV-light.....	9
Slika 5: Prikaz delne porazdelitve povodja (Van der Velde, 2009). .....	10
Slika 6: Generiranje odtoka (prirejeno po Seibert, 2005). .....	11
Slika 7: Prikaz PTQ datoteke. ....	13
Slika 8: Prikaz EVAP datoteke. ....	13
Slika 9: Prikaz izhodne datoteke Results.txt. ....	14
Slika 10: Primeri vplivov spremembe parametrov generiranja odtoka na simulacijo (Seibert, 2005)..	15
Slika 11: Različni tipi modela (Kotar, 2013). ....	16
Slika 13: Reka Bolska s pritoki do izliva v Savinjo, z višinskimi pasovi (Jelen, A. in sod., 2015).....	18
Slika 14: Poenostavljena geološka zgradba Spodnje Savinjske doline in vzpetega sveta (Jelen, A. in sod., 2015).....	20
Slika 15: Min in max vrednosti vodostaja za obdobje 1962-2014 (postaja Dolenja vas). ....	21
Slika 16: Min in max vrednosti pretoka za obdobje 1962-2014 (postaja Dolenja vas).....	21
Slika 17: Območja poplavnih dogodkov v Spodnji Savinjski dolini (Jelen, A. in sod., 2015). ....	22
Slika 18: Poplave na Vranskem (Fazarinc, 2007). ....	23
Slika 19: Porečje Bolske s padavinskimi postajami (vijolična) in vodomerno postajo Dolenja vas II (Štrukelj, 2008). ....	24
Slika 20: Hidrogram Bolske (Visoke vode in poplave 18. septembra 2007, 2008.). ....	24
Slika 21: Vremenska slika padavin za poplavni dogodek 18.9.2007 (ECAD, 2016).....	25
Slika 22: Vegetacijske cone. ....	28
Slika 23: Srednje vrednosti elevacijskih con in deleži površin za vsako elevacijsko-vegetacijsko cono. ....	29
Slika 24: Prikaz merjenega in simuliranega maksimalnega pretoka ob poplavi. ....	33
Slika 25: Opazovani odtok, simulirani odtok in padavine za obdobje od 1.1.2007 do 14.12.2007. ....	34
Slika 26: Prikaz zgornjega in spodnjega rezervoarja za obdobje od 1.1.2007 do 14.12.2007. ....	35
Slika 27: Grafi občutljivosti parametrov UZL, K0, K1, K2, PERC in MAXBAS glede na Reff. ....	36
Slika 28: Grafi občutljivosti parametrov FC, LP in BETA za tri vegetacijske cone glede na Reff. ....	38
Slika 29: Grafi občutljivosti parametrov TT in CFMAX za tri vegetacijske cone glede na Reff. ....	38
Slika 30: Grafi občutljivosti parametrov SFCF, CFR in CWH za tri vegetacijske cone glede na Reff. ....	39
Slika 31: Grafa občutljivosti parametrov PCALT in TCALT glede na Reff. ....	39
Slika 32: Rezultat analize občutljivosti modela na parametre v obliki povprečne spremembe vrednosti kriterijske funkcije v odstotkih.....	40

Slika 33: Graf analize občutljivosti s spreminjanjem dveh parametrov hkrati (PERC in K2). .....	41
Slika 34: Graf analize občutljivosti s spreminjanjem dveh parametrov hkrati (K1 in UZL). .....	42
Slika 35: Graf analize občutljivosti s spreminjanjem dveh parametrov hkrati (K0 in UZL). .....	43
Slika 36: Graf analize občutljivosti s spreminjanjem dveh parametrov hkrati (K1 in K2). .....	43
Slika 37: Graf analize občutljivosti s spreminjanjem dveh parametrov hkrati (FC in BETA). .....	44
Slika 38: Graf analize občutljivosti s spreminjanjem dveh parametrov hkrati (LP in BETA). .....	45
Slika 39: Graf analize občutljivosti s spreminjanjem dveh parametrov hkrati (FC in LP). .....	46
Slika 40: Graf analize občutljivosti s spreminjanjem dveh parametrov hkrati (TT in CFMAX). .....	46
Slika 41: : Grafi občutljivosti parametrov UZL, K0, K1, K2, PERC in MAXBAS glede na Reff za obdobje od 18.9.2007 do 22.9.2007. ....	47
Slika 42: Grafi občutljivosti parametrov FC, LP in BETA drugega vegetacijskega razreda glede na Reff za obdobje od 18.9.2007 do 22.9.2007. ....	47
Slika 43: Grafa parametrov K0 in K1 glede na VolumeError. ....	48
Slika 44: Vpliv spremembe parametra K1 na hidrogram. ....	48
Slika 45: Prikaz vpliva spremembe K0 (z inkrementom 0.05 od leve proti desni) na maksimalni pretok ob poplavi. ....	49
Slika 46: Grafa parametrov K2 in MAXBAS glede na VolumeError. ....	50
Slika 47: Prikaz zamika hidrograma s spremembo parametra MAXBAS. ....	50
Slika 48: Grafa parametrov UZL in PERC glede na VolumeError. ....	51
Slika 49: Vpliv parametra UZL na hidrogram. ....	51
Slika 50: Grafi parametrov FC, LP in BETA za drugi vegetacijski razred glede na VolumeError. ....	51

## **OKRAJŠAVE IN SIMBOLI**

ARSO – Agencija Republike Slovenije za okolje

DYNIA - Dynamic Identifiability Analysis

ECAD – European Climate Assessment and Dataset

GAP - Genetic Algorithm and Powell optimization

HBV - Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning model

PEST – Model-Independent Parameter Estimation and Uncertainty Analysis

Reff – Nash-Sutcliffe efficiency measure

SMHI – Swedish Meteorological and Hydrological Institute

WASMOD – Water and substance simulation model

» Ta stran je namenoma prazna. «

## **SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK**

**Ekvifinalnost** je princip, ki pravi, da lahko v odprtih sistemih določeno končno stanje dosežemo po več poteh.

**Evapotranspiracija** je prehajanje vodne pare z površine zemlje in skozi listne reže rastlin v ozračje.

» Ta stran je namenoma prazna. «

## 1 UVOD

Hidrološki modeli so pomembno orodje za načrtovanje in upravljanje vodnih virov in za ocenjevanje vpliva podnebnih učinkov ter sprememb rabe zemljišč na hidrološki krog in režim odtoka. Konceptualni hidrološki modeli se pogosto uporabljajo za simulacijo površinskih in podpovršinskih procesov hidrološkega kroga, saj lahko zajamejo prevladujočo dinamiko prispevnega območja in hkrati ostanejo varčni in računsko učinkoviti, ker zahtevajo vhodne podatke, ki so običajno na voljo in preprosti za uporabo.

Ker parametrov v konceptualnih hidroloških modelih ni mogoče določiti neposredno iz fizikalnih lastnosti povodja, so ocenjeni preko umerjanja modela. Vendar pri uporabi umerjanja parametrov modela lahko različni seti parametrov enako dobro simulirajo opazovano obnašanje sistema, kar imenujemo z izrazom »ekvifinalnost« (Beven in Freer, 2001). Nato se umerjen model testira na poljubnem samostojnem naboru podatkov, da se zagotovi uporabnost modela za obdobja, ki niso bila uporabljena pri umerjanju modela.

Zaradi precej velikega števila prostih parametrov v modelu površinskega odtoka in ob upoštevanju vseskozi prisotne ekvifinalnosti, je eno samo merilo učinkovitosti šibek kriterij za ocenjevanje in razglasitev (ali zavrnitev) uspešnosti modela (Beven, 2001). Kljub temu ostaja najpogostejši način obravnavanja uspešnosti modela.

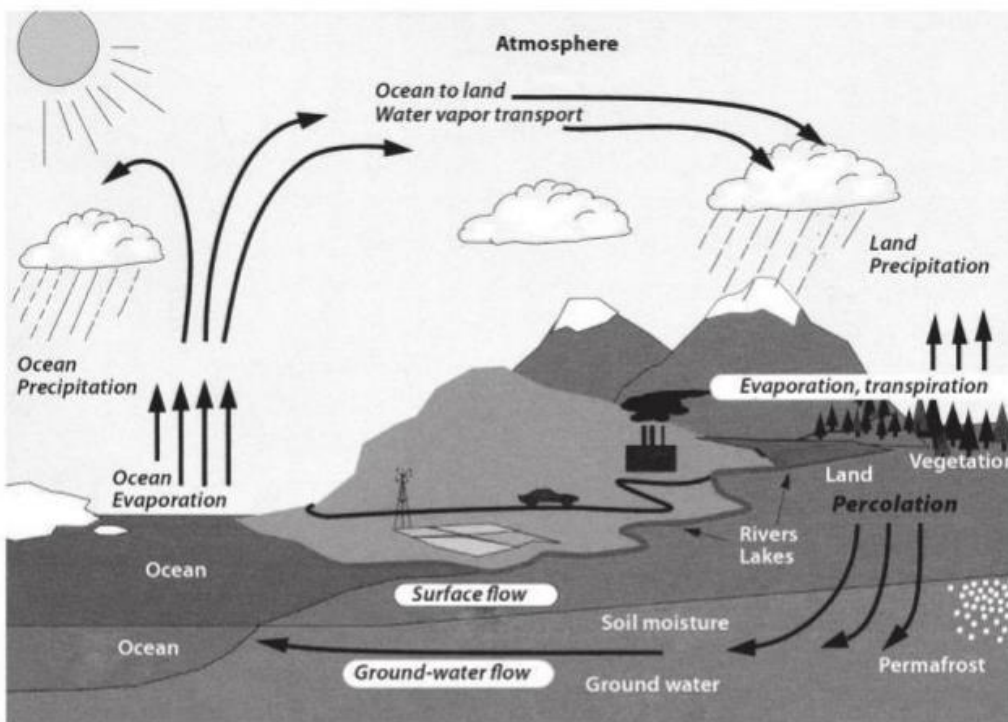
Bistveno je, da hidrolog s pomočjo analize občutljivosti identificira glavne parametre, ki nadzorujejo vedenje modela, in s tem pripomore tudi k boljšemu razumevanju strukture modela in glavnih virov negotovosti modela.

Z analizo občutljivosti parametrov preučujemo vpliv sprememb vhodnih parametrov na rezultate modela. V tem delu bomo preiskali prispevke občutljivosti parametrov konceptualnega HBV-light modela pri simuliranju hidroloških procesov na porečju Bolske.

## 1.1 Hidrološki krog

Hidrološki krog opisuje neprekinjeno gibanje in spremembe stanja vode v atmosferi in na zemlji. Sam pojav in dinamika kroženja vode v naravi sta bila znana že v starem veku. Zaradi pomanjkljive merilne opreme se še danes srečujemo z vrsto neznanck pri določanju količin vode in pretoka vode v posameznih delih hidrološkega kroga. (Brilly, M., Šraj, M., 2005)

Ta krog obsega procese prikazane na sliki 1: Evapotranspiracija (vodni hlapi gredo v ozračje), kondenzacija (tvorba oblakov), padavine (v različnih oblikah, kot je dež, sneg, soda, toča), odtok (pretok deževnice po zemeljski površini v površinska vodna telesa) in pronicanje (infiltracija vode v zemljo, ki oblikuje ali napaja podzemna vodna telesa). Gibanje vode iz Zemljinega površja v ozračje povzroča sončno sevanje, medtem ko je gibanje vode na ali pod površino zemlje predvsem posledica gravitacije. Glavni učinek hidrološkega kroga je v tem, da ohranja toplotno bilanco zemlje preko premikanja in prerazporejanja vodnih mas.



Slika 1: Grafična reprezentacija globalnega hidrološkega kroga (Trenberth in sod., 2007)

Hidrologija je veda, ki preučuje ta vodni krog in z njim povezane površinske in podpovršinske procese. Zaradi velike raznolikosti procesov vključenih v ta cikel in zaradi različnega časovnega in prostorskega obsega njihovega pojavljanja in interakcij z drugimi okoljskimi komponentami je preučevanje tega področja temu primerno obsežno in zahtevno. Človeško življenje je močno odvisno od vodnih virov (zlasti sladkovodnih), ki so potrebni za osebne in gospodinske namene, za rekreacijo, za podporo kmetijstvu in ribištvu, za proizvodnjo vodne energije, za industrijo in razne ostale namene. Po drugi



strani pa lahko voda predstavlja tudi nevarnost, kot je to na primer v slučaju poplav. Ta močna odvisnost človeka od vode napotuje in preko praktičnih primerov zahteva razvoj hidrološke znanosti; terja vedno natančnejše razumevanje specifičnih hidroloških procesov. To je bistvenega pomena za učinkovito načrtovanje, razvoj in upravljanje vodnih virov, kakor tudi za preprečitev njihove nevarnosti. Hidrološki modeli, ki so predstavljeni v tem delu, so predvsem orodja razvita za hidrološke napovedi in za pridobitev večjega vpogleda v fizične procese.

## **1.2 Površinski odtok**

Površinski odtok je del hidrološkega kroga, ki ima velik pomen za okolje in gospodarstvo, zaradi urejanja in izkoriščanja vodnega režima (Brilly in Šraj, 2005). Površinski odtok predstavlja del padavin, ki se ne zadrži na rastlinah, niti ne izhlapi ali ponikne v zemljo, temveč površinsko odteče. Površinski odtok se začne, ko so tla nasičena z vodo in je tako ponikanje vode v tla onemogočeno. Gravitacija nato vodi vodo proti nižje ležečim vodnim telesom.

Na površinski odtok vplivajo še številni ostali dejavniki, kot so geografske in fizikalne lastnosti povodja, raba tal, predhodna namočenost, poseljenost, itd. (Primožič, 2007). Vegetacijski pokrov lahko v celoti prestreže intenzivne in kratkotrajne ali manj intenzivne in dolgotrajne padavine ali pa le te poniknejo in torej nimajo takojšnjega vpliva na pretok. Ob pojavu intenzivnejših padavin začne površinski odtok hitro naraščati, doseže maksimum in postopoma upade. Ob suši padavin zaznamo v strugi le bazni odtok, ki je posledica podzemnih voda. Tako na prepustnejših površinah lahko celotne padavine poniknejo in s časom povečajo bazni odtok. Na manj prepustnih območjih pa padavine površinsko odtečejo (Kotar, 2013).

Diagram sprememb pretoka po času imenujemo hidrogram. Tipične komponente hidrograma so prikazane na sliki 2. Maksimum hidrograma je odvisen od trajanja in intenzitete padavin, nagiba, oblike padavin in ostalih lastnosti prispevne površine (Primožič, 2007).



**Slika 2: Komponente tipičnega hidrograma (Pugelj, 2012)**

Analiza pojava površinskega odtoka je kompleksne narave. Gibanje površinskih in podpovršinskih voda se namreč hitro spreminja tako po prostoru kot v času in vsak pojav poplavnega vala je enkratni dogodek. Prav tako lahko del vode, ki se po nastopu padavin zadrži pod površino, zaznamo šele pri nastopu naslednjega poplavnega vala (Kotar, 2013).

Odvisnost padavin in površinskega odtoka ponazorimo z odtočnim koeficientom, ki je definiran z razmerjem med padlo in odteklo vodo oziroma z razmerjem med efektivnimi padavinami in bruto padavinami. Vrednost odtočnega koeficienta je odvisna od intenzivnosti padavin, trajanja padavin, vlage zemljišča, lastnosti povodja itd. Določimo ga s podatki iz meritev, literature ali empiričnih enačb (Primožič, 2007).

### 1.3 Modeliranje površinskega odtoka

Model je poenostavljen prikaz realnega sistema. Najboljši model je tisti, ki daje resničnim podobne rezultate in uporablja čim manjše število parametrov in čim manjšo kompleksnost modela. Modeli se v glavnem uporabljajo za napovedovanje obnašanja sistema in razumevanje različnih hidroloških procesov. Model sestoji iz različnih parametrov, ki opredeljujejo značilnosti modela. Model površinskega odtoka lahko na primer opredelimo kot niz enačb, ki v odvisnosti od različnih parametrov,

ki se uporabljajo za opisovanje značilnosti povodja, pripomorejo k oceni odtoka. Hidrološki modeli se danes štejejo kot pomembno in potrebno orodje za upravljanje z vodnimi in okoljskimi viri.

Klasifikacije modelov v splošnem temeljijo na naslednjih merilih: 1) obsegu fizikalnih principov uporabljenih v strukturi modela; 2) obdelavi vhodnih podatkov in parametrov modela, kot funkcije časa in prostora. Po prvem kriteriju (tj. fizikalnem opisu procesa), lahko modelu pripišemo dve kategoriji: deterministično in stohastično. Deterministično, ko so rezultati enolično določeni na podlagi znanih odnosov med stanji in podatki. Takšni modeli proizvedejo en sam rezultat iz simulacije z enim samim sklopom vhodnih podatkov in vrednosti parametrov, in določen vhodni podatek bo vedno proizvedel enak izhodni podatek, če so vrednosti parametrov konstantne.

Stohastični modeli pa uporabljajo naključne spremenljivke, za zastopanje procesne negotovosti in ustvarjajo različne rezultate iz enega sklopa vhodnih podatkov in vrednosti parametrov izvajanimi pod enakimi pogoji (Beven, 2001). Poseben sklop vhodnih podatkov bo ustvaril izhodne podatke v skladu s statistično porazdelitvijo. To omogoča več naključnosti ali negotovosti pri morebitnem izidu, zaradi negotovosti pri vhodnih spremenljivkah, robnih pogojih ali parametrih modela.

Deterministični modeli se lahko razvrstijo glede na to ali je obravnavano prispevno območje povprečeno ali distribuirano (tj. drugo merilo) in ali je opis hidroloških procesov empiričen, konceptualen ali bolj fizikalno zasnovan (Refsgaard, 1996). Na tej podlagi so deterministični modeli razvrščeni kot: 1) Empirični oz. podatkovno usmerjeni modeli (Črna skrinjica), 2) konceptualni modeli (Siva skrinjica) in 3) fizikalno zasnovani modeli (Bela skrinjica).

Povprečeni modeli obravnavajo področje interesa (npr. porečje) kot eno enoto, s spremenljivkami stanja, ki predstavljajo povprečja čez prispevno območje (Beven, 2001). Na splošno je povprečni model izražen z diferencialnimi ali empiričnimi algebraičnimi enačbami, pri čemer se ne upošteva prostorske variabilnosti procesov, vhodnih podatkov, robnih pogojev in geometrijskih značilnosti (Singh, 1995).

Distribuirani modeli razdelijo področje interesa v številne elemente (ali mrežne kvadrate) in rešujejo enačbe spremenljivk stanj povezanih z vsakim elementom. Distribuirani modeli lahko zato do neke mere upoštevajo prostorsko variabilnost v procesih, vhodne podatke, robne pogoje in karakteristike območja. Vendar pa vsi distribuirani modeli uporabljajo povprečne spremenljivke in parametre znotraj elementa, in pogosto so parametri povprečeni po mnogih kvadratih mreže, predvsem zaradi dostopnosti podatkov (Beven, 2001).

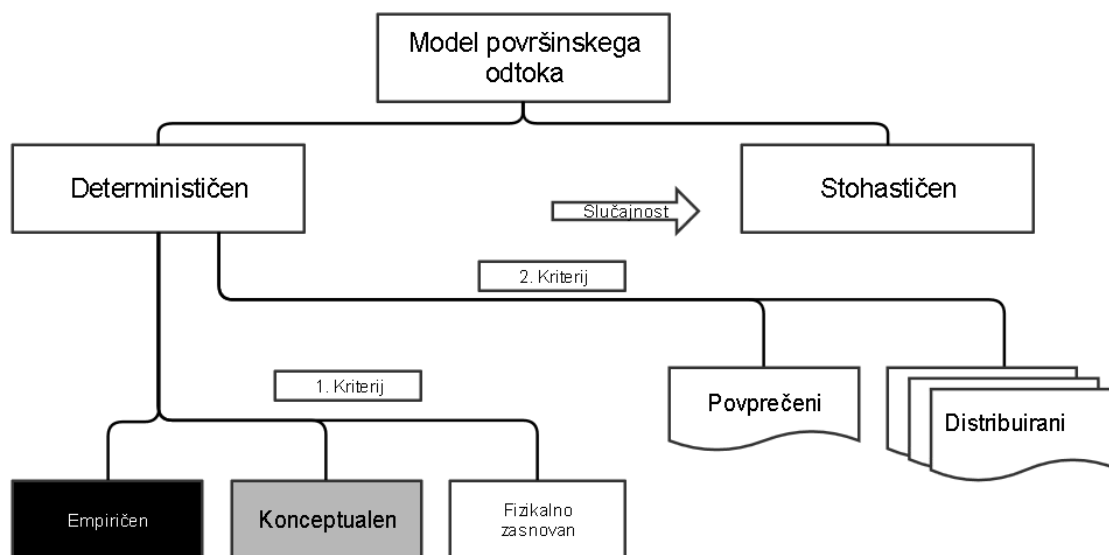
Delno distribuirani modeli so bili predlagani, da bi združili prednosti obeh vrst prostorske reprezentacije. Ta vrsta modela se ne pretvarja, da predstavlja prostorsko kontinuirano distribucijo spremenljivk stanja; ampak razdeli območje do stopnje, ki se modelarju zdi koristna. Delno distribuirani model lahko torej

predstavlja pomembne značilnosti območja, medtem ko hkrati zahteva manj podatkov in nižje računske stroške od distribuiranih modelov.

Konceptualni modeli so nekje vmes med fizikalno zasnovanimi in empiričnimi modeli. Konceptualni model je tisti matematični model, ki ga izpeljemo iz osnovnih fizikalnih zakonov in vsebuje kakšen empiričen člen. Primer je preprosta enačba za pretok ali pa bolj kompleksna Navier-Stokesova dinamična enačba. Dobra lastnost konceptualnih modelov je, da veljajo v celotnem območju pojava ter jih je mogoče prilagajati željeni stopnji natančnosti. To lahko storimo z zanemarjanjem določenih členov enačb, ki so za obravnavan problem manj pomembni. Z uporabo konceptualnih modelov se lahko tudi veliko naučimo o pojavu, ki ga modeliramo.

Takšen tip modela lahko tudi precej niha v kompleksnosti, na primer, če smo v model vnesli preveč parametrov, ki jih težko merimo oziroma umerimo. Kompleksnost modela pa je mogoče zmanjšati za ustrezno stopnjo z analizami občutljivosti, z zadržanjem neobčutljivih parametrov kot konstant ali z rekonstrukcijo modela.

Veliko modelov spada v ta razred, na primer konceptualni deterministični delno distribuirani HBV model (Bergström, 1995; Lindström in sod., 1997) in WASMOD model.



Slika 3: Klasifikacija modelov za primer površinskega odtoka (prirejeno po Refsgaard, 1996).

Da pa bi model natančno in dosledno simuliral opazovane odzive oziroma dinamično obnašanje povodja v nekem zgodovinskem obdobju, za katerega so vhodni podatki (npr. padavine) in izhodi sistema (npr. pretok) na voljo, morajo biti parametri umerjeni (kalibrirani).

Za določitev skladnosti med simulacijami systemskega obnašanja modela in opazovanji, je bilo razvitih in implementiranih veliko različnih tehnik umerjanja modela. Odločiti se moramo na podlagi katerega kriterija bomo ocenjevali, kateri set parametrov je boljši od drugega in nato poiskati optimalni set parametrov in ga uporabiti v modelu. Optimalne sete lahko pridobimo z ročnim umerjanjem, avtomatiziranim umerjanjem ali na podlagi kombinacije obeh načinov.

Ročno umerjanje je proces, ki je predvsem odvisen od modelarjevega »ročnega« nastavljanja vrednosti parametrov modela dokler se izhodi modela ne ujemajo z opazovanimi podatki. Prilagoditev parametrskih vrednosti opravi modelar s poskus-napaka procesi; poznavanje vzorčne strukture in študijskega območja prihrani čas in trud. Ker je običajno težko določiti najboljši približek ali določiti jasno točko, ki označuje konec procesa umerjanja, so pogosti tudi različni rezultati pridobljeni od različnih modelarjev. Zamudnost je še en problem te vrste umerjanja. Celoten postopek bi lahko zagotovil omejene oz. nobene informacije iz prejšnjih prilagoditev parametrov in formalna analiza negotovosti je »težka do nemogoča« (Singh, 1995).

Razvoj računalniško podprtih metod za avtomatsko umerjanje hidroloških modelov je delno motiviran s potrebo po pospešitvi (v smislu računalniške učinkovitosti) procesa umerjanja. Drugi cilj je bil razviti objektivno strategijo za ocenjevanje parametrov, ki zagotavlja konsistentno delovanje z izločitvijo subjektivne presoje ljudi, ki je deležna v »ročnem« pristopu. Avtomatski proces lahko zagotovi več objektivnosti in zmanjša potrebo po ekspertizi o modelu. Vendar pa zaradi težav pri sestavljanju kriterijskih funkcij in optimizacijskih algoritmov, ki posnemajo človeško sodbo, avtomatski načini umerjanja še niso dozoreli do te mere, da bi lahko v celoti nadomestili ročne metode umerjanja; zato je avtomatsko umerjanje pogosto najuspešnejše, ko se uporablja v povezavi z ročnimi postopki.

Tipični postopek avtomatskega ocenjevanja parametra sestoji iz štirih glavnih elementov: izbrane kriterijske funkcije (ali meritve uspešnosti), optimizacijskega algoritma, prekinitvenih kriterijev in podatkov umerjanja. Namen avtomatskega umerjanja je najti tiste vrednosti parametrov modela, ki optimizirajo (zmanjšajo ali povečajo, kakor je primerno) numerično vrednost kriterijskih funkcij.

Po umerjanju opravimo validacijo, da se preveri, če bo model dobro deloval za podatke, ki niso bili uporabljeni pri umerjanju. Namen preverjanja modela je potrditi robustnost modela in zmožnost opisovanja hidrološkega odziva povodja in nadalje odkriti morebitne pristranskosti pri umerjenih parametrih. Uspešnost modela je običajno boljša med umerjalnim kot med preverjalnim obdobjem; pojav imenovan divergenca modela (Singh, 1995). Ko je stopnja divergence nesprejemljiva, mora

modelar pregledati strukturo modela in umerjalni postopek za morebitnimi ustreznimi in neustreznimi predpostavkami in nato primerno popraviti.

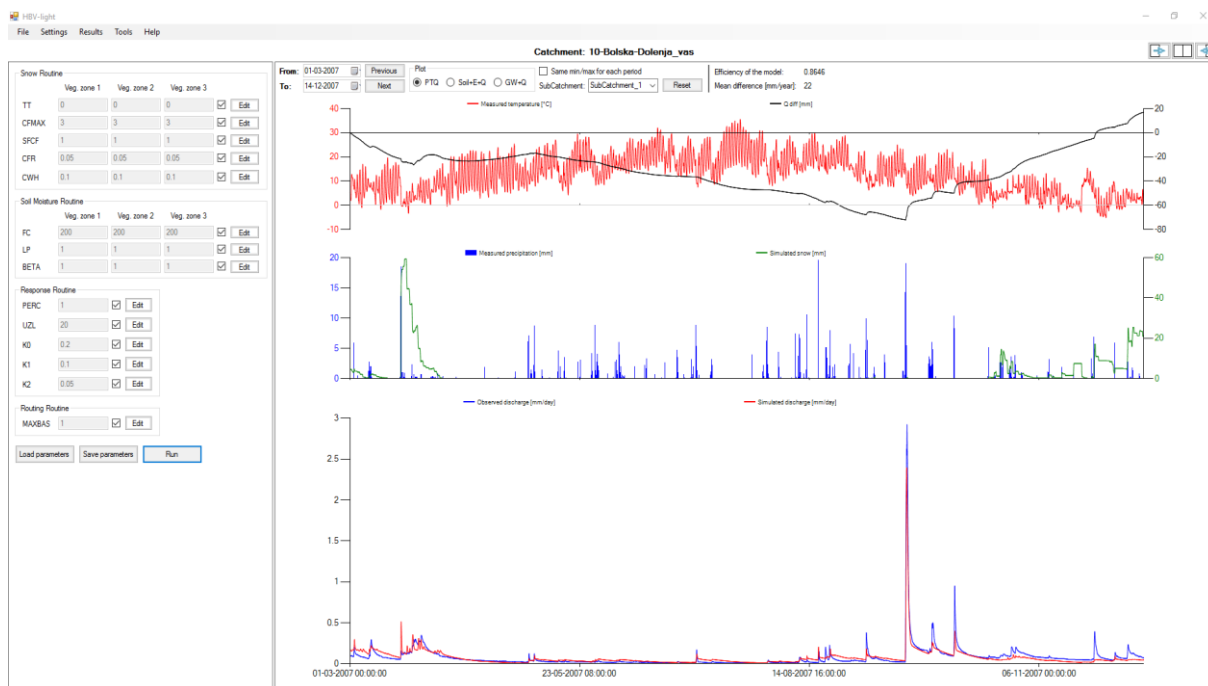
Po umerjanju in validaciji lahko model še ovrednotimo. K ovrednotenje modela žene želja po zmanjšanju možnosti napačne odločitve o potencialno škodljivem okoljskem izidu. Za te postopke je bistvena potreba po karakteriziranju, kvantificiranju in propagiranju negotovosti, ki priznava, da sta obe tako kvalitativna kot kvantitativna komponenta prisotni. Želja po razumljivosti je prinesla široko paleto metod in programskih orodij za ovrednotenje modelov. Ena izmed njih je analiza občutljivosti.

Analiza občutljivosti skuša opredelite ključne parametre, ki vplivajo na delovanje modela in igrajo pomembno vlogo pri parametrizaciji modela, umerjanju, optimizaciji in kvantifikaciji negotovosti. Preučuje kako močno vplivajo spremembe vhodnih podatkov modela na izhodne podatke modela in pripomore k identifikaciji kritičnih območij kjer je pomanjkanje znanja ali podatkov. Takšne informacije naj bi s postopno izpopolnitvijo modela ali z dodatnimi opazovanji sistema raziskave normativno vodile k zmanjšanju negotovosti izhodov modela.

## 2 HBV-LIGHT MODEL

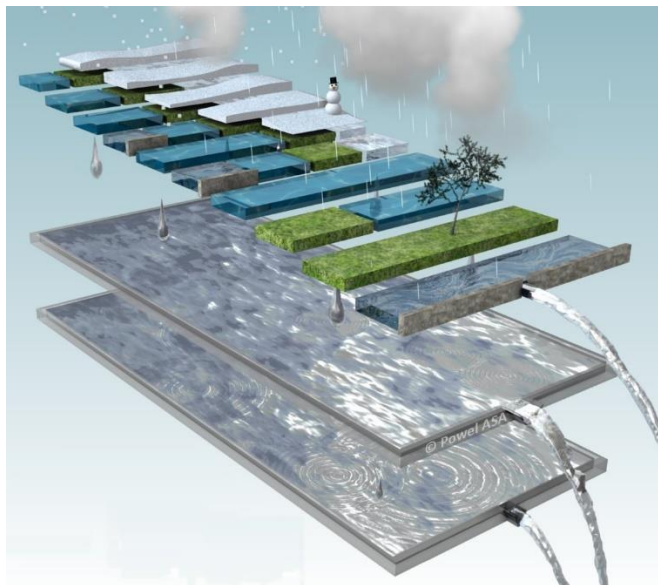
HBV model je bil razvit na Švedskem meteorološkem in hidrološkem inštitutu (SMHI) v Norrköpingu, ime pa je dobil po oddelku za vodno bilanco oddelka za hidrologijo (Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning). Po uspešnem zagonu leta 1972 je čez čas postal standardno orodje za simulacijo odtoka na Švedskem (Bergström, 1990; 1992). Uporabljen je, včasih v modificiranih različicah, v več kot 40 državah (Seibert, 2005).

Ideja nove različice HBV modela, HBV-light, je zagotoviti enostavno za uporabo, »Windows« različico, ki je primerna tako za raziskovanje kakor tudi za izobraževanje. Osnovne enačbe so v skladu z različico HBV-6 (Bergström, 1992) z manjšimi spremembami. V tej verziji namesto uporabe začetnih vrednosti spremenljivk uporabimo »ogrevalno obdobje«, v katerem se standardne začetne vrednosti razvijejo do ustreznih vrednosti glede na pogoje in vrednosti parametrov. V prvotni različici so za uravnavanje parametra MAXBAS dovoljena le cela števila. Ta omejitev je v novi različici odstranjena. Uporabimo lahko tudi popravek vrednosti dolgoročne srednje vrednosti potencialne evapotranspiracije, ki sta ga predlagala Lindström in Bergström (1992). HBV-light različica ponuja tudi dve možnosti, ki ne obstajata v HBV-6 različici. Prva je ta, da se vključijo v analizo opazovani nivoji podzemne vode, druga možnost pa je uporaba generiranja odtoka s parametrom zamika (Seibert, 2005). Grafični vmesnik modela HBV-light je prikazan na sliki 4.



Slika 4: Grafični vmesnik HBV-light.

## 2.1 Kratek opis HBV modela



**Slika 5: Prikaz delne porazdelitve povodja (Van der Velde, 2009).**

HBV model je delno porazdeljen konceptualen model (slika 2). Model simulira dnevni pretok z uporabo vhodnih podatkov padavin, temperatur in potencialne evapotranspiracije. Padavine se simulirajo na podlagi temperature. Padavine nad temperaturnim pragom  $TT$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] se smatrajo za dež in padavine pod tem pragom za sneg. Vse padavine, ki padejo pod temperaturni prag  $TT$  in so simulirane za sneg pomnožimo s korekcijskim faktorjem za sneg  $SFCF$  [-]. Taljenje snega izračunamo s faktorjem  $CFMAX$  [ $\text{mm}/\Delta t/^{\circ}\text{C}$ ] (Seibert, 2005):

$$Melt(t) = CFMAX (T(t) - TT).$$

Staljeni sneg in dež se zadržuje v snežni odeji dokler določeni delež (faktor  $CWH$  [-]) vodnega ekvivalenta snežne odeje ni presežen (Kotar, 2013). Tekoča voda v snežni odeji ponovno zamrzne, ko temperature pade pod prag  $TT$ :

$$ReFreez(t) = CFR (TT - T(t)).$$

Kjer  $CFR$  [-] predstavlja faktor zmrzovanja.

Vsota staljenega snega in dežnih padavin ( $P$ ) predstavlja skupni vnos vode v tla. Del vnosa se infiltrira v zemljo, ostalo pa prispeva k površinskemu odtoku (efektivne padavine ( $P_{eff}$ )). Veličina odtoka se v modelu izračuna na razmerju med trenutno vlago v tleh ( $SM$  [ $\text{mm}$ ]) in poljsko kapaciteto ( $FC$  [ $\text{mm}$ ]) (Kotar, 2013):



$$\frac{P_{eff}(t)}{P(t)} = \left(\frac{SM(t)}{FC}\right)^{BETA}$$

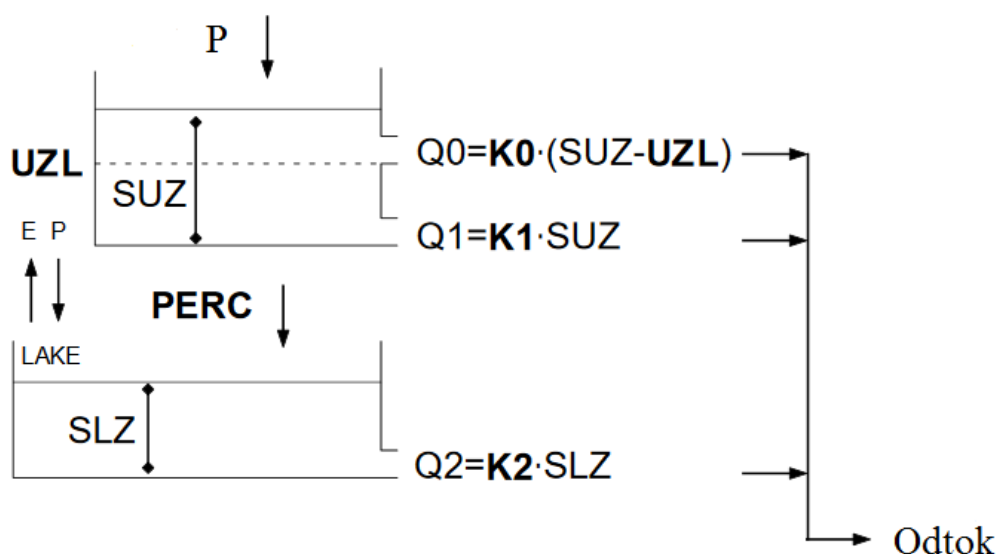
Pri razmerju SM/FC večjemu od LP [-] (faktor redukcije ET<sub>pot</sub>) je dejanska evapotranspiracija iz tal enaka potencialni evapotranspiraciji, če je razmerje SM/FC manjše od LP pa uporabimo linearno redukcijo potencialne evapotranspiracije (Seibert, 2005):

$$ET_{dej} = ET_{pot} \min\left(\frac{SM}{FC LP}, 1\right)$$

Iz zgornjega postopka se učinkovite padavine dodajo k zalogi zgornjega rezervoarja, iz katerega nato voda pronica v spodnji rezervoar (katerega iztok predstavlja bazni odtok) s konstantno vrednostjo parametra PERC [mm d<sup>-1</sup>]. Kadar imamo visoko vsebnost vlage v tleh samo pronicanje ne zagotovi celotnega praznjenja zgornjega rezervoarja, zato se pojavi tudi iztok iz zgornjega rezervoarja. Zaloga vode v zgornjem rezervoarju je označena s SUZ [mm], zaloga vode v spodnjem pa s SLZ [mm]. Skupni odtok se izračuna kot vsota pretokov iz dveh ali treh rezervoarjev, odvisno od tega ali je SUZ nad ali pod pragom UZL [mm] (Kotar, 2013):

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

Kjer je K<sub>0</sub> recesijski koeficient za zgornji del zgornjega rezervoarja, K<sub>1</sub> za spodnji del zgornjega rezervoarja in K<sub>2</sub> za spodnji rezervoar.



Slika 6: Generiranje odtoka (prirejeno po Seibert, 2005).

Da na koncu pridobimo simuliran odtok [mm d<sup>-1</sup>], ga preoblikujemo s funkcijo trikotne porazdelitve uteži, ki jo definira parameter MAXBAS (Seibert, 2005):

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

Kjer je  $c(i)$ :

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

Pri uporabi različnih elevacijskih con s parametroma PCALT [%/100 m] in TCALT [°C/100 m] izračunamo spremembe padavin in temperatur z višino (Seibert, 2005):

$$P(h) = P_0 \left( 1 + \frac{PCALT(h - h_0)}{10000} \right),$$

$$T(h) = T_0 \left( 1 + \frac{TCALT(h - h_0)}{100} \right).$$

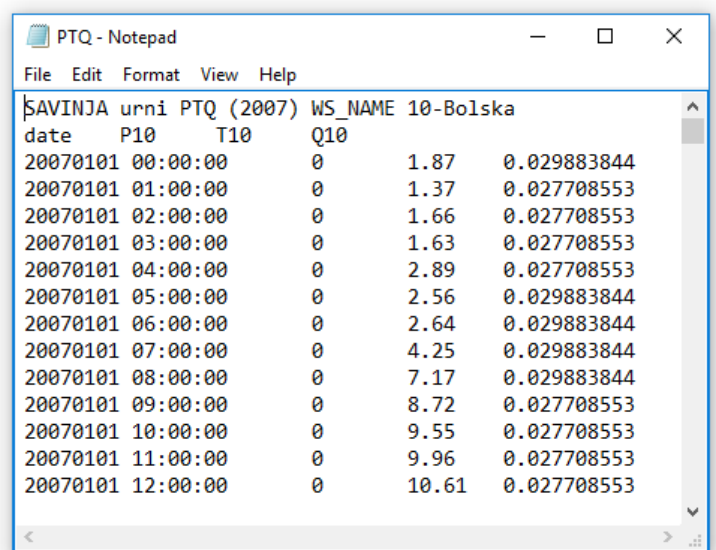
## 2.2 HBV-light programska oprema

Najnovejšo verzijo HBV-light sta razvila Seibert in Vis (2012) na univerzi v Zurichu. Reprogramila sta prejšnjo različico napisano v programskem jeziku VB6 v programski jezik VB.NET. Tako smo dobili izboljššan grafični uporabniški vmesnik. V tej verziji je tudi mogoče izvajati simulacije z različnimi časovnimi koraki za večje število podpovodij.

### 2.2.1 Vhodni podatki

Za zagon modela je potrebno pripraviti vhodne podatke v primerni obliki. Potrebujemo PTQ.txt datoteko, EVAP.txt datoteko in SubCatchment.txt datoteko, če obravnavamo več podpovodij. Po želji lahko dodamo še T\_mean.txt datoteko, PTCALT.txt datoteko in GlacierProfile.txt (v primeru enega podpovodja) ali GlacierProfile\_SubCatchment\_i.txt (v primeru večjega števila podpovodij z indeksom podpovodja i).

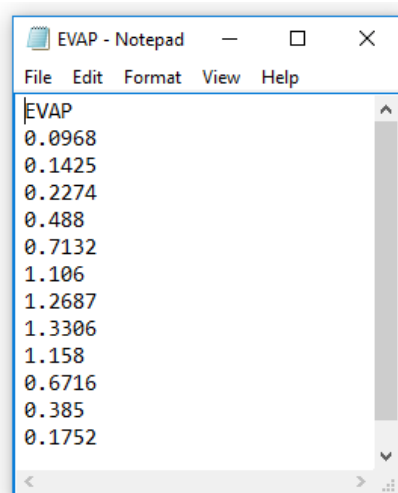
PTQ datoteka vsebuje časovne serije padavin [mm/ $\Delta t$ ], temperatur [°C] in pretokov [mm/ $\Delta t$ ]. Časovne serije so navadno izražene v dnevih, lahko pa so izražene tudi v drugačnem časovnem intervalu vendar morajo intervali ostati konstantni skozi celotno časovno serijo.



date	P10	T10	Q10
20070101 00:00:00	0	1.87	0.029883844
20070101 01:00:00	0	1.37	0.027708553
20070101 02:00:00	0	1.66	0.027708553
20070101 03:00:00	0	1.63	0.027708553
20070101 04:00:00	0	2.89	0.027708553
20070101 05:00:00	0	2.56	0.029883844
20070101 06:00:00	0	2.64	0.029883844
20070101 07:00:00	0	4.25	0.029883844
20070101 08:00:00	0	7.17	0.029883844
20070101 09:00:00	0	8.72	0.027708553
20070101 10:00:00	0	9.55	0.027708553
20070101 11:00:00	0	9.96	0.027708553
20070101 12:00:00	0	10.61	0.027708553

**Slika 7: Prikaz PTQ datoteke.**

EVAP datoteka vsebuje vrednosti potencialne evapotranspiracije [mm/ $\Delta t$ ]. Lahko imamo en set vrednosti, ki pokriva celotno povodje ali pa set vrednosti za vsako podpovodje. Običajno zadostujejo mesečne vrednosti; dnevne vrednosti so nato linearno interpolirane.



EVAP
0.0968
0.1425
0.2274
0.488
0.7132
1.106
1.2687
1.3306
1.158
0.6716
0.385
0.1752

**Slika 8: Prikaz EVAP datoteke.**

Izbirna SubCatchment datoteka opisuje prostorsko relacijo med različnimi podpovodji. T\_mean datoteko z mesečnimi ali dnevnimi povprečnimi vrednostmi temperatur uporabimo, če želimo popraviti povprečne vrednosti potencialne evapotranspiracije za določen dan v letu. GlacierProfile datoteko

uporabimo za prikaz prostorske porazdelitve ledenika in PTCALT datoteko uporabimo, če želimo namesto konstantnih vrednosti za TCALT in PCALT podati časovno serijo gradienta temperatur in/ali padavin.

## 2.2.2 Izhodni podatki

Izhodne podatke dobimo v različnih oblikah; vizualne podatke, preko uporabniškega grafičnega vmesnika in numerične podatke v različnih izhodnih datotekah (Results.txt, Multi.txt, GA\_bestn.txt, itd.).

Izhodni podatki so v glavnem simulirani pretoki, dejanska in potencialna evapotranspiracija, simulirana snežna odeja, vlaga v tleh, količina vode v zgornjem in spodnjem rezervoarju in rezultati kriterijskih funkcij učinkovitosti modela.

Date	Qsim	Qobs	Precipitation	Temperature	AET	PET	Snow	Snowcover	SM	Recharge	STZ	SUZ	SLZ	QSTZ	QSUZ	QSLZ		
20070301 00:00:00	0.179	0.103	0.0	5.2	0.00	0.00	4.5	0.01	167.3	0.0	0.0	0.4	40.2	0.000	0.018	0.161	0.079	0.100
20070301 01:00:00	0.176	0.099	0.0	4.9	0.01	0.01	4.5	0.01	167.3	0.0	0.0	0.3	40.1	0.000	0.016	0.160	0.079	0.097
20070301 02:00:00	0.174	0.099	0.0	4.3	0.03	0.04	4.5	0.01	167.3	0.0	0.0	0.3	40.0	0.000	0.014	0.160	0.078	0.095
20070301 03:00:00	0.171	0.095	0.0	3.4	0.06	0.07	4.5	0.01	167.2	0.0	0.0	0.2	39.8	0.000	0.012	0.159	0.078	0.093
20070301 04:00:00	0.169	0.095	0.0	2.9	0.09	0.11	4.5	0.01	167.1	0.0	0.0	0.2	39.7	0.000	0.010	0.159	0.077	0.091
20070301 05:00:00	0.166	0.095	0.0	2.2	0.13	0.16	4.5	0.01	167.0	0.0	0.0	0.1	39.6	0.000	0.008	0.158	0.077	0.089
20070301 06:00:00	0.164	0.095	0.0	2.1	0.16	0.21	4.5	0.01	166.8	0.0	0.0	0.1	39.5	0.000	0.006	0.158	0.076	0.088
20070301 07:00:00	0.162	0.095	0.0	1.9	0.20	0.25	4.5	0.01	166.6	0.0	0.0	0.1	39.3	0.000	0.005	0.157	0.076	0.086
20070301 08:00:00	0.160	0.095	0.0	2.8	0.23	0.29	4.5	0.01	166.4	0.0	0.0	0.0	39.2	0.000	0.003	0.157	0.076	0.085
20070301 09:00:00	0.159	0.095	0.0	4.4	0.26	0.33	4.5	0.01	166.1	0.0	0.0	0.0	39.1	0.000	0.002	0.156	0.075	0.083
20070301 10:00:00	0.157	0.095	0.0	7.9	0.28	0.35	4.5	0.01	165.9	0.0	0.0	0.0	38.9	0.000	0.001	0.156	0.075	0.082
20070301 11:00:00	0.156	0.099	0.0	9.7	0.29	0.36	4.5	0.01	165.6	0.0	0.0	0.0	38.8	0.000	0.001	0.155	0.075	0.082
20070301 12:00:00	0.155	0.099	0.0	11.3	0.29	0.36	4.5	0.01	165.3	0.0	0.0	0.0	38.6	0.000	0.000	0.155	0.074	0.081
20070301 13:00:00	0.154	0.099	0.0	11.6	0.28	0.35	4.4	0.01	165.0	0.1	0.0	0.1	38.5	0.000	0.000	0.154	0.074	0.080
20070301 14:00:00	0.155	0.095	0.0	12.6	0.26	0.33	4.2	0.01	164.8	0.1	0.0	0.2	38.4	0.000	0.001	0.154	0.074	0.081
20070301 15:00:00	0.156	0.095	0.0	12.8	0.23	0.29	4.1	0.01	164.5	0.1	0.0	0.3	38.3	0.000	0.003	0.153	0.074	0.082
20070301 16:00:00	0.159	0.095	0.0	12.4	0.20	0.25	4.0	0.01	164.3	0.1	0.0	0.3	38.1	0.000	0.006	0.153	0.074	0.085
20070301 17:00:00	0.162	0.095	0.0	12.1	0.16	0.21	3.9	0.01	164.2	0.1	0.0	0.4	38.0	0.000	0.010	0.152	0.074	0.088

Slika 9: Prikaz izhodne datoteke Results.txt.

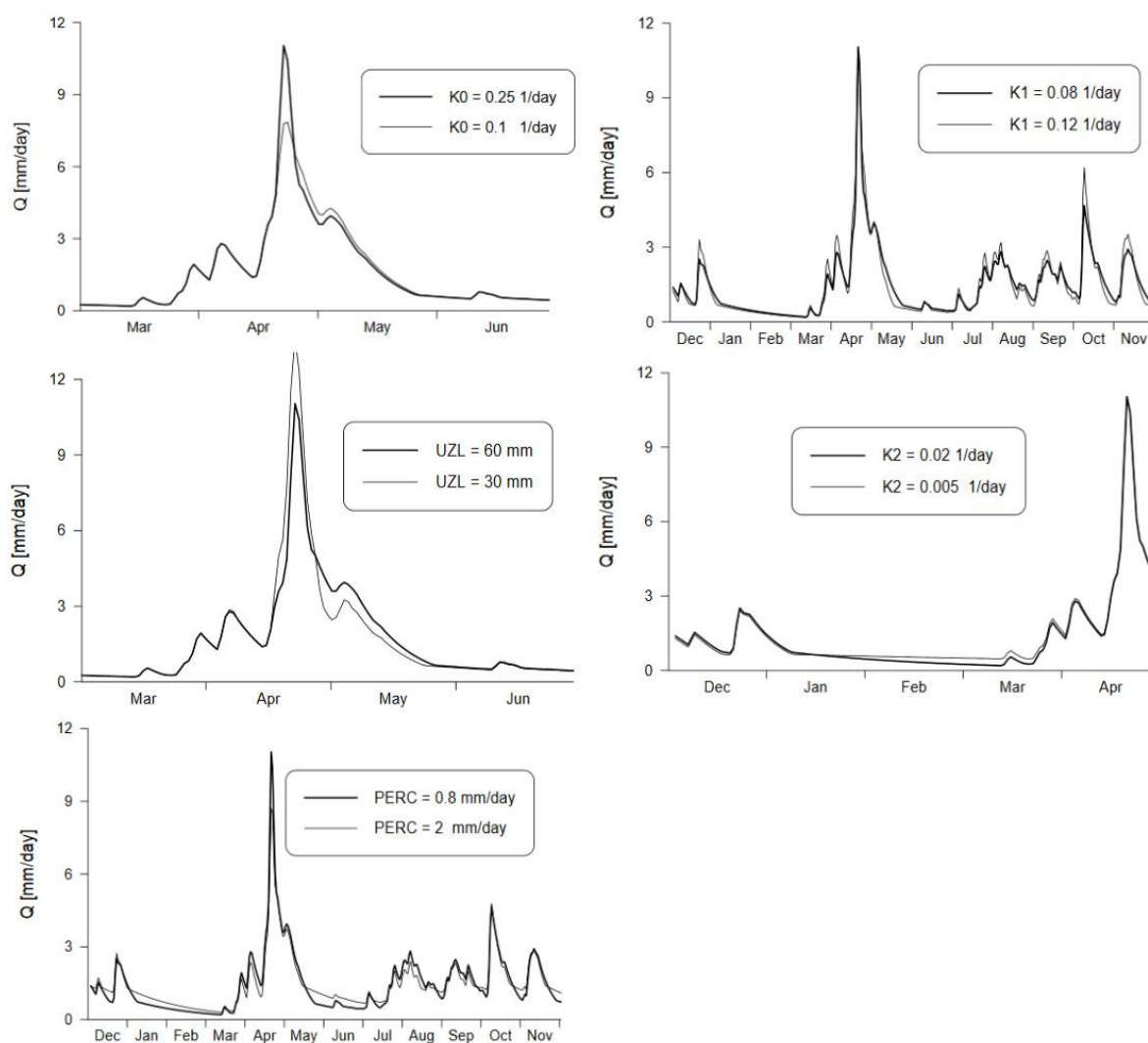
## 2.2.3 Parametri modela

Struktura modela temelji na štirih računih: računu akumulacije in taljenja snega, računu vlage v tleh in evapotranspiracije, računu generiranja odtoka in transformacijski krivulji (Kotar, 2013). Posamezni parametri teh računov z enotami, veljavnimi razponi, privzetimi vrednostmi in opisi so podani v preglednici 1.

Slika 10 na grafičnem vmesniku HBV-light prikazuje vpliv spremembe parametrov računa generiranja odtoka na prikaz simuliranih pretokov. K0 nastopi samo ob velikih pretokih; zato je grafu viden vpliv na maksimalni pretok. K1 predstavlja zgornji hitri odtok in temu primerno vpliva na vršne pretoke. K2, ki predstavlja bazni odtok vpliva na nižje pretoke.

**Preglednica 1: Prikaz parametrov modela.**

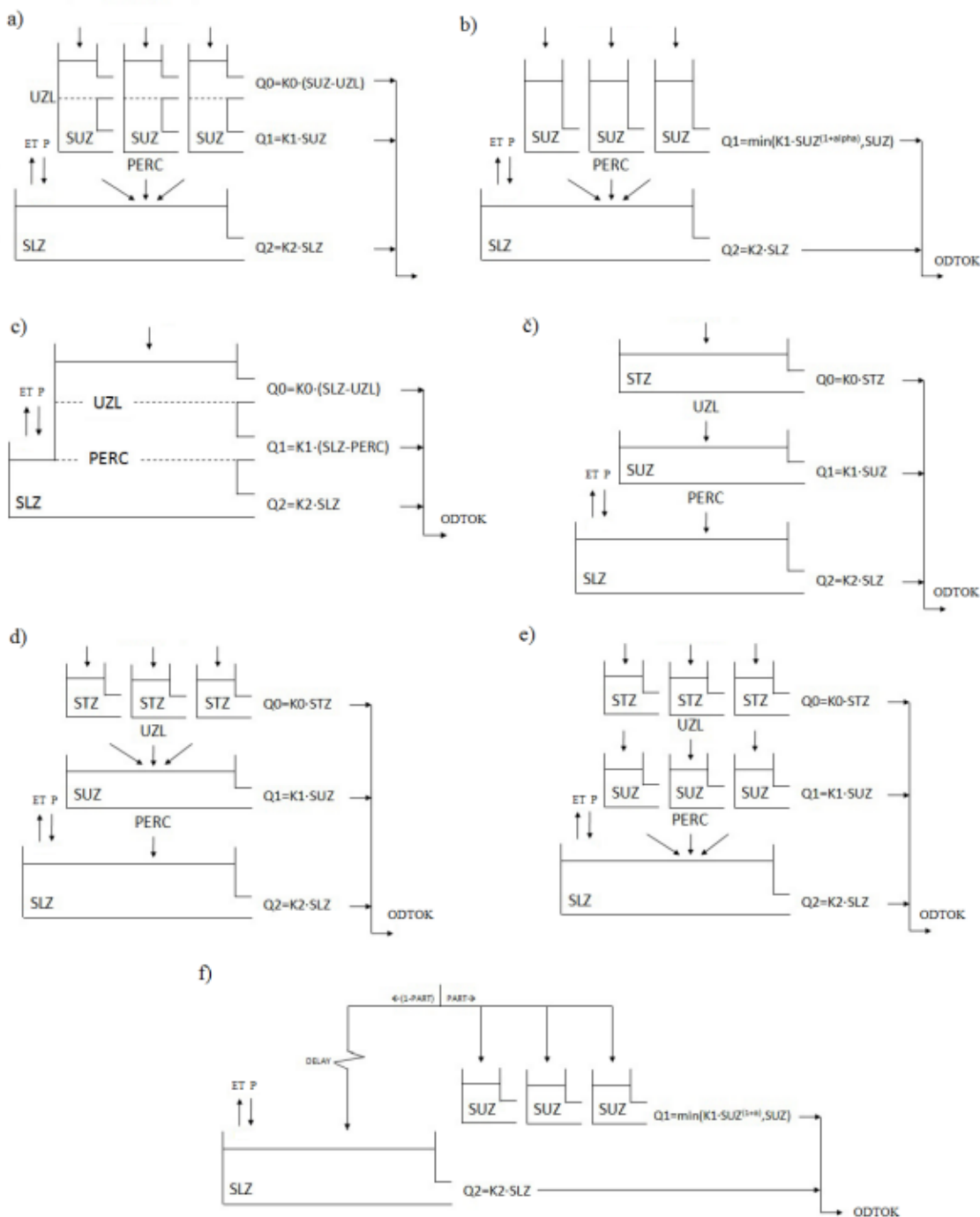
Parameter	Opis	Veljavni razpon	Privzeta vrednost	Enota
<b>Catchment</b>				
Pcalt	Linearni gradient padavin z višino	(-inf,inf)	10	%/100 m
Tcalt	Linearni gradient temperature z višino	(-inf,inf)	0.6	°C/100 m
<b>Račun akumulacije in taljenje snega</b>				
TT	Temperaturni prag	(-inf,inf)	0	°C
CFMAX	Faktor taljenja snega	[0,inf)	3	mm/Δt °C
SFCF	Korekcijski faktor za sneg	[0,inf)	1	-
CWH	Kapaciteta vode v snegu	[0,inf)	0.1	-
CFR	Faktor zmrzovanja	[0,inf)	0.05	-
<b>Račun vlage v tleh</b>				
FC	Največja količina vode v tleh	[0,inf)	200	mm
LP	Faktor redukcije potencialne evapotranspiracije	[0,1)	1	-
BETA	Parameter oblike, ki določa prispevek k odtoku	[0,inf)	1	-
<b>Generiranje odtoka</b>				
K0	Recesijski koeficient za zgornji del zgornjega rezervoarja	[0,1)	0.2	1/Δt
K1	Recesijski koeficient za spodnji del zgornjega rezervoarja	[0,1)	0.1	1/Δt
K2	Recesijski koeficient za spodnji rezervoar	[0,1)	0.05	1/Δt
UZL	Mejna vrednost v zgornjem rezervoarju	[0,inf)	20	mm
PERC	Maksimalno pronicanje v spodnji rezervoar	[0,inf)	1	mm/Δt
<b>Transformacijska funkcija</b>				
MAXBAS	Predstavlja trajanje funkcije uteži	[1,100]	1	Δt



**Slika 10: Primeri vplivov spremembe parametrov generiranja odtoka na simulacijo (Seibert, 2005).**

2.2.4 Tipi modela

Slika 11 prikazuje sedem različnih tipov modela. Naš model bo temeljil na tipu e); distribuiran model s tremi rezervoarji. Ta namesto uporabe dveh iztokov iz zgornjega rezervoarja, kot je to pri standardnem tipu modela, uporablja še tretji rezervoar nameščen nad ostalima dvema. Zgornja rezervoarja sta porazdeljena v posamezne rezervoarje za vsako elevacijsko-vegetacijsko enoto.



Slika 11: Različni tipi modela (Kotar, 2013).

### 2.2.5 Umerjanje modela

Model lahko kalibriramo ročno ali avtomatsko. Ročno umerjanje je predvsem odvisno od modelarjevega »ročnega« nastavljanja vrednosti parametrov modela dokler se izhodi modela ne ujemajo z opazovanimi podatki. Prilagoditev parametrskih vrednosti navadno opravimo s poskus- napaka procesi.

Z avtomatskim umerjanjem proces bistveno pospešimo in izločimo subjektivno presojo ljudi, ki je deležna v »ročnem« pristopu.

Znotraj okolja HBV-light lahko model vrednotimo z različnimi kriterijskimi funkcijami. Največkrat je v uporabi Nash-Sutcliffov kriterij učinkovitosti:

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

Kjer je  $Q_{obs}$  opazovani pretok,  $Q_{sim}$  simulirani pretok ter  $\overline{Q_{obs}}$  povprečni simulirani pretok.

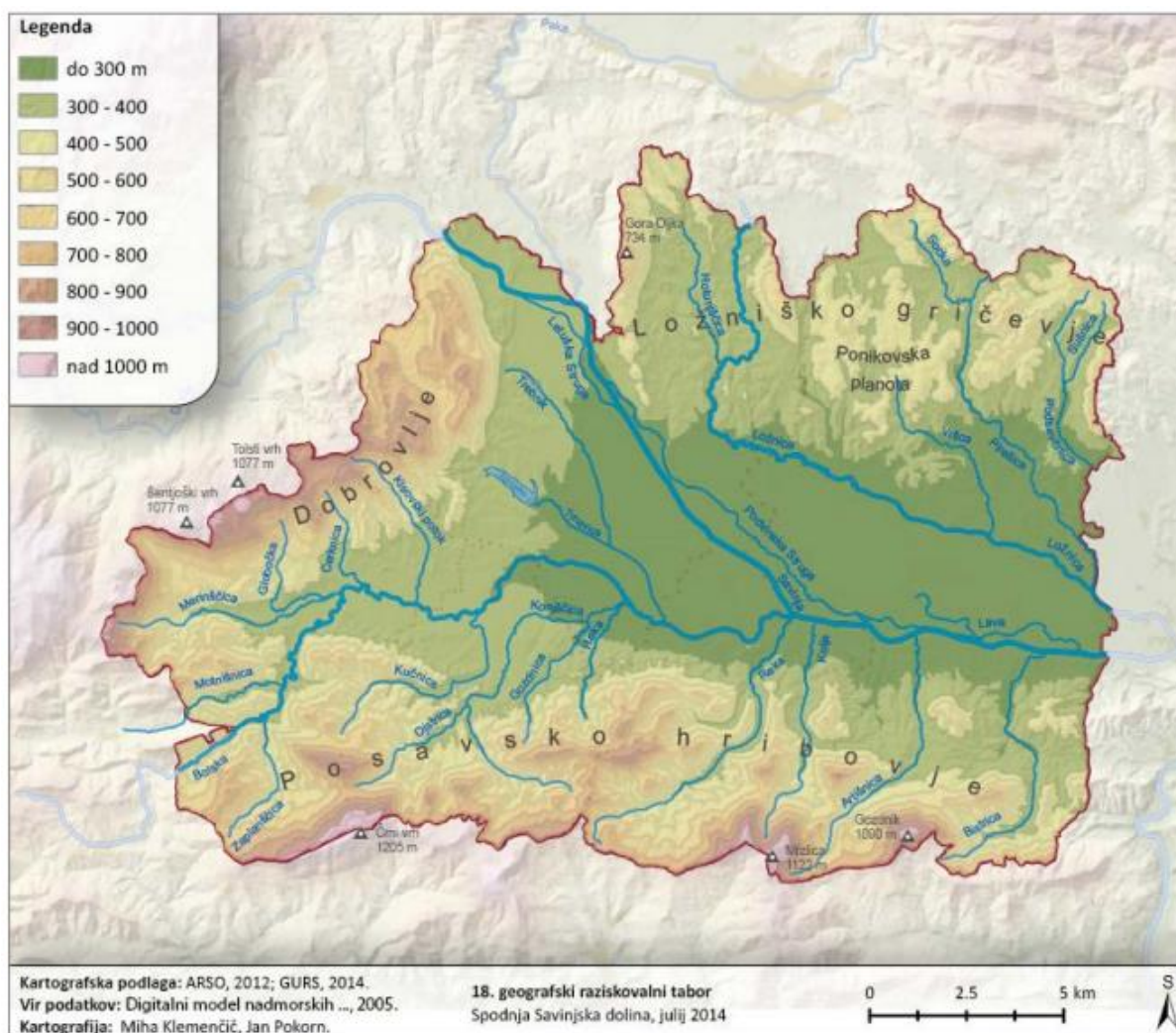
V HBV-light orodju imamo dve možnosti avtomatskega umerjanja, z Monte Carlo simulacijami in GAP (angl. Genetic Algorithm and Powell optimization) algoritmom. Metoda Monte Carlo spada v razred računalniških algoritmov, ki za določanje rezultatov uporablja naključno generirane spremenljivke.

Za izčrpnjši opis modela napotujem bralca k uporabniškemu priročniku HBV-light (Seibert, 2005) in diplomskemu delu Anje Kotar (2013).

### 3 POREČJE BOLSKA

#### 3.1 Opis porečja ter sestava in oblikovanost površja

Bolska je reka v osrednji Sloveniji, desni pritok Savinje. Zavzema približno 190 km<sup>2</sup> v zahodnem in jugozahodnem delu Celjske kotline. Izvira na nadmorski višini 815 m med Lebenico in Šipkom, in sicer na območju grodenskih peščenjakov in werfenskih skrilavcev. Do priliva Motnišnice je dolina Bolske ozka, njena struga pa ima še pravi hudourniški značaj. Pri Ločici se njena dolina nekoliko razširi in od Brodov navzdol jo spremljajo obsežnejše police kvartarnih teras (Natek, 1978).



Slika 12: Reka Bolska s pritoki do izliva v Savinjo, z višinskimi pasovi (Jelen, A. in sod., 2015).

Bolska prejema svoje najštevilnejše in najbolj vodnate pritoke iz sredogorskih višin na jugu porečja, katerih geološka in geotektonska sestava sta zasnovani na posavskih gubah. Zahodni del, od koder se steka hudourniška Motnišnica, sega v libojsko-motniško-kamniško sinklinalno podolje ter v jugovzhodne izrastke predalpskih planot. Tudi s severozahoda, kjer zbira Trnavca s svojimi pritoki površinske in kraške vode, prejema Bolska skozi vse leto pomembne količine vode (Natek, 1978).



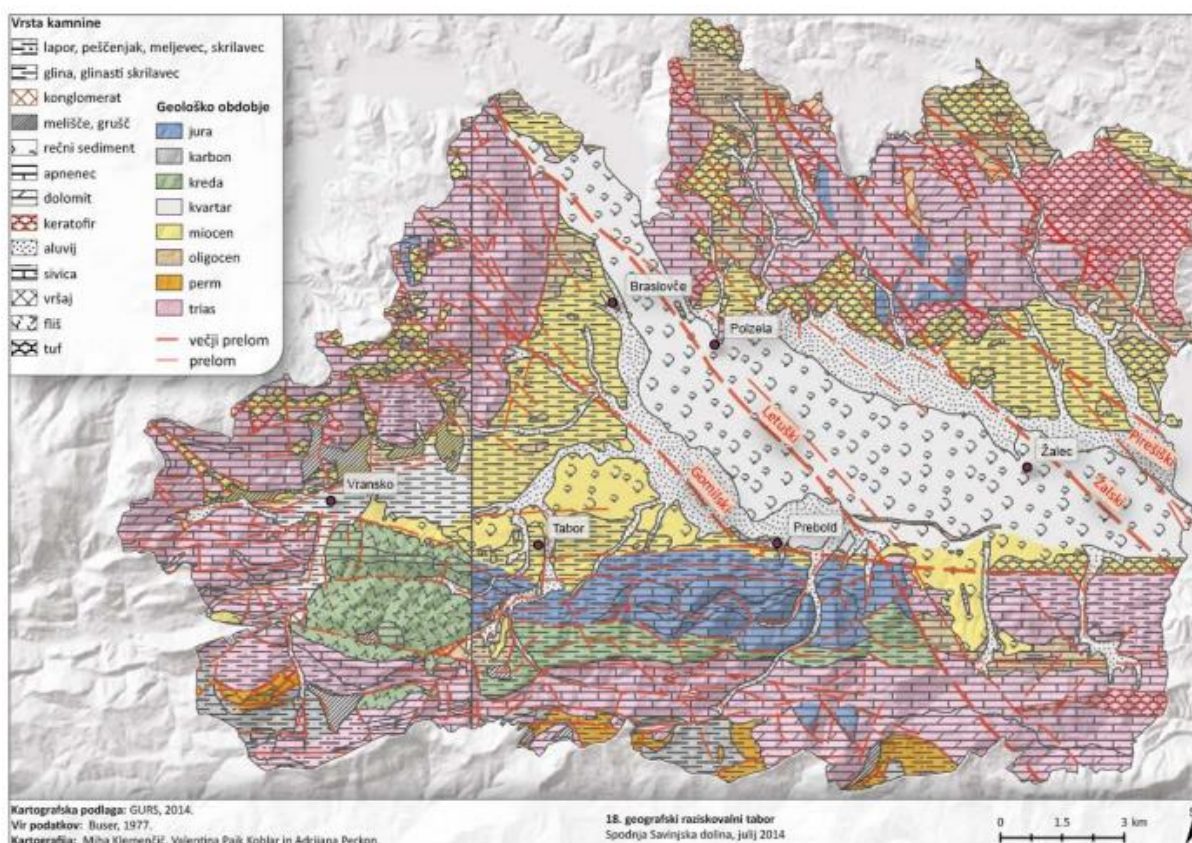
Južno kotlinsko obrobje, ki ga sestavlja zaledje desnih Bolških pritokov, je sestavljeno iz številnih kamnin in ima močno razrezano površje; prepleteno je z ozkimi dolinami, ki so s svojimi površnimi deli zarezane globoko v osrčje trojanske antiklinale. Zato je njena geološka in petrografska sestava na tolikšnih krajih razkrita. Pri vsem tem pa je najpomembnejše to, da imajo vsi ti potoki znatne strmce. S tem se ob naraslih vodah poveča njihova transportna moč. Njihove prodne nanose spremljamo skoraj v celotnem srednjem toku Bolske, kjer si je že izoblikovala svoje poplavno območje (Natek, 1978).

Drugačna, bolj enostavna, po številu kamnin manj pisana je zgradba severnega sredogorskega zaledja doline Bolske. Izoblikovano in zajedeno je v južnih pobočjih pretežno iz triasnih apnencev in dolomitov sestavljenih predalpskih planot Menine in Dobrovelj. Na njenem južnem in nižjem obrobju pridejo na površje vododržni psevdofilski skladi, ki jih sestavljajo glinasti skrilavci in kremenovi peščenjaki. Na meji med njimi in višje ležečimi apnenci so številni izviri Bolških pritokov (Natek, 1978).

V dolini Bolske ugotavljamo dva precej različna tipa reliefa, ki sta pogojena z različno petrografsko sestavo. Ravninski del Bolske je izoblikovan v mehkejših terciarnih kamninah, ki so zapolnile terciarno, to je oligocensko, tektonsko udorino, nastalo med posavskimi gubami na jugu in kraškima planotama Menina in Dobrovlje na severozahodu.

Aluvij se pričinja v dolini Bolske neposredno s prodno akumulacijo, ki prehaja navzgor v ilovnate plasti, sklene pa se s peščeno-ilovnatim nanosom. Na osnovi debeline aluvialne akumulacije v dolini Bolske ter oligocenske osnove ugotavljamo, da se oligocenska podlaga dokaj dobro ujema z današnjim strmcem potoka. Obenem pa nas to opozarja, da je bil aluvij v dolini Bolske odložen na skoraj povsem ravni podlagi (Radinja, 1960).

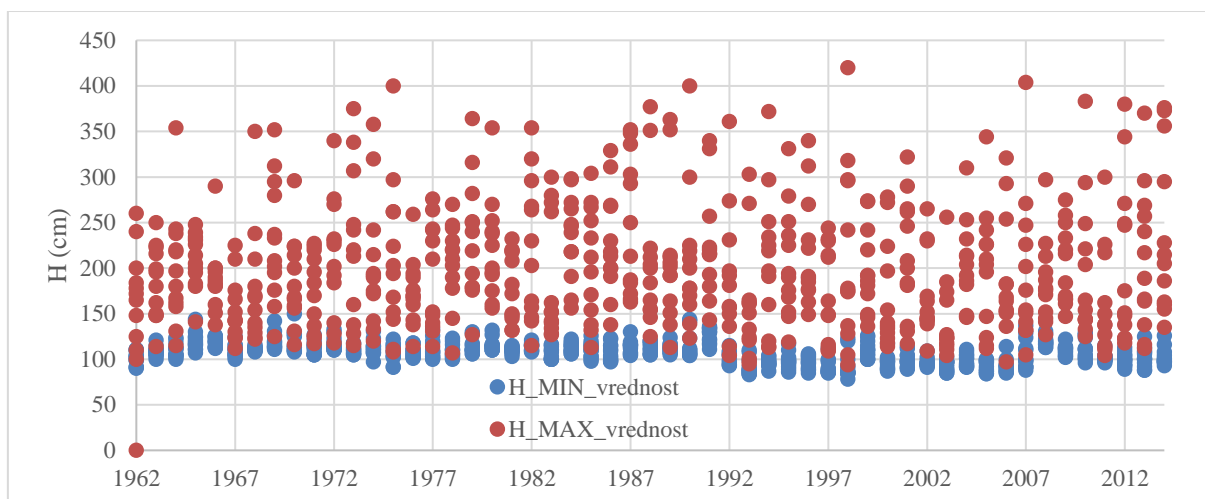
Zgornje plasti aluvialne akumulacije, ki jo sestavljajo sivorjave pedološke ilovice, katerim sledijo ilovnati peski ter rjava marogasta glina, so izredno pomembne za nastanek in obstoj današnjih obsežnih poplavnih območij ob Bolški. Poleg tega prevladuje na teh območjih visok nivo talnice. V opisanem sklopu najdemo osnovni vzrok za obstoj poplavnega sveta (Natek, 1978).



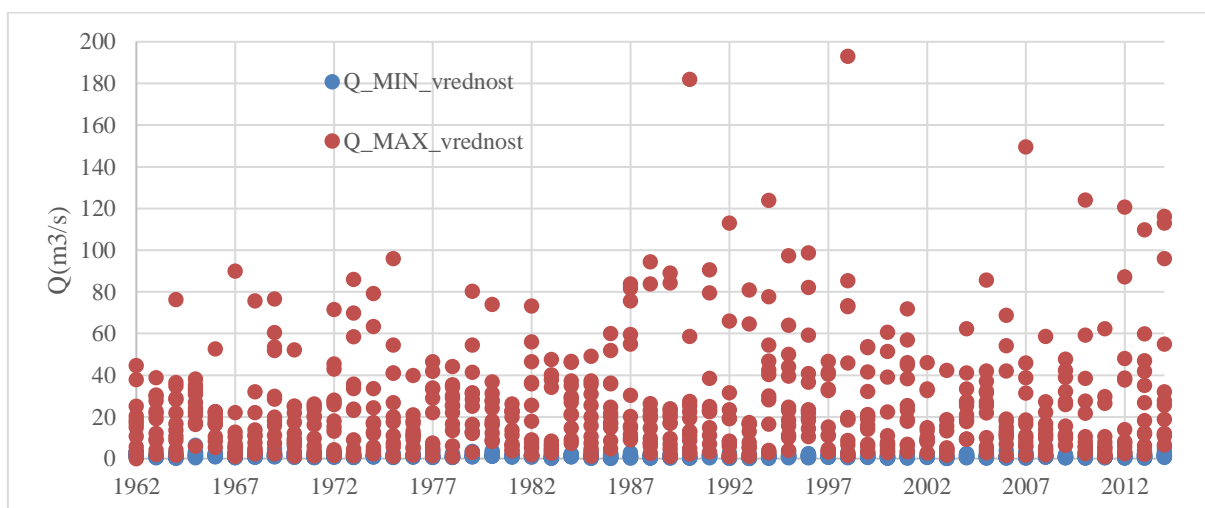
Slika 13: Poenostavljena geološka zgradba Spodnje Savinjske doline in vzpetega sveta (Jelen, A. in sod., 2015).

### 3.2 Hidrogeografske značilnosti in poplave

Pritoki Bolske imajo gosto hidrogeografsko omrežje. Bolska ima alpski dežno-snežni režim, s primarnim viškom marca spomladi in sekundarnim viškom jeseni novembra oziroma decembra. Kakor skoraj vsi večji vodotoki predalpskega hribovja ima izrazit poletni nižek v mesecu avgustu. Zaradi svoje hudourniške narave lahko ob močnih poletnih nalivih oziroma ob jesenskem deževju precej hitro naraste in poplavi okoliške ravnice; ob daljšem sušnem obdobju, zlasti poleti, pa ima malo vode. Na vodomerni postaji Dolenja vas so najmanjši pretok, ki je znašal  $0,104 \text{ m}^3/\text{s}$  izmerili 2.6.1993, največjega pa ob poplavi 5.11.1998 in sicer  $193 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ob poplavnem dogodku 18.9.2007 je največji pretok znašal  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  (Arhiv površinskih voda, 2016). Podatki razkrivajo njen predalpski značaj: majhen specifičen odtok ( $22,5 \text{ l/s/km}^2$ ) in nižji odtočni količnik v primerjavi z alpskimi rekami (48,9 %) (Vodna bilanca Slovenije 1971-2000, 2016).



**Slika 14: Min in max vrednosti vodostaja za obdobje 1962-2014 (postaja Dolenja vas).**

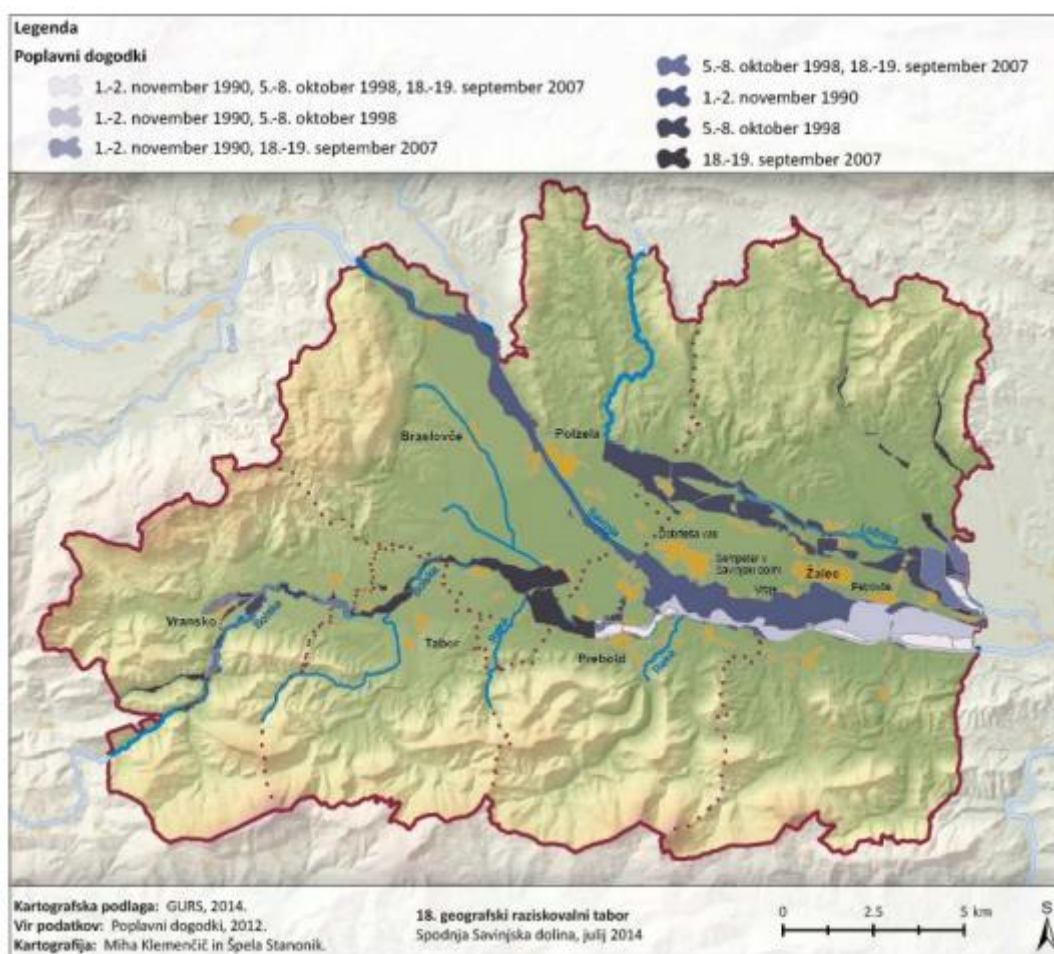


**Slika 15: Min in max vrednosti pretoka za obdobje 1962-2014 (postaja Dolenja vas).**

Reka Bolska že od nekdaj pogosto poplavlja. Lastnost, ki jo je mogoče opaziti v značilnostih poplavne ravnice, ki je sestavljena večinoma iz travnikov; naselja so pri tem nekoliko odmaknjena od reke in leže na robu višje terase. Bolska je izrazito hudourniškega značaja. Pritoki zelo hitro napolnijo strugo glavne reke, ki se zato zlahka razlije po poplavni ravnici; k temu največ prispevata pritoka Motnišnica in Konjščica. Najprej se to dogaja pri sotočju z Motnišnico, na Ločici, ker poplavne vode razmeroma enako velikih vodotokov zajezi ena drugo. Struga Bolske je na Vranskem zaradi močnega nasipanja zelo plitva, zato visoke vode hitro poplavijo poplavne ravnice na levem bregu. Drugo poplavno območje s pričetkom v Čepljah se razprostira vse do Kaple. Najobsežnejše je od Pondorja do glavne ceste v Kapli, ki sicer poteka po nekoliko višjem nasipu, a jo Bolska ob večjih poplavah - kot npr. 18.9.2010 - tudi preplavi. Tretje poplavno območje se prične nad Gomilskim in sega skoraj brez prekinitve do izliva v Savinjo. Značilno široko izlitje je pred sotočjem s Trnavco. Nadalje se od izliva Trnavce poplavna ravnica precej zoži. Na levem bregu se je vanjo povsem do struge razširila Kaplja vas, nižje na desnem

bregu pa je bila nekoliko nepremišljeno zgrajena skupina manjših stanovanjskih blokov v Preboldu, Na zelenici (Bolska, 2016). Poplavna ravnica se pod preboldskim mostom ponovno razširi in se pod zaselkom Lapurje združi s široko poplavno ravnico ob Savinji (Komac, B. in sod. 2008).

V zadnjih desetletjih smo bili priča štirim večjim poplavam na območju Bolske. In sicer: 1.11.1990, 6.11.1998, 18.9.2007 in 19.9.2010. Na sliki 17 so prikazana poplavljená območja. Poseljenost na poplavnih ravninah je trenutno še nizka, zato je bilo ob zgoraj naštetih poplavnih dogodkih pod vodo le manjše število hiš. Večja škoda je bila na sami strugi in na bližnjih kmetijskih površinah. Tragične posledice je imela visoka voda 13.9.2014, kjer je narasla voda v bližini Vranskega vzela dve življenji.



Slika 16: Območja poplavnih dogodkov v Spodnji Savinjski dolini (Jelen, A. in sod., 2015).

### 3.2.1 Poplavni dogodek 18.9.2007

Neurje je najbolj prizadelo povodje Motnišnice vse do izliva v Bolsko pri Ločici. Najbolj poplavljen je bil osrednji del Motnika ob Motnišnici (podobno kot leta 1998). Ob strugi so ostali odloženi kupi mulja, blata in plavja.

V zgornjem delu, do Ločice, Bolska skoraj ni poplavljala. Obširnejše poplave so se pričele šele na polju med Vranskim in Ločico. Poplave so se pojavile v popoldanskih in večernih urah na širšem območju Vranskega, Merinščice in Podgrajščice. Prevodnost struge Merinščice je na določenih delih manjša od Q10, zato so posamezna območja Vranskega pogosto pod vodo. Urbano območje med Podgrajščico in Merinščico se nahaja na poplavnem območju.

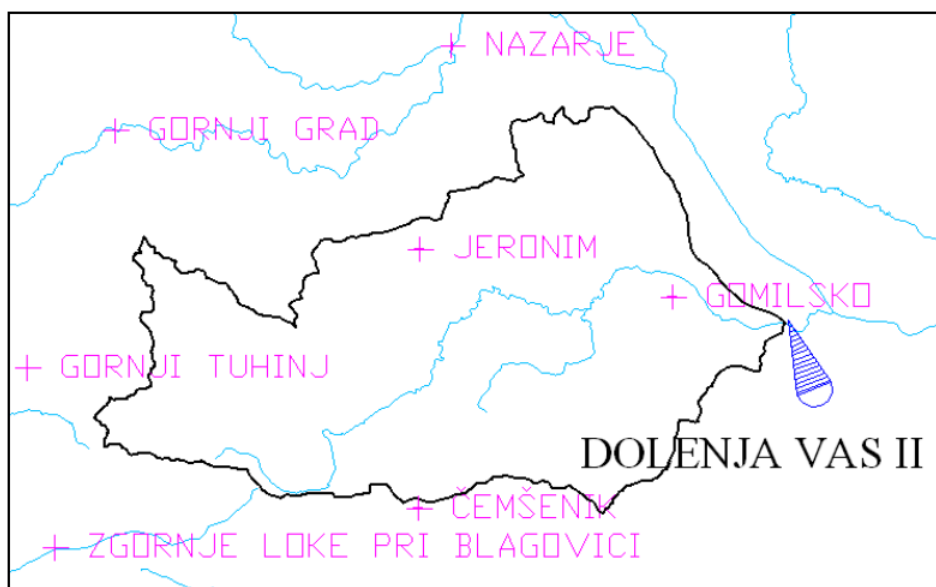
Od Vranskega proti izlivu je Bolska poplavela večji del nižje ležečih površin. Poplavela so tudi območja Gomilskega, Kaplje in Dolenje vasi pri Preboldu (Fazarinc, 2007).



**Slika 17: Poplave na Vranskem (Fazarinc, 2007).**

Vzrok opisanega hidrološkega dogajanja je velika intenziteta padavin. Padavinam je sledilo izredno hitro naraščanje visokovodnih valov. Pretok je poplavno vrednost dosegel v pičlih treh urah.

Na vodomerni postaji Dolenja vas je izmerjen maksimalni pretok  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  (Slika 20), ki ustreza povratni dobi med 50 in 100 let. Padavine na porečju Bolske vse do vodomerne postaje Dolenja vas II so izračunane na podlagi padavinskih postaj: Gomilsko, Jeronim, Čemšenik, Gornji Tuhinj, Zgornje Loke pri Blagovici, Gornji Grad in Nazarje (Slika 19).

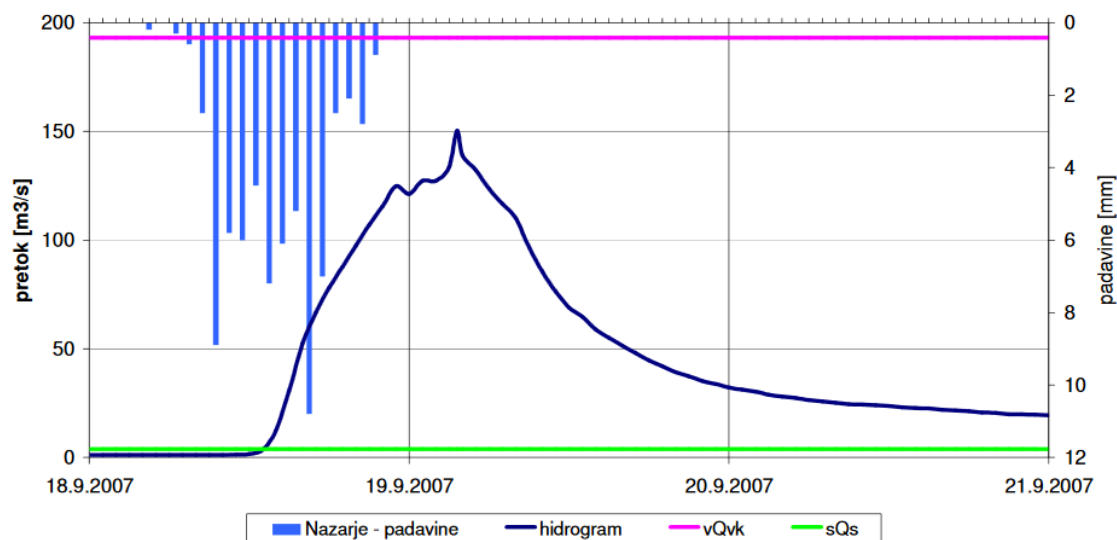


Slika 18: Porečje Bolske s padavinskimi postajami (vijolična) in vodomerno postajo Dolenja vas II (Štrukelj, 2008).

Preglednica 2: Izmerjene vrednosti dnevnih padavin in uteži Thiessenovih poligonov za padavinske postaje porečja Bolske do vodomerne postaje Dolenja vas II (Štrukelj, 2008).

Padavinska postaja	Padavine [mm]	Utež
Gomilsko	173,1	0,3271
Jeronim	93,5	0,2968
Čemšenik	97	0,2439
Gornji Tuhinj	171,3	0,0905
Zgornje Loke pri Blagovici	118,0	0,0151
Gornji Grad	151,2	0,0140
Nazarje	73,2	0,0127

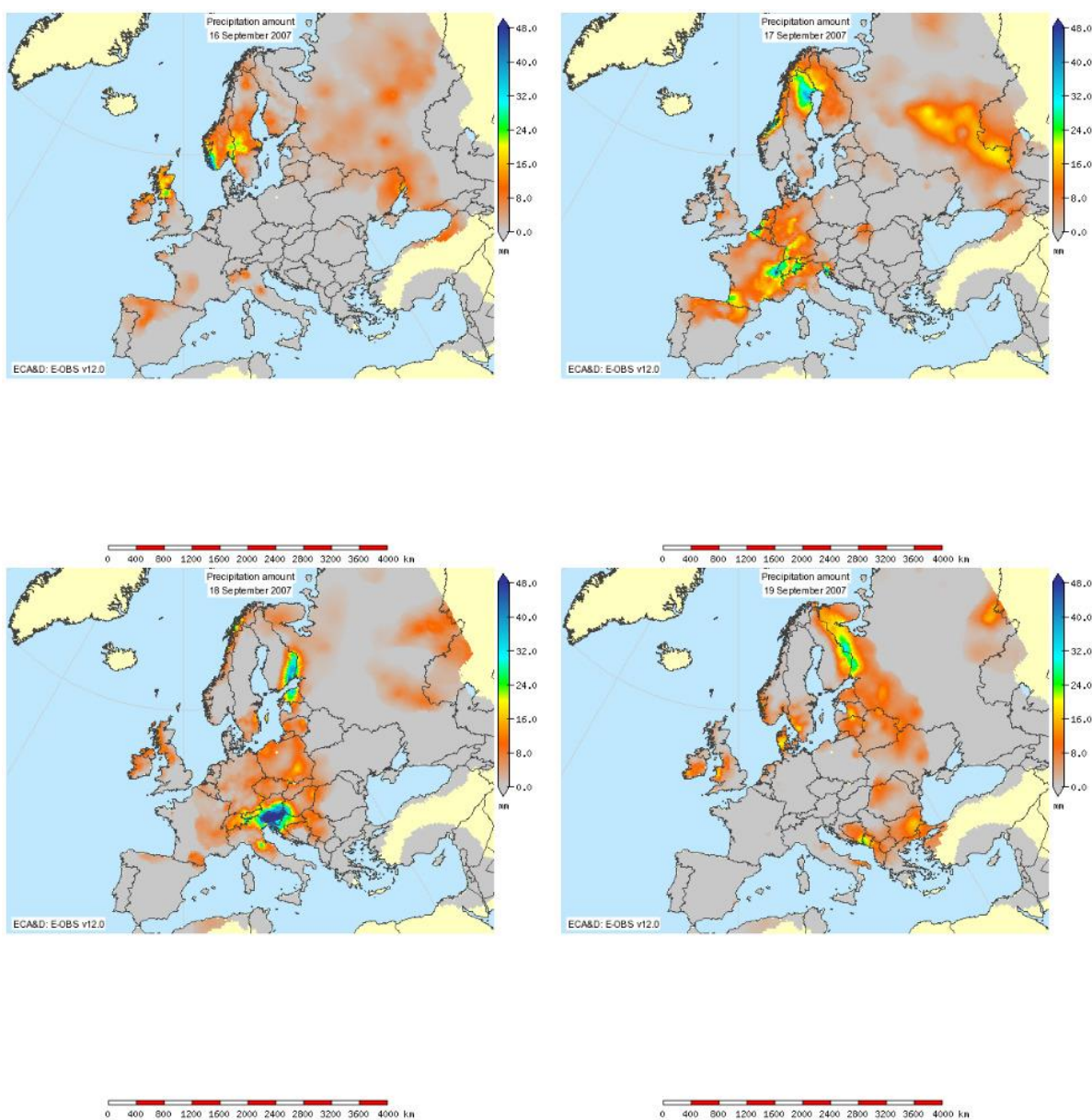
Bolska v. p. Dolenja vas



Slika 19: Hidrogram Bolske (Visoke vode in poplave 18. septembra 2007, 2008.).

Na sliki 21 je podana vremenska slika za obdobje od 16.9.2007 do 19.9.2007 s prikazano količino padavin. Na dan 18.9.2007 modra barva jasno prikazuje večjo količino padavin nad območjem Slovenije.

»Bistveni vzroki za obilne padavine nad Slovenijo so bili: razgibanost terena, stalen dotok vlažnega zraka od jugozahoda, močna nestabilnost ozračja in striženje vetra v plasti do višine 6 km od tal. V takih pogojih nastajajo obsežni konvektivni sistemi in nastajajo močne nevihte, ki lahko dlje časa vztrajajo na istem območju« (Visoke vode in poplave 18. septembra 2007, 2008, str. 1).



Slika 20: Vremenska slika padavin za poplavni dogodek 18.9.2007 (ECAD, 2016).

#### 4 ANALIZA OBČUTLJIVOSTI PARAMETROV

Z analizo občutljivosti imamo navadno v mislih stopnjo do katere vhodni parameter vpliva na izhod modela. Po opravljeni analizi občutljivosti navadno opišemo parametre s pridevniki, kot so občutljiv, pomemben, vpliven, zelo vpliven itd. Crick in sod. (1987) so v svojem delu razlikovali med »pomembnimi« parametri, kot tistimi, katerih negotovost bistveno prispeva k negotovosti rezultatov ocenjevanja modela in »občutljivimi« parametri, kot tistimi, ki imajo znaten vpliv na rezultate ocenjevanja modela. Pomemben parameter je vedno občutljiv, ker variabilnost parametra ne bo vidna v izhodu modela, če le ta ni občutljiv na vhodni parameter. Na drugi strani pa občutljiv parameter ni nujno pomemben, ker je lahko natančno določen, s čimer prispeva malo variabilnosti k izhodu modela.

Rezultati modela so lahko tesno povezani z vhodnimi parametri, tako da majhne spremembe pri vhodnih vrednostih lahko povzročijo velike spremembe v izhodnih vrednostih. Analiza občutljivosti modela je zato pomemben sestavni del razvojnega procesa modela. Pomaga pri ohranjanju enostavnosti modela, saj razkriva parametre modela, ki imajo majhen oziroma neznaten vpliv. Pred izvedbo simulacije modela v neznanu, nam ustrezna analiza občutljivosti lahko pomaga pri ugotavljanju stabilnosti rezultatov v zvezi z negotovostjo naših predpostavk.

Najenostavnejša oblika analize občutljivosti je vizualna primerjava grafov izdelanih na podlagi različnih predpostavk. Te so lahko začetni pogoji, parametri modela ali sistematične prilagoditve vhodnih podatkov. Postopek je preprost in presenetljivo učinkovit za številne primere. Obstajajo tudi bolj teoretične metode za analizo občutljivosti, na primer statistična analiza oblike odzivne površine in Monte Carlo simulacije vrednosti parametrov (npr. Mein in Brown 1978, Gardner in sod. 1980). V tem delu bomo za analizo občutljivosti uporabili orodje Monte Carlo simulacija, vgrajeno v programu HBV-light. Ne glede na uporabljeno metodo, je pomembno, da uporabnik utemeljuje analize na realnih predpostavkah negotovosti v pogojih modela. Analiza občutljivosti je dragoceno orodje za vsakogar, ki želi zgraditi zaupanje v strukturo modela.

Analizo občutljivosti modela in parametrov modela bomo opravili na podlagi Nash-Sutcliffovega kriterija (Reff). Mogoče je seveda analizirati občutljivost tudi na podlagi večjega števila kriterijskih funkcij oziroma kombinaciji le teh, kar bi nas gotovo opremilo z zanimivimi rezultati, a se bomo zdaj, zaradi prileganja kriterija našim ciljem, osredotočili le na zgoraj omenjeno. V štirih korakih bomo na našem primeru izvedli: individualno analizo občutljivosti, analizo občutljivosti modela na parametre, analizo občutljivosti, kjer bomo primerjali po dva parametra hkrati in pa analizo vpliva parametrov na maksimalni pretok ob poplavi.



#### 4.1 Zgradba modela

Podatke za že zgrajeni in umerjeni model HBV-light porečja Bolske smo pridobili na Katedri za splošno hidrotehniko od viš. pred. mag. Andreja Vidmarja. Model je umerjen avtomatsko s programskim orodjem PEST. Pridobili smo vse potrebne vhodne podatke za obdobje od 1.1.2007 do 14.12.2007; PTQ datoteko s podatki padavin, temperature in odtokov (Preglednica 3) ter EVAP datoteko s podatki potencialne evapotranspiracije (Preglednica 4). Pridobili smo tudi optimizirani set parametrov (Preglednica 5).

**Preglednica 3: Izsek iz PTQ datoteke.**

**Preglednica 4: Mesečne povprečne vrednosti iz EVAP.**

PTQ2007 Bolska			
date	P10 [mm/Δt]	T10 [°C]	Q10 [mm/Δt]
20070101 00:00:00	0	1.87	0.030
20070101 01:00:00	0	1.37	0.028
20070101 02:00:00	0	1.66	0.028
20070101 03:00:00	0	1.63	0.028
20070101 04:00:00	0	2.89	0.028
20070101 05:00:00	0	2.56	0.030
20070101 06:00:00	0	2.64	0.030
20070101 07:00:00	0	4.25	0.030
20070101 08:00:00	0	7.17	0.030
...	...	...	...
20070918 19:00:00	10.07	11.23	2.047
20070918 20:00:00	5.06	9.83	2.247
20070918 21:00:00	5.45	9.26	2.426
20070918 22:00:00	4.14	8.66	2.623
20070918 23:00:00	0.65	8.33	2.547
20070919 00:00:00	0	8.62	2.674
20070919 01:00:00	0	8.58	2.674
20070919 02:00:00	0	8.65	2.809
20070919 03:00:00	0	7.56	2.921
20070919 04:00:00	0	6.99	2.781
20070919 05:00:00	0	7.02	2.597
...	...	...	...
20071214 04:00:00	0	1.2	0.071
20071214 05:00:00	0	0.69	0.071
20071214 06:00:00	0	0.36	0.071
20071214 07:00:00	0	0.81	0.071

EVAP [mm/Δt]
0.0968
0.1425
0.2274
0.488
0.7132
1.106
1.2687
1.3306
1.158
0.6716
0.385
0.1752

Uporabljen tip modela je distribuiran model s tremi rezervoarji. Ta namesto uporabe dveh iztokov iz zgornjega rezervoarja, kot je to pri standardnem tipu modela, uporablja še tretji rezervoar nameščen nad ostalima dvema. Zgornja rezervoarja sta porazdeljena v posamezne rezervoarje za vsako elevacijsko-vegetacijsko enoto, kot je prikazano na sliki 11e.

Porečje je razdeljeno na 3 vegetacijske in 10 elevacijskih enot. Na slikah 22 in 23 so prikazane vegetacijske in elevacijske cone. Parametri, ki so v tem delu razdeljeni na tri vegetacijska območja so parametri računa akumulacije in taljenja snega ter parametri računa vlage v tleh in evapotranspiracije. Tri vegetacijska območja za obravnavano porečje so: 1.drugo, 2.gozd in 3.aluvij. Prvo območje pokriva 24% površine, drugo območje pokriva 60% površine in tretje območje pokriva 16% površine. Razponi parametrov (Preglednica 5) so okvirno določeni po vzorcu Seiberta (Seibert, 1997).



**Slika 21: Vegetacijske cone.**

Catchment Elevations and Areas	Mean elevation [m]	Subcatchment 1		
		Veg. zone 1	Veg. zone 2	Veg. zone 3
Elevation zone 1	214	0	0	0
Elevation zone 2	345	0.0754	0.0656	0.1357
Elevation zone 3	472	0.0531	0.1328	0.0153
Elevation zone 4	579	0.0514	0.1699	0.0017
Elevation zone 5	747	0.0336	0.1313	0
Elevation zone 6	896	0.0108	0.0629	0
Elevation zone 7	1047	0.0007	0.0206	0
Elevation zone 8	1198	0.0045	0.01	0
Elevation zone 9	1348	0.009	0.0118	0
Elevation zone 10	1489	0.0026	0.0013	0

Slika 22: Srednje vrednosti elevacijskih con in deleži površin za vsako elevacijsko-vegetacijsko cono.

#### 4.2 Individualna analiza občutljivosti parametrov

Pri individualni analizi občutljivosti bomo analizirali 32 parametrov (Preglednica 5). Razponi parametrov so subjektivno določeni. Za objektivno mero bomo uporabili koeficient učinkovitosti oziroma Nash-Sutcliffov kriterij (Reff). Ta je podan kot:

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

Kjer je  $Q_{obs}$  opazovani pretok,  $Q_{sim}$  simulirani pretok ter  $\overline{Q_{obs}}$  povprečni simulirani pretok. Med različnimi statističnimi parametri za oceno hidroloških modelov je Nash-Sutcliffov kriterij med najpogosteje uporabljenimi.

Nash-Sutcliffov kriterij opisuje odstopanje glede na razmerje kvadrata razlike med opazovanimi in simuliranimi vrednostmi ter kvadrata razlike med opazovanimi in povprečnimi opazovanimi vrednostmi. Vrednost koeficienta lahko variira od minus neskončno do ena, kjer slednja vrednost predstavlja popolno ujemanje med simuliranimi in opazovanimi podatki. Manjše vrednosti Nash-Sutcliffovega kriterija pa kažejo na slabše ujemanje med simuliranimi in opazovanimi podatki. Mogoče je dobiti negativne vrednosti Reff-a, kar kaže, da povprečje opazovanih podatkov zagotavlja boljše ujemanje s podatki, kot pa simulirane vrednosti, z drugimi besedami, uporaba simuliranih vrednosti

modela je slabša kot preprosta uporaba povprečja opazovanih vrednosti. Za vrednosti, ki so negativne ali zelo blizu ničle, se napoved modela šteje za slabo ali nesprejemljivo.

Nash-sutcliffov kriterij smo izbrali, ker je primernejši za špice pretokov, na primer Reff,log pa je primernejši za nizke pretoke (Ouyang in sod., 2014). Ker nas v tem delu torej bolj zanima zanesljivost modela ob lokalno ekstremnih dogodkih, kot je obravnavana poplava 2007, smo model vrednotili s kriterijsko funkcijo Reff.

**Preglednica 5: Parametri HBV modela, njihov razpon in optimizirane vrednosti.**

Parameter	Opis	Spodnja meja	Zgornja meja	Enota	Optimizirana vrednost
<b>Catchment</b>					
Pcalt	Linearni gradient padavin z višino	10	20	%/100 m	19.980
Tcalt	Linearni gradient temperature z višino	0	1.5	°C/100 m	0.650
<b>Račun akumulacije in taljenje snega</b>					
TTgzd	Temperaturni prag 1.veg cone	-2.5	2.5	°C	2.000
TTgrm	Temperaturni prag 2.veg cone	-2.5	2.5	°C	2.000
TTtrv	Temperaturni prag 3.veg cone	-2.5	2.5	°C	2.000
CFMAXgzd	Faktor taljenja snega 1.veg cone	1	10	mm/°C d	6.996
CFMAXgrm	Faktor taljenja snega 2.veg cone	1	10	mm/°C d	2.670
CFMAXtrv	Faktor taljenja snega 3.veg cone	1	10	mm/°C d	5.094
SFCFgzd	Korekcijski faktor za sneg 1.veg cone	0.1	1.2	-	0.441
SFCFgrm	Korekcijski faktor za sneg 2.veg cone	0.1	1.2	-	1.200
SFCFtrv	Korekcijski faktor za sneg 3.veg cone	0.1	1.2	-	0.100
CWHgzd	Kapaciteta vode v snegu 1.veg cone	0	0.2	-	0.030
CWHgrm	Kapaciteta vode v snegu 2.veg cone	0	0.2	-	0.030
CWHtrv	Kapaciteta vode v snegu 3.veg cone	0	0.2	-	0.124
CFRgzd	Faktor zmrzovanja 1.veg cone	0	0.1	-	0.041
CFRgrm	Faktor zmrzovanja 2.veg cone	0	0.1	-	0.040
CFRtrv	Faktor zmrzovanja 3.veg cone	0	0.1	-	0.045
<b>Račun vlage v tleh</b>					
FCgzd	Največja količina vode v tleh	100	800	mm	500.000
FCgrm	Največja količina vode v tleh	100	800	mm	200.000
FCtrv	Največja količina vode v tleh	100	800	mm	700.000
LPgzd	Faktor redukcije potencialne evapotranspiracije	0.1	1	-	0.577
LPgrm	Faktor redukcije potencialne evapotranspiracije	0.1	1	-	0.999
LPtrv	Faktor redukcije potencialne evapotranspiracije	0.1	1	-	0.164
BETAgzd	Parameter oblike, ki določa prispevek k odtoku	1	6	-	1.000
BETAgrm	Parameter oblike, ki določa prispevek k odtoku	1	6	-	1.115
BETAtrv	Parameter oblike, ki določa prispevek k odtoku	1	6	-	4.064
<b>Generiranje odtoka</b>					
K0	Recesijski koeficient za zgornji del zgornjega rezervoarja	0.05	0.5	1/d	0.403
K1	Recesijski koeficient za spodnji del zgornjega rezervoarja	0.01	0.3	1/d	0.037
K2	Recesijski koeficient za spodnji rezervoar	0.001	0.1	1/d	0.004
UZL	Mejna vrednost v zgornjem rezervoarju	0	100	mm	81.886
PERC	Maksimalno pronicanje v spodnji rezervoar	0	6	1/d	1.859
<b>Transformacijska funkcija</b>					
MAXBAS	Predstavlja trajanje funkcije uteži	1	5	d	4.756

**Preglednica 6: Višinske cone**

Elevacijska cona	Srednja višina [m]
1	214
2	345
3	472
4	579
5	747
6	896
7	1047
8	1198
9	1348
10	1489

Model obravnavanega območja zaženemo tako, da spreminjamo izbran parameter po določenem razponu in pri tem zamrzujemo ostale parametre pri njihovih »optimalnih« vrednostih. Z optimalnimi vrednostmi označujemo set parametrov pridobljenih z umeritvijo modela. Tako dobimo neto učinek vsakega parametra brez vključevanja ostalih parametrov, po oceni kriterijske funkcije Reff.

To storimo s pomočjo Monte Carlo simulacije. Metoda Monte Carlo spada v razred računalniških algoritmov, ki za določanje rezultatov uporablja naključno generirane spremenljivke. Znotraj HBV-light okolja nam simulacija omogoča izbiro zgornjih in spodnjih mej parametrov; določene parametre razvrstimo v največ tri vegetacijske razrede in izberemo kriterijsko funkcijo s katero bomo vrednotili. Torej, z vsakim parametrom opravimo 1000 zagonov modela. Beležimo samo rezultate, ki imajo Reff vrednost večjo od 0,6. Vse vrednosti parametrov zatem zaradi lažjega primerjanja in nazornejše grafične predstavitve občutljivosti posameznega parametra normaliziramo. Normalizirane vrednosti prikažemo tako, da je na spodnji meji vrednost nič in na zgornji meji vrednost ena, vse ostale vmesne vrednosti pa naj bodo linearno interpolirane.

Normalizacija vrednosti parametrov je storjena s pomočjo preproste enačbe:

$$z_i = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$$

Tako bo parametrska občutljivost kvalitativno določena z grafi vhodnih vrednosti napram izhodnim. Ti grafični prikazi so koristni za hitro določanje stopnje korelacije in linearnosti odnosov med vhodi in izhodi.

Podamo še stolpčni graf analize občutljivosti modela na parametre z uporabo procentualne spremembe izhodnih vrednosti kriterijske funkcije simulacij glede na »optimalno« vrednost kriterijske funkcije pridobljene pri umerjanju modela. Višja vrednost prikazuje večjo občutljivost za dani parameter. Tudi to storimo samo na primerih, ki dosežejo Reff vrednost večjo od 0,6.

### 4.3 Analiza občutljivosti s spreminjanjem dveh parametrov hkrati

Postopek je enak kot zgoraj, s tem da sedaj spreminjamo dva parametra hkrati. Dvema parametroma bomo določimo zgornjo in spodnjo mejo, ostale pa pustimo pri »optimalni vrednosti«. Za vsak par parametrov zaženemo po 10000 zagonov modela. Zaženemo kombinacije PERC-K2, UZL-K0, UZL-K1 in K2-K1 iz računa generiranja odtoka. Iz računa vlage v tleh in evapotranspiracije zaženemo kombinacije BETA-FC, BETA-LP, FC-LP. Iz računa akumulacije in taljenja snega pa kombinacijo TT-CFMAX. Tako opazujemo medsebojni vpliv parov parametrov modela na rezultat modela in hkrati primerjamo rezultate te dvoparametrske analize občutljivosti z rezultati individualne analize občutljivosti.

#### 4.4 Analiza vpliva parametrov na maksimalni pretok ob poplavi

Analiza občutljivosti parametrov za obdobje maksimalnega pretoka poplavnega dogodka 18.9.2007 je enaka individualni analizi občutljivosti s to razliko, da z Nash-Sutcliffovim kriterijem učinkovitosti ne ocenjujemo celotno obdobje temveč le obdobje nastopa maksimalnega pretoka. To storimo tako, da v HBV-lightu pod nastavitvami modela označimo, naj izračuna učinkovitost modela za navedeno specifično obdobje. V našem primeru bo to izračun za obdobje od 18.9.2007 do 22.9.2007.

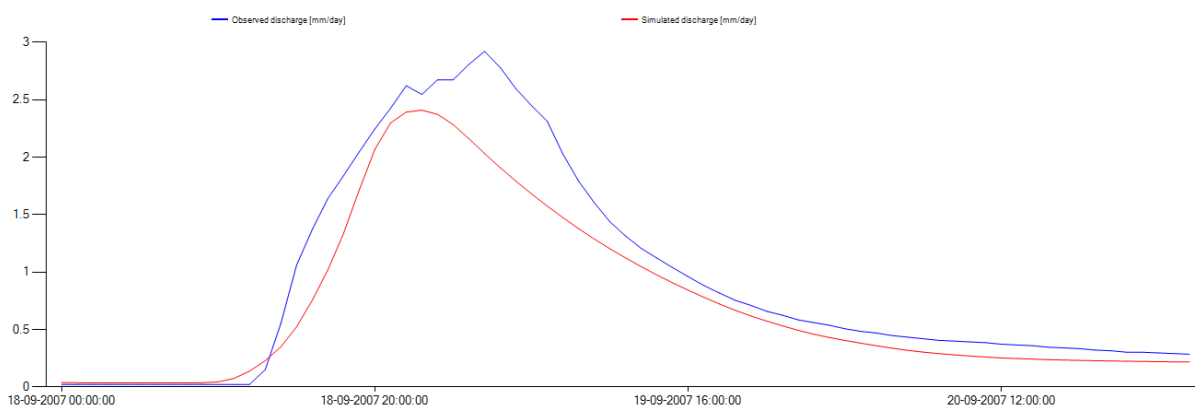
Kriterijsko funkcijo v tej analizi označujemo z oznako *ReffSeason*, enačba funkcije pa ostane enaka. Operiramo z enakim številom simulacij. Rezultate simulacij shranjujemo samo za vrednosti *ReafSeason* večje od 0.6. Grafična predstavitev sledi istemu principu. Tako lahko rezultate enostavno primerjamo z individualno analizo občutljivosti.

Vpliv parametrov na maksimalni pretok ob poplavi prikažemo z volumnsko napako. S spreminjanjem parametrov po njihovem razponu opazujemo vpliv na volumnsko odstopanje med opazovanim in simuliranim pretokom. To storimo za datuma 18.9.2007 in 19.9.2007. Postopek in število simulacij je enak kot pri individualni analizi občutljivosti parametrov.

Uporabili bomo funkcijo *VolumeError*. Ta je podana kot:

$$VolumeError = 1 - \frac{|\sum(Q_{obs} - Q_{sim})|}{\sum(Q_{obs})}$$

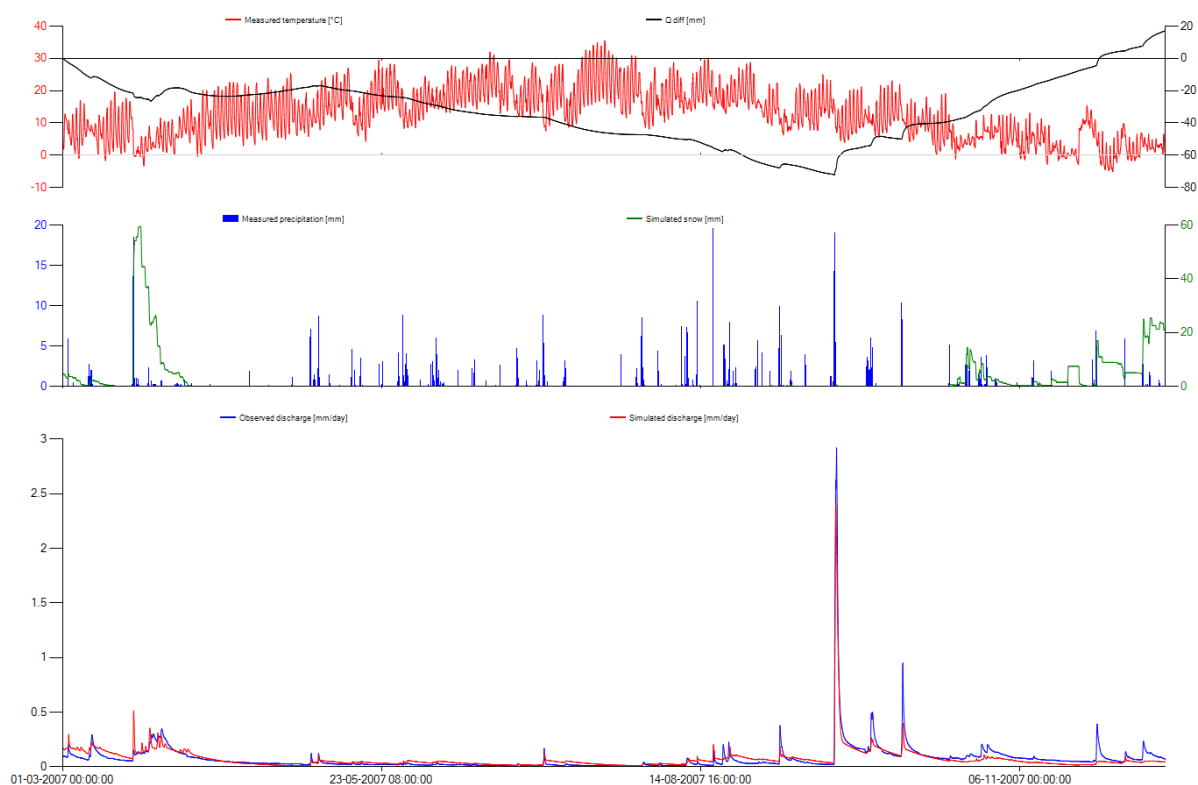
Kjer je  $Q_{obs}$  opazovani pretok in  $Q_{sim}$  simulirani pretok. Vrednost funkcije lahko variira od minus neskončno do ena, kjer slednja vrednost predstavlja popolno volumnsko ujemanje med simuliranimi in opazovanimi podatki.



Slika 23: Prikaz merjenega in simuliranega maksimalnega pretoka ob poplavi.

## 5 REZULTATI

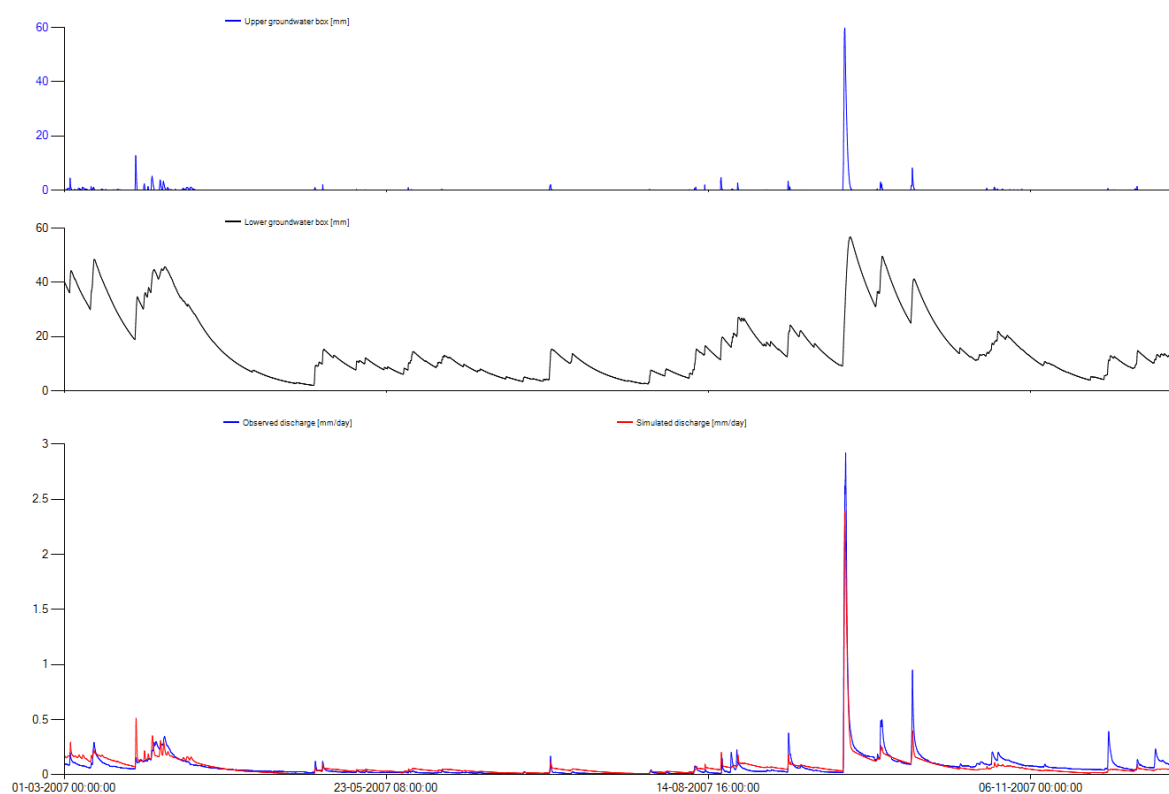
Reprezentativen graf simuliranih in opazovanih odtokov za kalibracijsko obdobje 1.1.2007 do 14.12.2007 je prikazan na sliki 25. Dosežena vrednost kriterijske funkcije za omenjeno kalibracijsko obdobje je 0.865 in vrednost povprečne razlike 22 mm/leto. Analiza individualne občutljivosti za vsak parameter posebej je prikazana na slikah 27, 28, 29, 30 in 31.



**Slika 24: Opazovani odtok, simulirani odtok in padavine za obdobje od 1.1.2007 do 14.12.2007.**

Na sliki 26, kjer so prikazane vrednosti spodnjega in zgornjega rezervoarja v mm, opazimo bistveno večji vpliv spodnjega rezervoarja na odtok. Funkcija zgornjega rezervoarja nastopi le ob visokih vodah, kot je to lepo vidno za poplavni dogodek 18.9.2007.





**Slika 25: Prikaz zgornjega in spodnjega rezervoarja za obdobje od 1.1.2007 do 14.12.2007.**

## 5.1 Rezultati 4.2

Slika 27 prikazuje individualno občutljivost parametrov generiranja odtoka in transformacijske krivulje. Vidimo, da je večina parametrov generiranja odtoka občutljivejša in določljivejša napram drugim računskim postopkom, z izjemo parametra  $K_0$ . Slabo definiran je prav tako parameter transformacijske krivulje MAXBAS.

Parameter PERC, ki predstavlja maksimalno pronicanje iz srednjega v spodnji rezervoar, je eden izmed občutljivejših parametrov generiranja odtoka. Velik vpliv parametra PERC na uspešnost modela nakazuje na pomembnost počasnega podzemnega odtoka v porečju. Na začetku grafa je vidno tudi območje parametra, ki daje boljše rezultate modela.

Individualna analiza občutljivosti parametra  $K_0$  ni identificirala, zato je prikazan kot neobčutljiv parameter. Pri študiji Ouyang in sod., 2014, prav tako nobena izmed obravnavanih kriterijskih funkcij ni identificirala parametra  $K_0$ ; razlog je ta, da ni bilo dovolj velikih pretokov za nastop parametra.  $K_0$  nadzoruje hitri odtok (direktni odtok), ki nastopi ko polnjenje v zgornjem rezervoarju preseže mejno vrednost. Vzorec primerov, ki presegajo mejne vrednosti je zelo majhen. V našem primeru je vpliv

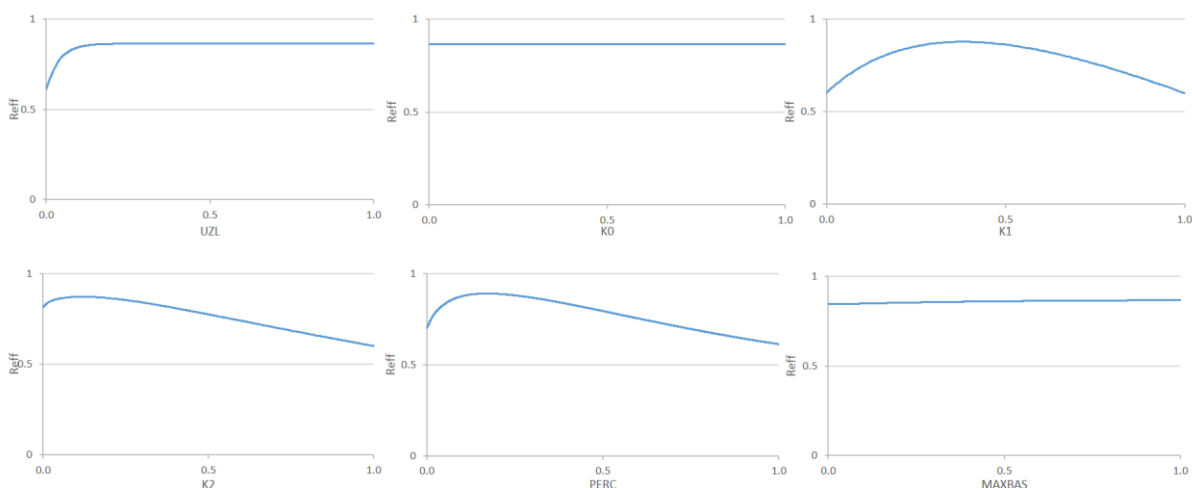
parametra opazen le pri maksimalnem pretoku pri poplavi in zato pri analizah s tako velikim vzorcem pretokov parameter ni opazen.

Nasprotno od recesijskega koeficienta hitrega odtoka  $K_0$ , je koeficient srednjega rezervoarja,  $K_1$ , na obravnavano analizo mnogo občutljivejši parameter; ta podatek kaže na pomembnost hitrega vmesnega toka na generiranje odtoka v porečju.  $K_2$ , recesijski koeficient spodnjega rezervoarja, je prav tako občutljiv parameter in kot parameter PERC razkriva pomembnost počasnega podzemnega odtoka. Iz grafa je tudi jasno razbrati območje določljivosti tega parametra.

UZL, ki predstavlja maksimalno pronicanje iz zgornjega v srednji rezervoar, je vseskozi manj občutljiv. Na grafu opazimo, da začetne vrednosti razpona parametra UZL variirajo nekje do 20% razpona, z višjimi vrednostmi parametra pa postane UZL neobčutljiv.

Parameter transformacijske krivulje MAXBAS je na obravnavano kriterijsko funkcijo rahlo občutljiv. To nižjo občutljivost tega parametra na statistične kriterije in nekoliko večjo na kombinirane kriterijske funkcije ali kakšen drug način vrednotenja, je mogoče opaziti v različnih študijah (Ouyang in sod., 2014).

Parametri na grafih slike 27 vplivajo na visoke vode in manj na volumensko bilanco. Še posebej UZL,  $K_0$  in  $K_1$  so parametri, ki kontrolirajo površinski odtok in hitri vmesni tok. Na odziv porečja vplivajo preko spreminjanja oblike iztočnega hidrografa pri iztoku iz porečja in imajo zato navadno zanemarljiv vpliv na splošno volumensko napako.

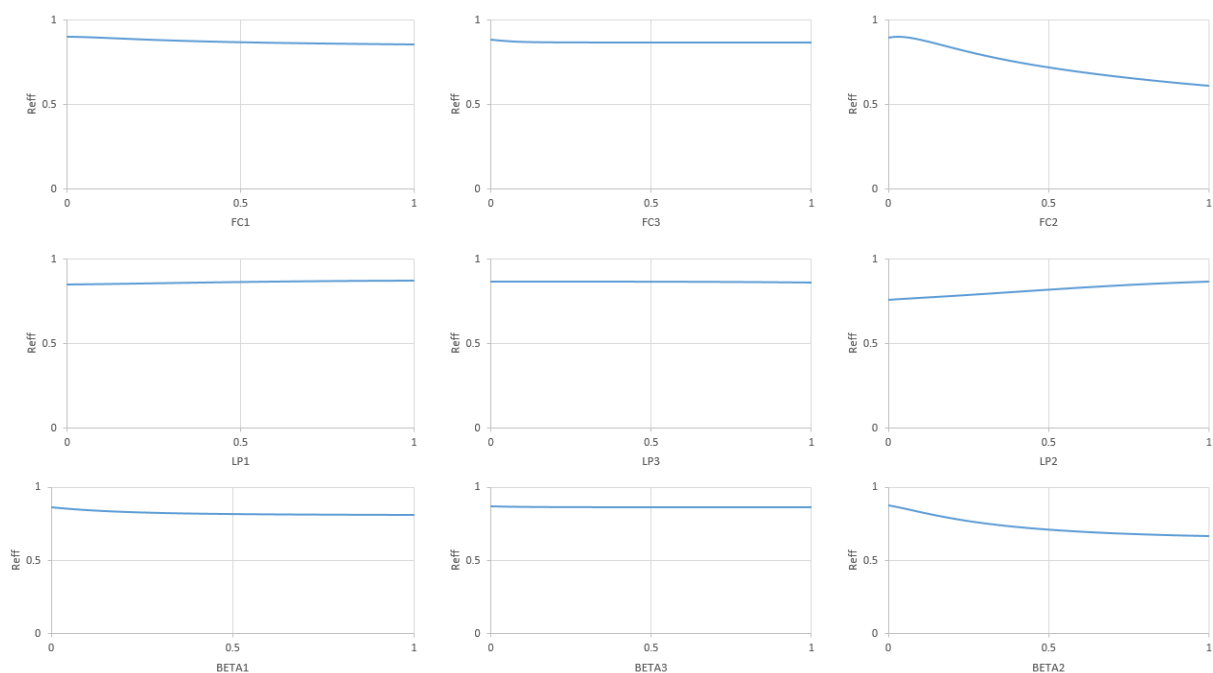


**Slika 26: Grafi občutljivosti parametrov UZL,  $K_0$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ , PERC in MAXBAS glede na Reff.**

Parametri računa vlage in evapotranspiracije, LP, FC in BETA so glede na kriterijsko funkcijo Reff manj občutljivi. Primerneje bi jih bilo ocenjevati na podlagi kriterijske funkcije, ki je občutljivejša na

spremembo volumna. Parametri prvega in tretjega vegetacijskega razreda kažejo rahlo občutljivost. V drugem vegetacijskem razredu pa kažejo vsi trije parametri bistveno večjo občutljivost. Drugi vegetacijski razred predstavlja gozd, ki pokriva 60% obravnavane površine. Tu je razlog večje občutljivosti parametrov tega razreda.

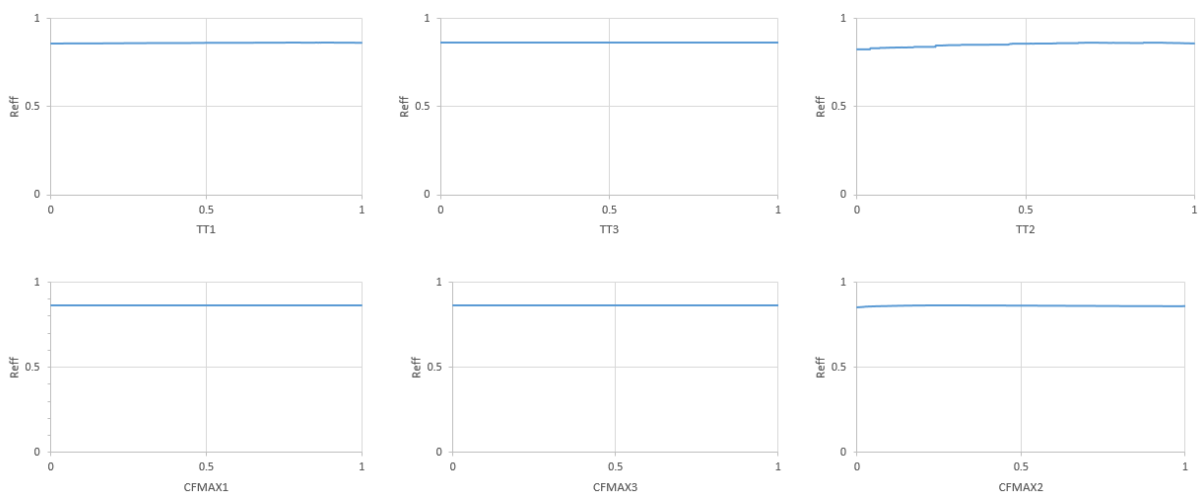
Največja količina vode v tleh, oziroma poljska kapaciteta, FC, ima večji vpliv na uspešnost modela kot parameter BETA (imenovan tudi koeficient oblike), ki pri neki vrednosti vlage v tleh določa delež vode, ki prispeva k odtoku. FC ima pomembno vlogo pri razdeljevanju efektivnih padavin v odtok in vlažnost zemljine. Manjša vrednost FC pomeni, da je zmožnost zadrževanja vode te zemljine zelo nizka (tanek sloj zemljine) in je tako manjša količina vode razpoložljiva za evapotranspiracijo; v primeru višje vrednosti FC-ja pa imamo debelejši sloj zemljine in večjo razpoložljivo količino vode za evapotranspiracijo. Zato je FC eden glavnih parametrov za kontroliranje volumenskih napak in bi bil verjetno v vseh treh vegetacijskih conah občutljivejši na kriterijsko funkcijo, ki temelji na volumenski bilanci. Ker je BETA eksponent razmerja med vlažnostjo zemljine in poljsko kapaciteto, vpliva na delitev mreže padavin v odtok in polnjenje vlažnosti zemljine. Zato je količina vlažnosti zemljine, ki je na voljo za evapotranspiracijo odvisna od tega eksponenta; to je tudi vzrok močnega vpliva parametra na volumsko napako. Zato BETA enako kot FC prikazuje nižjo občutljivost na kriterijsko funkcijo Reff, ki primernejša za visoke vode. LP, ki določa dejansko evapotranspiracijo glede na razpoložljivo vlažnost zemljine, je v drugem vegetacijskem razredu manj občutljiv napram parametroma BETA in FC. LP, ki je faktor redukcije potencialne evapotranspiracije, je izmed treh najmanj občutljiv. Te občutljivosti veljajo za drugi vegetacijski razred. Pri preostalih vegetacijskih razredih sicer lahko zasledimo občutljivost, vendar sta napram drugemu razredu nizko občutljiva.



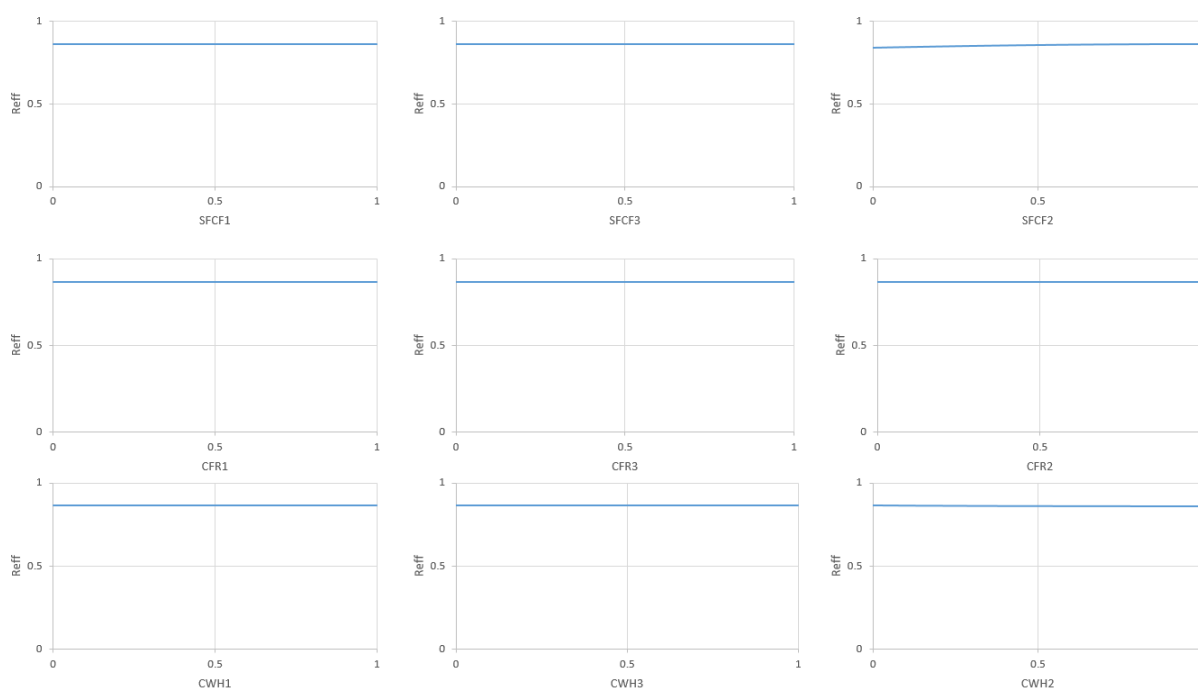
**Slika 27: Grafi občutljivosti parametrov FC, LP in BETA za tri vegetacijske cone glede na Reff.**

Vsi parametri računa akumulacije in taljenja snega so slabo definirani in neobčutljivi. Razlog je verjetno ta, da je bila snežna odeja leta 2007 skromna. Snega v nižinah je bilo malo, nekaj konec januarja, v februarju so bile nižine povsem brez snega in šele 20. marca je nekoliko močnejše snežilo in se v nižinah nabralo okoli 20 cm, vendar je že po štirih dneh skopnel. Tri dni snega je bilo zaznati še septembra. Sredi decembra je ponovno snežilo tudi v nižinah, snežna odeja se je obdržala do konca meseca (ARSO, meteorološki letopis 2007).

Edini parameter, ki kaže neko občutljivost je parameter TT, ki predstavlja temperaturni prag pod katerim se predpostavi, da so padavine snežne.



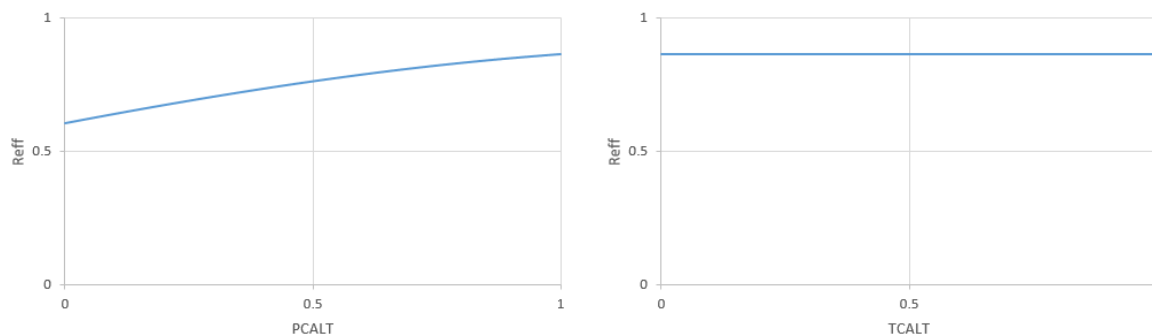
**Slika 28: Grafi občutljivosti parametrov TT in CFMAX za tri vegetacijske cone glede na Reff.**



**Slika 29: Grafi občutljivosti parametrov SFCE, CFR in CWH za tri vegetacijske cone glede na Reff.**

Parameter PCALT je med najbolj občutljivimi parametri modela. Parameter PCALT opisuje spreminjanje količine padavin z nadmorsko višino. Ker so padavinski podatki za modeliranje pridobljeni iz okoliških padavinskih postaj in povprečeni po območju s pomočjo Thiessenovih poligonov, PCALT močno vpliva na območni padavinski vhodni podatek in s tem tudi na sam odtok.

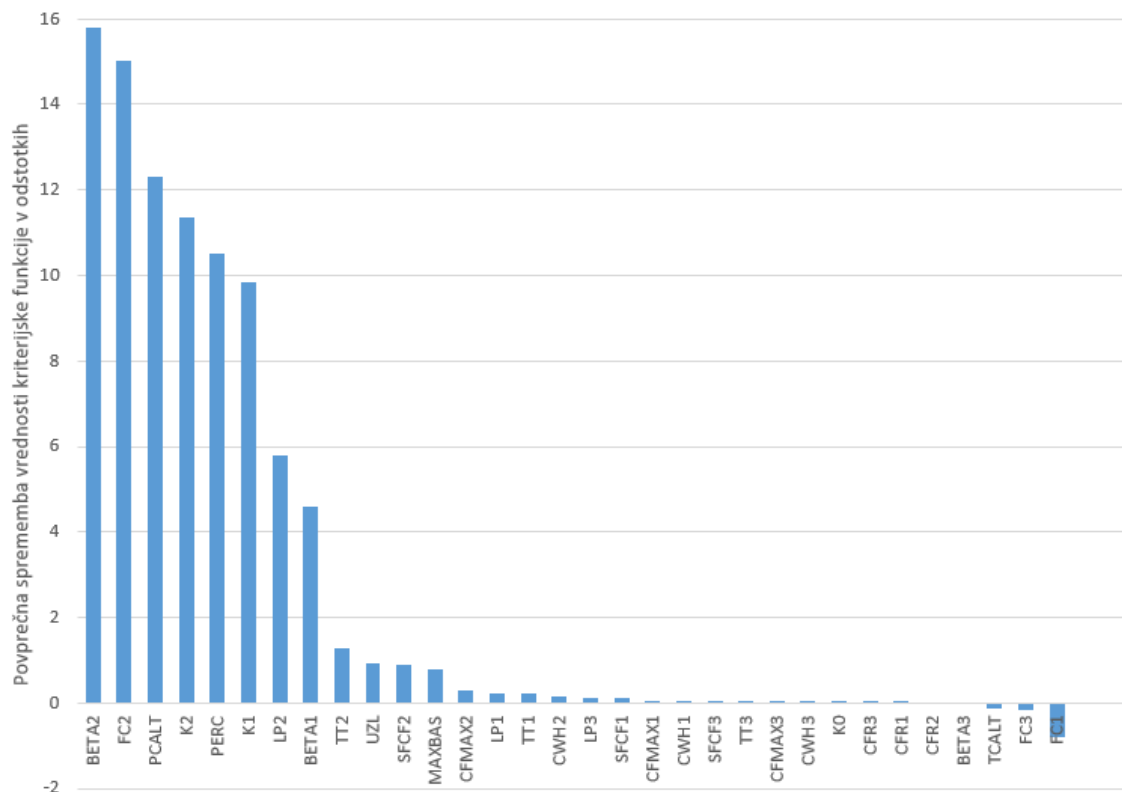
Drugi parameter porečja TCALT, ki opisuje spreminjanje temperature z nadmorsko višino, je neobčutljiv.



**Slika 30: Grafi občutljivosti parametrov PCALT in TCALT glede na Reff.**

Na sliki 32 višja vrednost prikazuje večjo občutljivost za dani parameter. Enaindvajset parametrov izmed dvaintridesetih, ki smo jih analizirali, prikazuje določen vpliv na simulacijo odtoka in so torej

tisti, na katere se model močneje odziva. Med vsemi omenjenimi jih trinajst prikazuje še občutnejši vpliv na simulacijo in so torej tisti na katere je model najobčutljivejši. Pripis stopnje občutljivosti je subjektiven. Parametri, ki smo jih tukaj obravnavali kot občutljive, so tisti katerih povprečna procentualna sprememba vrednosti kriterijske funkcije je večja od 0,05.



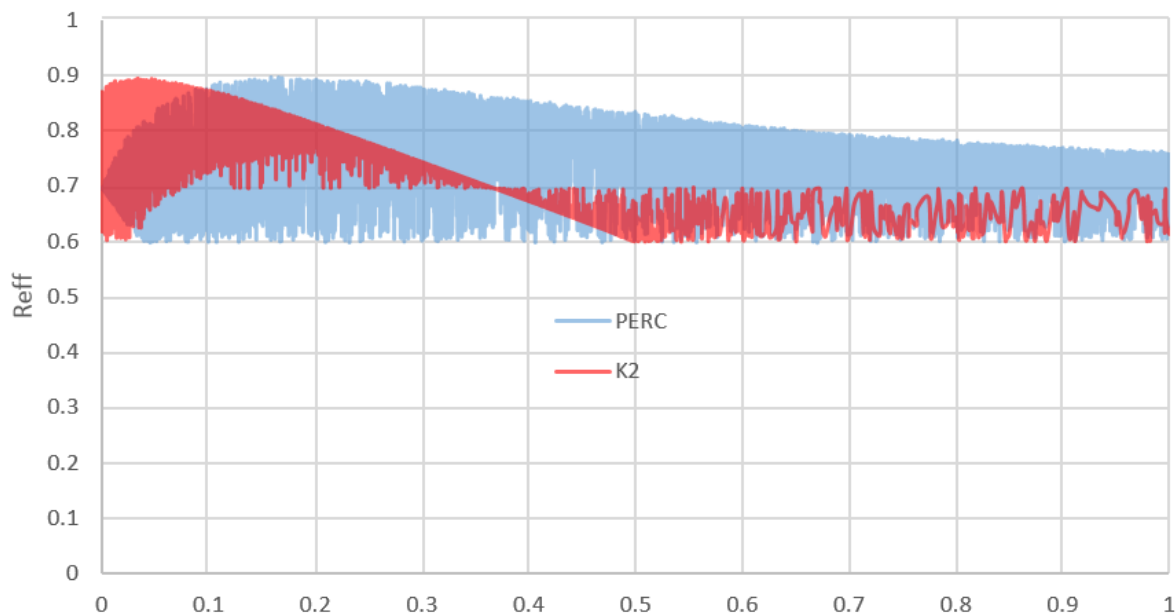
**Slika 31: Rezultat analize občutljivosti modela na parametre v obliki povprečne spremembe vrednosti kriterijske funkcije v odstotkih.**

## 5.2 Rezultati 4.3

Parameter PERC ima neposreden vpliv na parameter K2. Voda pronica v spodnji rezervoar, na katerega iztok vpliva parameter K2, s konstantno vrednostjo parametra PERC. Iztok spodnjega rezervoarja predstavlja bazni odtok. Slika 33 prikazuje medsebojni vpliv omenjenih parametrov. Vrednosti parametra K2 po dvoparametrski analizi pri okoli 35% začetnih vrednosti dosegajo le prag 0.7 kriterijske funkcije, medtem ko pri individualni analizi občutljivosti vrednosti parametra padejo na isti prag nekje pri 70%.

Prav tako parameter K2 vpliva na PERC. Pri dvoparametrski analizi dosegajo vrednosti parametra po razponu nekoliko višje rezultate kot pri individualni analizi občutljivosti.

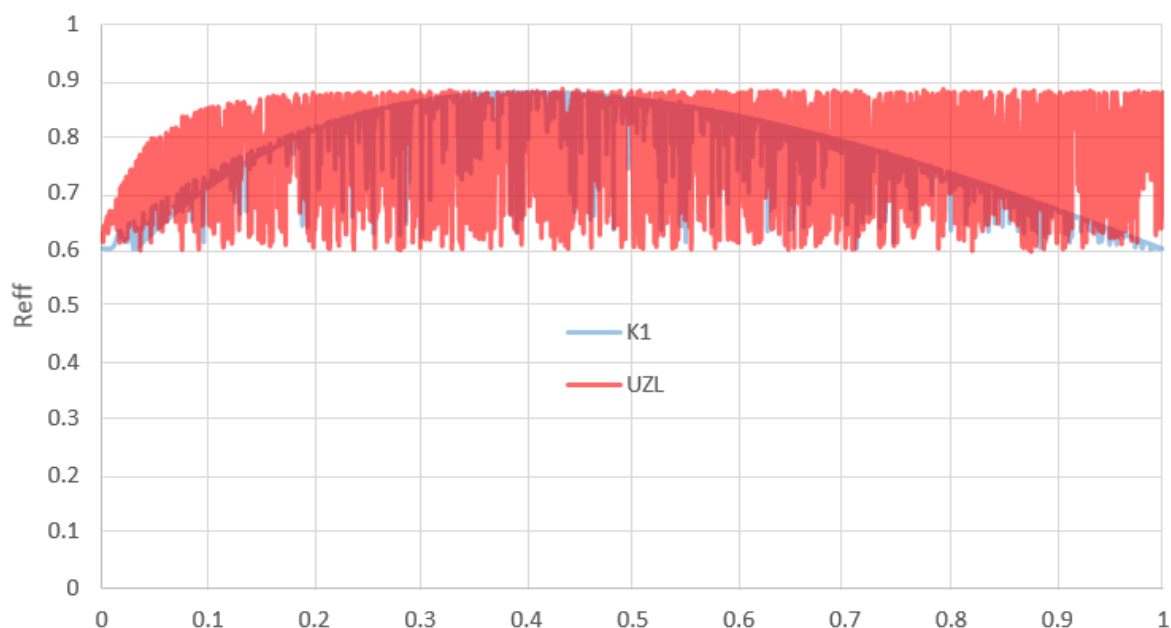
Opazimo torej razliko med individualno in dvoparametrsko analizo, ki napotuje na medsebojni vpliv parametrov in s tem razlika ocenjevalnega rezultata modela.



**Slika 32: Graf analize občutljivosti s spreminjanjem dveh parametrov hkrati (PERC in K2).**

Maksimalno pronicanje v srednji rezervoar modela predstavlja UZL; velikost iztoka srednjega rezervoarja pa določimo z recesijskim koeficientom K1. Občutljivost parametra K1 se glede na individualno analizo ne spreminja bistveno. Po razponu sicer dosežemo nekoliko več rezultatov, vendar zgornja kontura ostaja enaka kot pri individualni analizi.

Večji vpliv je opazen na parametru UZL. Zgornja kontura grafa sicer ostaja podobna kot pri individualni analizi, vendar pa lahko znotraj te dosega skoraj vse vrednosti. Razlika se jasno pokaže tudi, ko primerjamo to dvoparametrsko kombinacijo s kombinacijo K0-UZL, kjer parameter UZL po začetnih 20% ne niha.

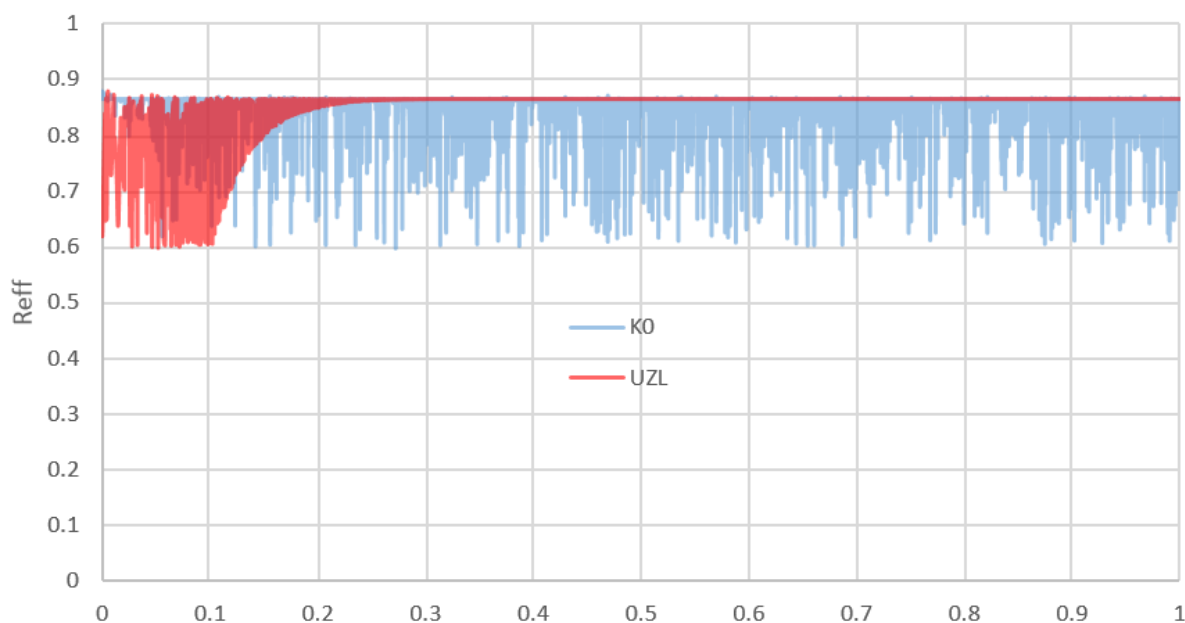


**Slika 33: Graf analize občutljivosti s spreminjanjem dveh parametrov hkrati (K1 in UZL).**

Zgornji rezervoar modela se aktivira ob večjih nalivih, velikost iztoka pa se določi z recesijskim koeficientom  $K_0$ . Parameter UZL vpliva na izcejanje zgornjega rezervoarja in s tem tudi na velikost iztoka zgornjega rezervoarja. Pri individualni analizi smo razbrali neobčutljivost parametra  $K_0$  na celotnem razponu. Na celotnem razponu je namreč  $K_0$  dosegal vrednosti kriterijske funkcije 0.865, ki je najvišja dosežena kalibracijska vrednost za dano porečje. Pri analizi občutljivosti s spreminjanjem dveh parametrov pa opazimo vpliv parametra UZL na  $K_0$ , saj slednji dosega tudi ostale rezultate po celotnem razponu.

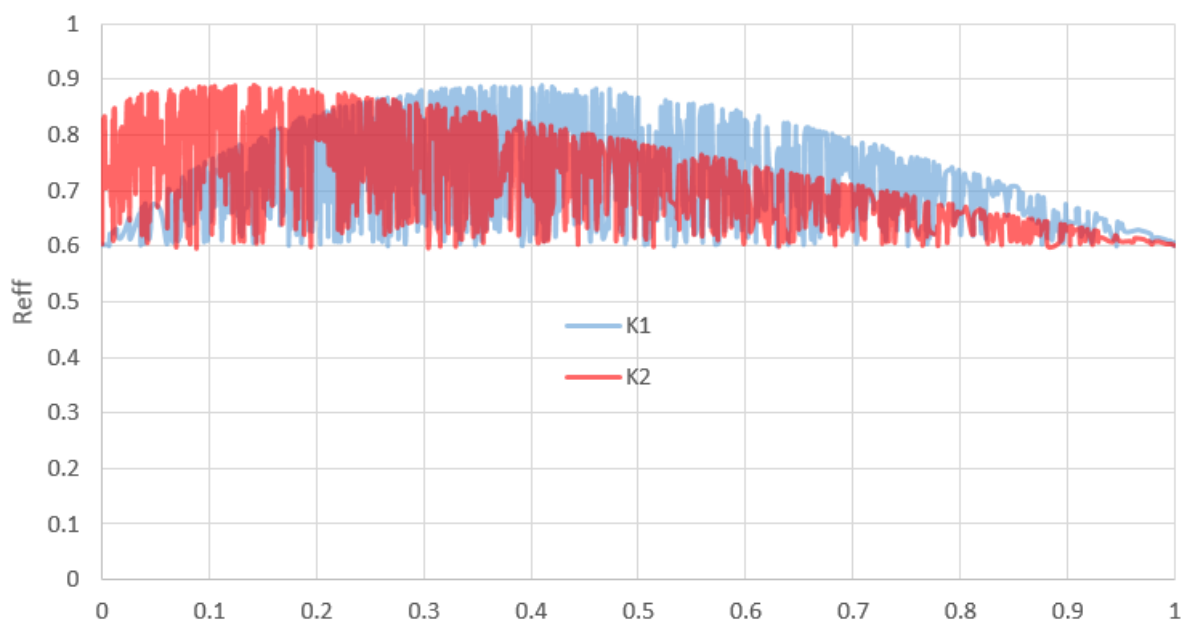
UZL pri individualni analizi, nekje do 20% začetnih vrednosti razpona parametra ni dosegal najvišjih vrednosti kriterijske funkcije. Pri dvoparametrski analizi pa opazimo, da s hkratnim spreminjanjem parametrov UZL in  $K_0$  lahko UZL dosega tudi najvišje vrednosti Reffa pri začetnih 20% razpona. Po tem občutljivem delu grafa pa je parameter UZL tako kot pri individualni analizi neobčutljiv.





**Slika 34: Graf analize občutljivosti s spreminjanjem dveh parametrov hkrati (K0 in UZL).**

Recesijski koeficient K1 vpliva na iztok srednjega rezervoarja in K2 na iztok spodnjega rezervoarja, zato tudi ne pričakujemo večje medsebojne odvisnosti. Pri primerjavi grafov individualne analize obeh parametrov in dvoparametrške analize opazimo, da so gornje konture grafov ostale enake. Medsebojni vpliv parametrov se izkaže v nihanju vrednosti kriterijske funkcije po celotnem razponu znotraj gornjih kontur grafov.



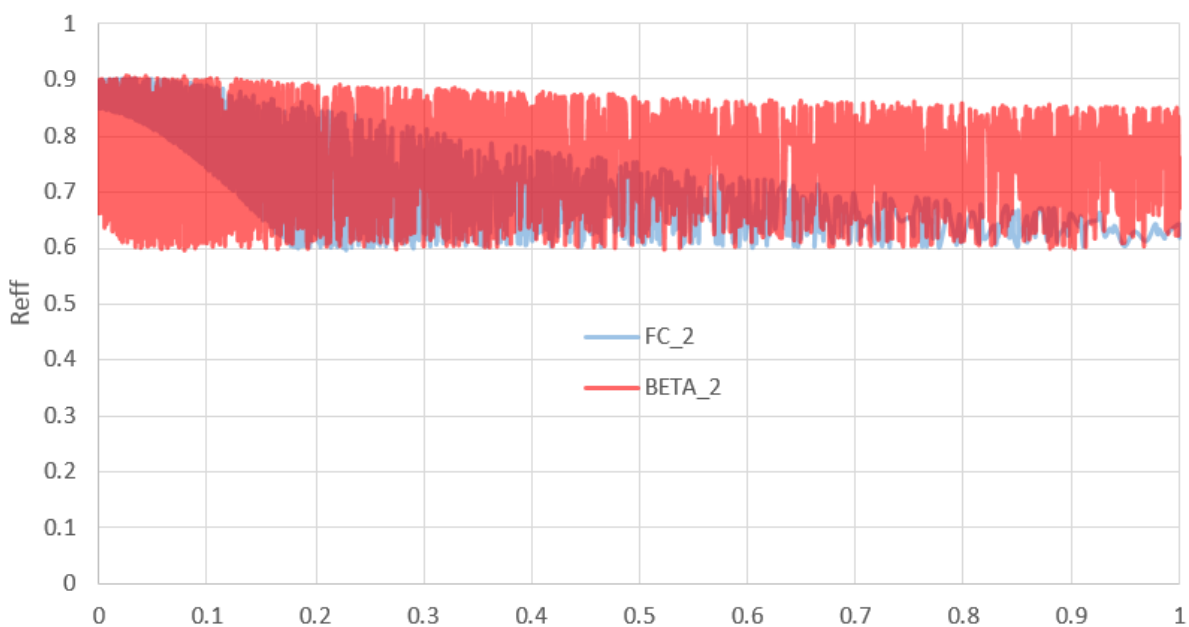
**Slika 35: Graf analize občutljivosti s spreminjanjem dveh parametrov hkrati (K1 in K2).**

Parameter BETA, imenovan tudi parameter oblike, pri neki količini vlage v tleh določa delež vode, ki prispeva k odtoku. Torej vpliva na odtočni količnik, ki je definiran kot razmerje med efektivnimi padavinami in skupnim vnosom vode v tla. Ta odtočni količnik, oziroma veličina odtoka, se v modelu izračuna na razmerju med trenutno vlago v tleh in poljsko kapaciteto (FC).

Pri individualni analizi vidimo, da sta parametra BETA in FC v drugem vegetacijskem razredu precej občutljiva in imata razmeroma vidni mesti določljivosti. Zato pri analizi občutljivosti s spreminjanjem dveh parametrov hkrati obravnavamo samo ta razred. Parameter BETA sedaj niha od nižjih do višjih vrednosti kriterijske funkcije po celotnem razponu parametra; nižje vrednosti kompenzira parameter FC. Zgornja kontura grafa parametra BETA se napram individualni analizi nekoliko dvigne, kar pomeni, da lahko po celotnem razponu dosežemo višje vrednosti ocene modela.

Parameter FC ima na grafu jasneje izraženo spodnjo konturo in ožji pas vrednosti, ki jih zavzema; je boljše definiran od BETA. Za določene nižje vrednosti pa vtem primeru kompenzira parameter BETA.

Opazna je torej medsebojna odvisnost parametrov FC in BETA in vpliv na oceno modela, saj s hkratni spreminjanjem vrednosti po njunih razponih dosegamo širša območja delovanja in višje rezultate kriterija uspešnosti modela. Kjer bi vrednost parametra BETA po individualni analizi dosegla nižjo kriterijsko vrednost jo s spremembo parametra FC zvišamo in obratno.



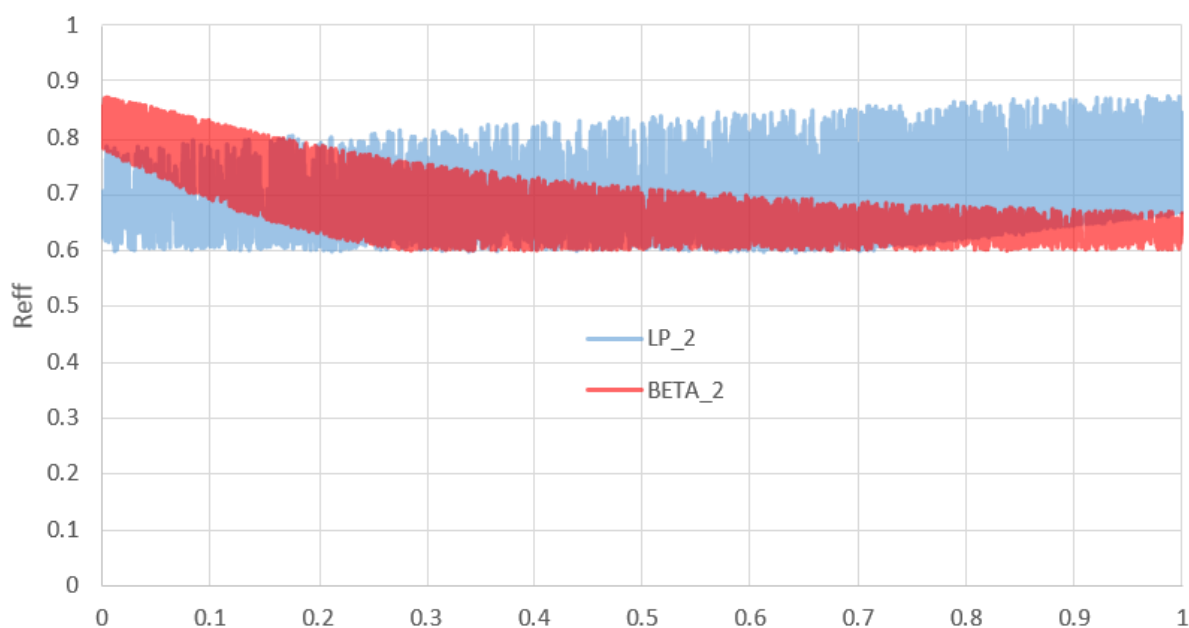
**Slika 36: Graf analize občutljivosti s spreminjanjem dveh parametrov hkrati (FC in BETA).**

Parameter LP predstavlja faktor redukcije potencialne evapotranspiracije. Kadar imamo trenutno vlago v tleh večjo od produkta FC in LP, je dejanska evapotranspiracija enaka potencialni evapotranspiraciji.

Parameter BETA je v kombinaciji s parametrom LP dobro definiran. Če ga primerjamo z zgornjo kombinacijo ima v tem primeru precej ožje območje delovanja. Njegova zgornja kontura grafa pade. Višje vrednosti ocene učinkovitosti modela dosegajo samo začetne vrednosti razpona parametra.

Parameter LP ima gornjo konturo enako kot pri individualni analizi. Je slabo definiran. Ima širok pas delovanja, saj po celotnem razponu vrednosti parametra nihajo, za kar kompenzira parameter BETA.

Tudi tu je jasno vidna medsebojna odvisnost parametrov in vpliv na učinkovitost modela.

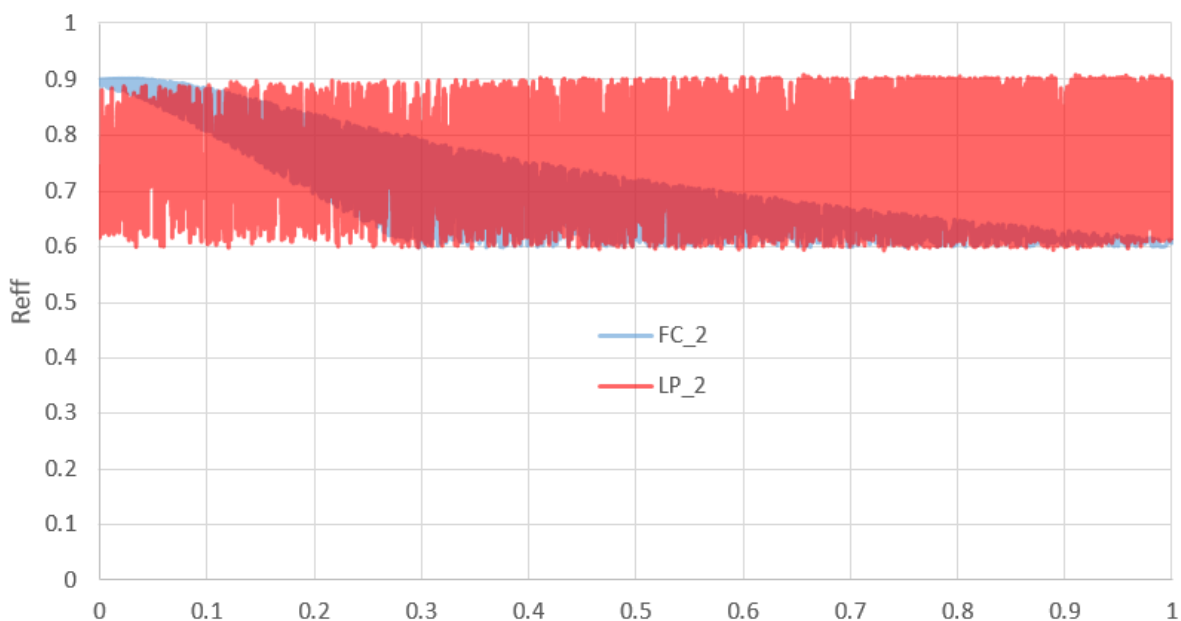


**Slika 37: Graf analize občutljivosti s spreminjanjem dveh parametrov hkrati (LP in BETA).**

Parameter LP je v kombinaciji z FC nizko občutljiv. Po celotnem razponu dosega visoke vrednosti. V primerjavi s kombinacijo s parametrom BETA se mu gornja kontura grafa precej zviša.

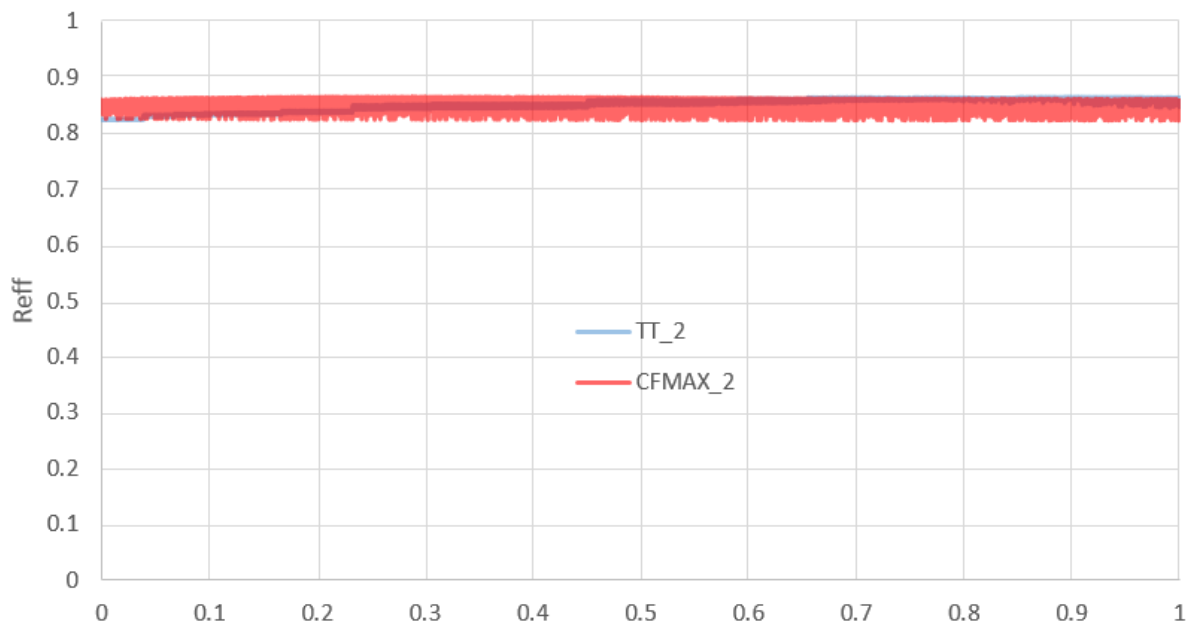
Parameter FC je tukaj še bolj definiran kot v kombinaciji s parametrom BETA. Glede na to, da dosega najvišjo oceno na samem začetku, na robu grafa, bi bilo mogoče smiselno znižati spodnjo mejo razpona parametra.

Tudi v zadnjem primeru parametra izkazujeta medsebojno soodvisnost in vpliv na rezultate modela.



**Slika 38: Graf analize občutljivosti s spreminjanjem dveh parametrov hkrati (FC in LP).**

Sneg se začne taliti, ko temperatura zraka naraste nad mejno vrednost TT. Faktor CFMAX določa količino staljenega snega v časovnem intervalu ki jo povzroči zvišanje temperature zraka za 1°C nad TT. Parametri računa akumulacije in taljenja snegu so tudi pri analizi občutljivosti s spreminjanjem dveh parametrov hkrati, neobčutljivi in nedoločljivi.



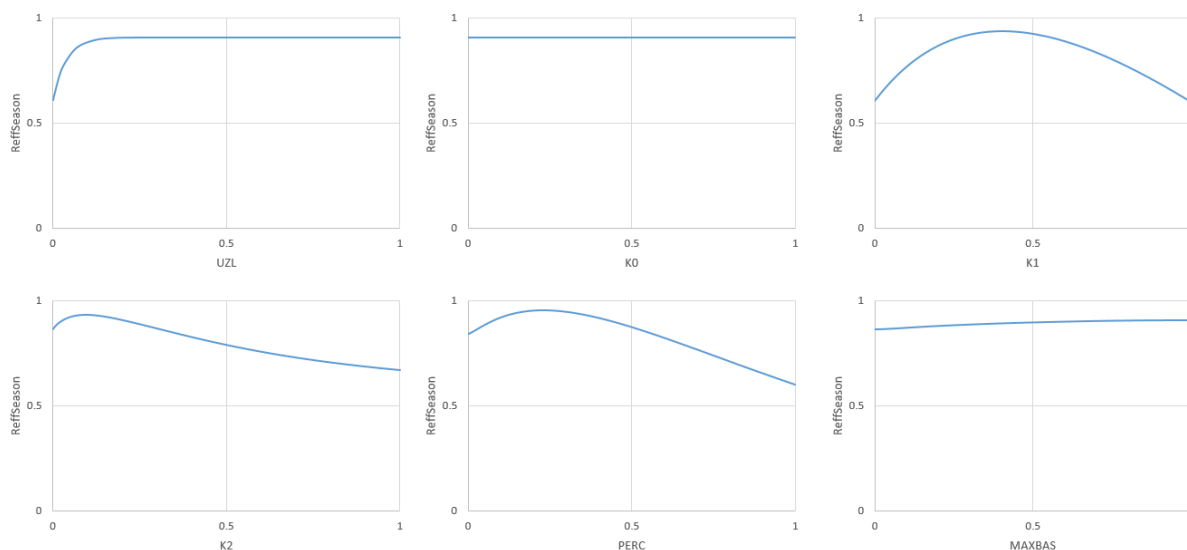
**Slika 39: Graf analize občutljivosti s spreminjanjem dveh parametrov hkrati (TT in CFMAX).**

### 5.3 Rezultati 4.4

Analiza občutljivosti parametrov generiranja odtoka za obdobje od 18.9.2007 do 22.9.2007 ne prikazuje bistvene razlike glede na individualno analizo občutljivosti. Parametri dosegajo nekoliko višje rezultate kriterija učinkovitosti, čigar vzrok je v krajšem obdobju analize.

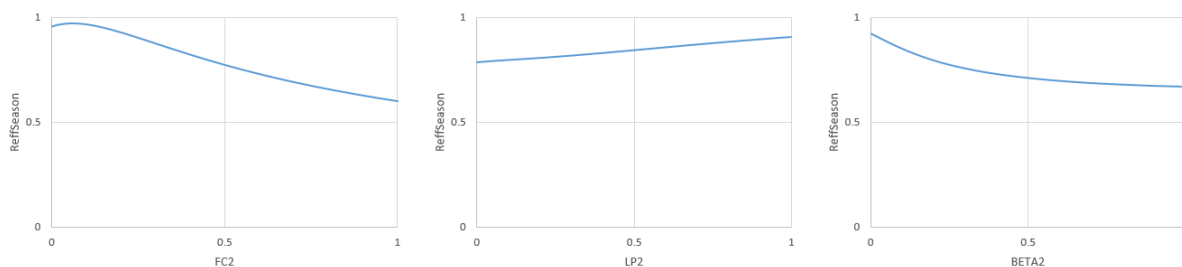
Nekoliko večja sprememba je opazna le pri parametru K2, katerega zgornja kontura grafa se v srednjem delu nekoliko spusti. Prikazuje rahlo večjo občutljivost napram individualni analizi.

V splošnem lahko torej potrdimo predpostavko primernosti Nash-Sutcliffovega kriterija učinkovitosti za simuliranje špic pretokov.



**Slika 40:** : Grafi občutljivosti parametrov UZL, K0, K1, K2, PERC in MAXBAS glede na Reff za obdobje od 18.9.2007 do 22.9.2007.

Analiza občutljivosti parametrov računa vlage v tleh in evapotranspiracije za obdobje od 18.9.2007 do 22.9.2007 prav tako ne prikazuje bistvene razlike glede na individualno analizo občutljivosti.



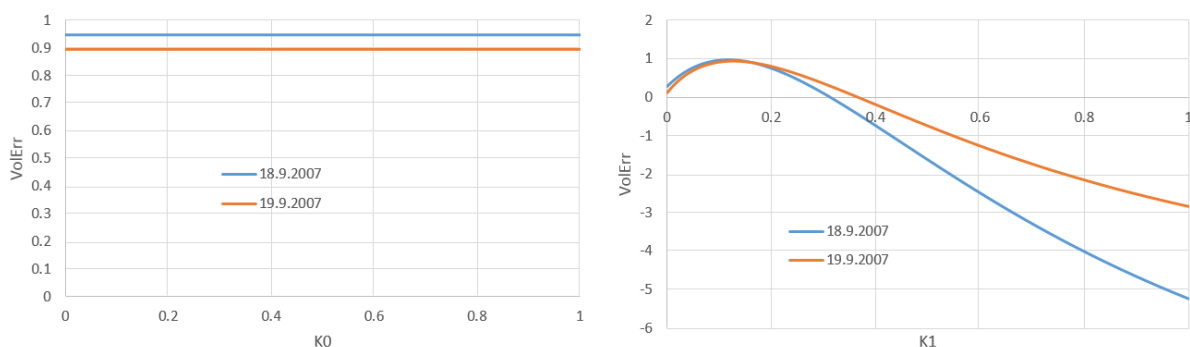
**Slika 41:** Grafi občutljivosti parametrov FC, LP in BETA drugega vegetacijskega razreda glede na Reff za obdobje od 18.9.2007 do 22.9.2007.

Tudi pri analizi vpliva parametrov na maksimalni pretok K0 ostaja neobčutljiv. Vpliv parametra K0 je opazen samo pri velikih pretokih. V našem primeru je vpliv opazen samo na maksimalnem pretoku ob poplavi (Slika 45). Zato je pri analizah z daljšim časovnim obdobjem neopazen in označen za neobčutljiv parameter.

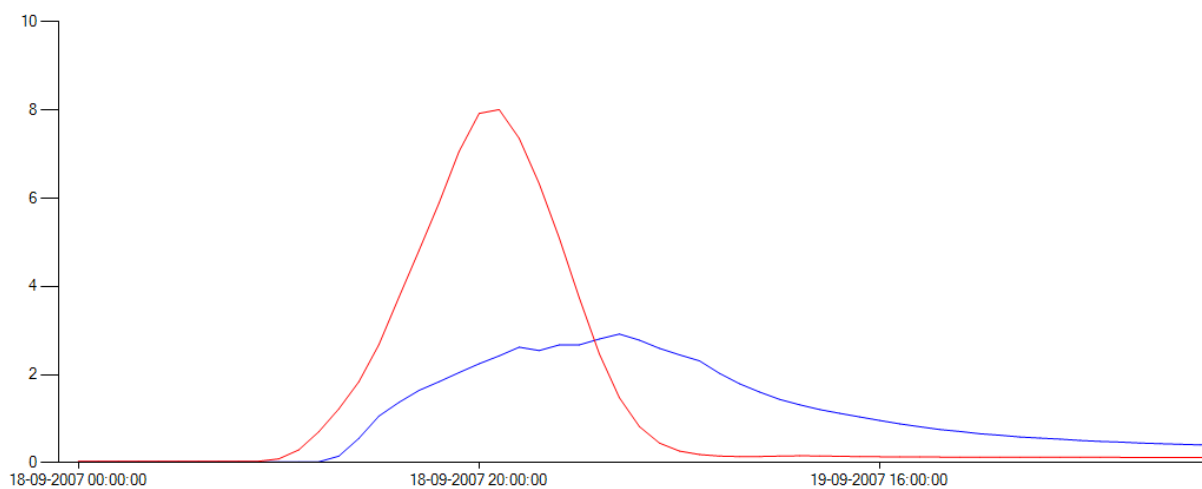
Graf koeficienta srednjega rezervoarja K1 ima velik vpliv na izgled hidrograma maksimalnega pretoka in volumensko napako. Parameter K1 predstavlja hitri vmesni tok, zato njegov vpliv na poplavni pretok ne preseneča.

Negativne vrednosti funkcije predstavljajo preskok, kjer simulirane vrednosti prekoračijo opazovane. Vpliv lahko ponazorimo s prikazom hidrograma za maksimalno vrednost (0.3 1/dan, na grafu prikazana normalizirana vrednost 1) UZL parametra znotraj njegovega razpona (Slika 44).

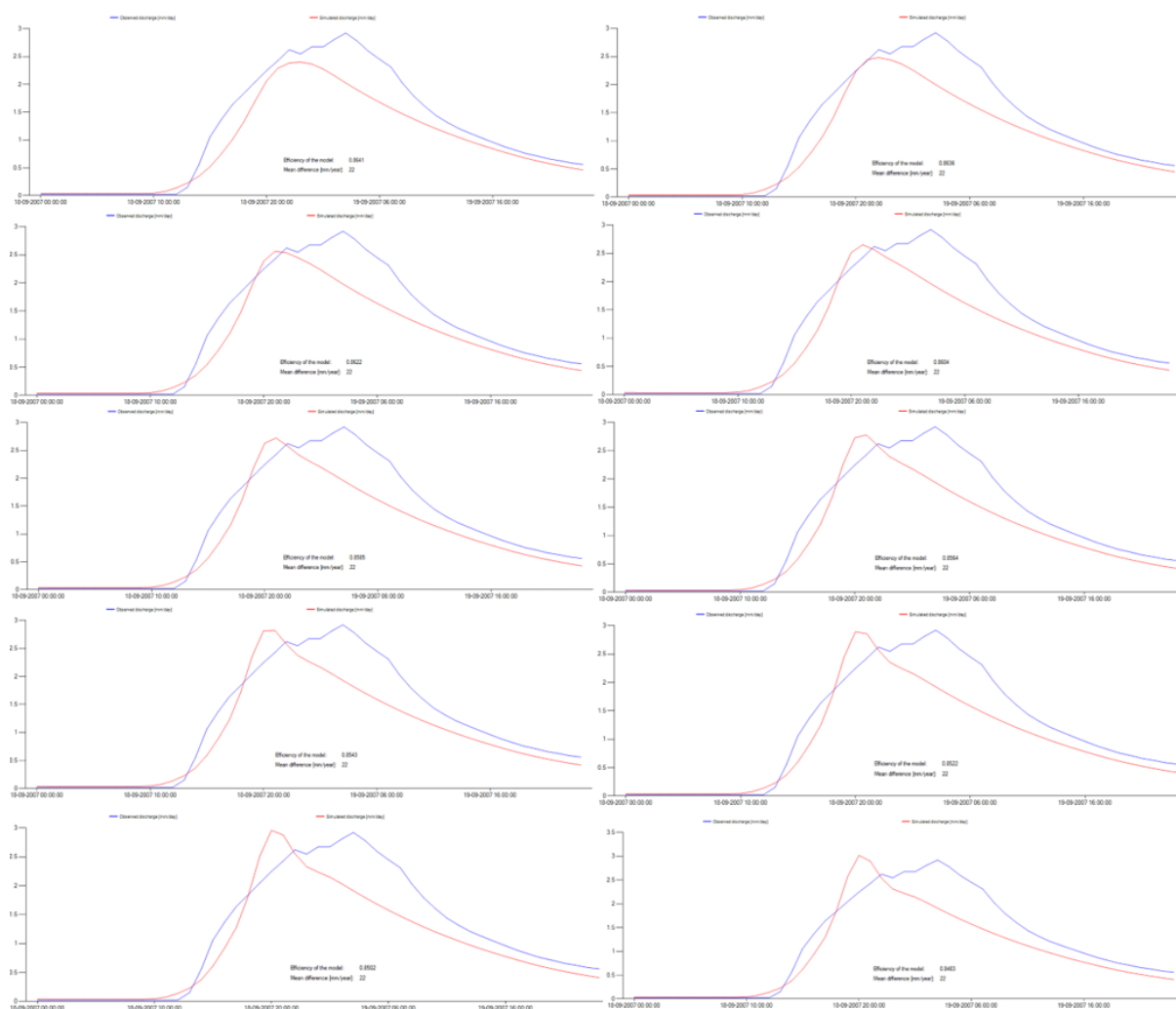
Na grafu je jasno razločno ozko območje parametra, ki najbolje simulira merjeni pretok. Viden je tudi večji vpliv parametra K1 na dan intenzivnih padavin 18.9.2007.



Slika 42: Grafa parametrov K0 in K1 glede na VolumeError.



Slika 43: Vpliv spremembe parametra K1 na hidrogram.

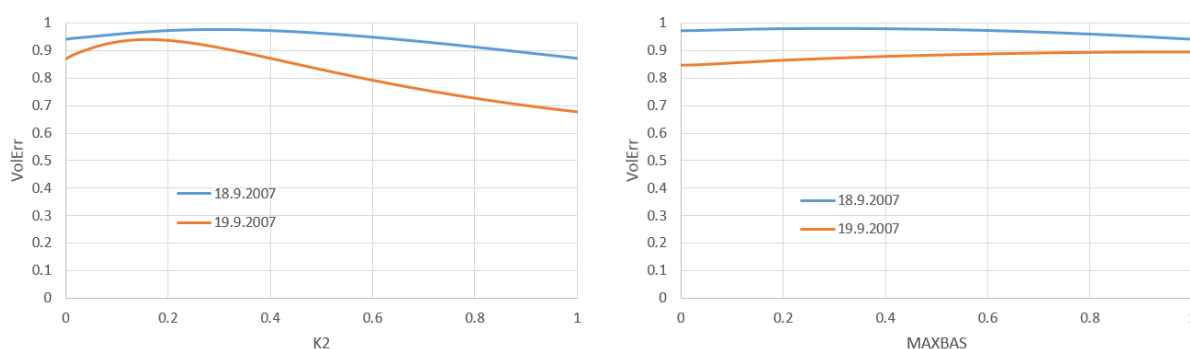


**Slika 44:** Prikaz vpliva spremembe  $K_0$  (z inkrementom 0.05 od leve proti desni) na maksimalni pretok ob poplavi.

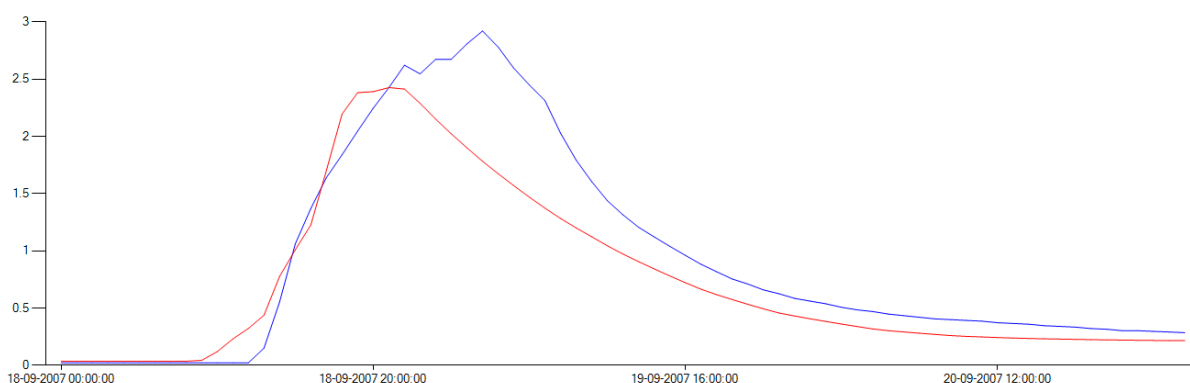
Parametra  $K_2$  in MAXBAS vršita manjši vpliv na volumensko napako od parametra  $K_1$ .

Parameter spodnjega rezervoarja  $K_2$  predstavlja spodnji počasni odtok (bazni odtok) in je tako tudi razlog za manjši vpliv na hitri pojav. Nasprotno od parametra  $K_1$ , izkazuje parameter  $K_2$  na dan 19.9.2007 večji vpliv; razlog je verjetno v odebelitvi baznega odtoka, ki je posledica padavin prejšnjega dne.

Parameter MAXBAS  $[\Delta t]$ , ki predstavlja trajanje funkcije uteži, uporabljamo za pridobitev hidrograma pravilnejše oblike. Večji vpliv vrši na izgled hidrograma kot na samo volumensko spremembo. Primer zamika simuliranega hidrograma je prikazan na sliki 47 pri vrednosti 1 d.



**Slika 45: Grafa parametrov K2 in MAXBAS glede na VolumeError.**

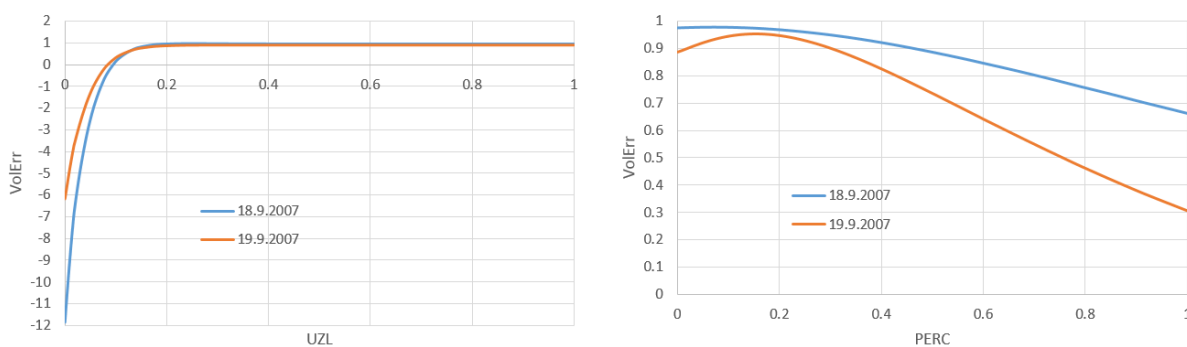


**Slika 46: Prikaz zamika hidrograma s spremembo parametra MAXBAS.**

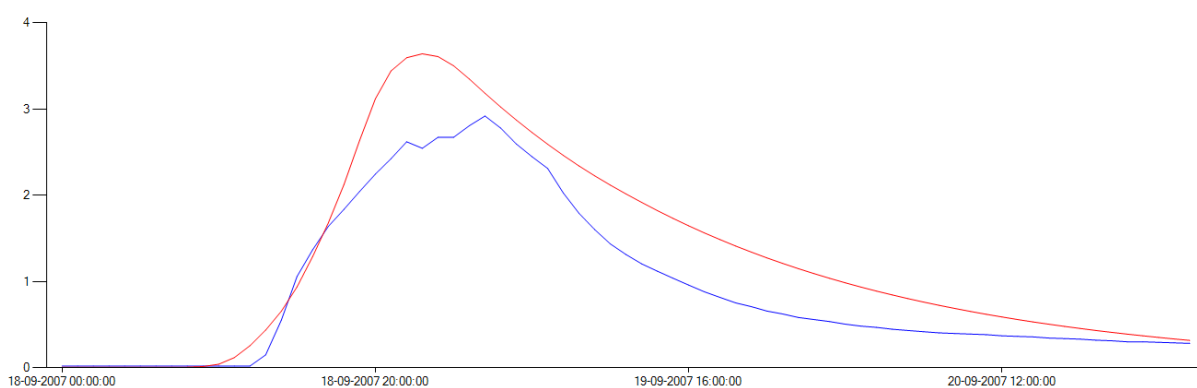
UZL [mm/ $\Delta t$ ] v sistemu treh rezervoarjev predstavlja maksimalno pronicanje iz zgornjega v srednji rezervoar. Ima torej neposreden vpliv na parameter K1, ki kontrolira iztok srednjega rezervoarja. Zato parameter UZL prikazuje velik vpliv na volumensko napako, vendar le pri začetnih 20% vrednosti razpona. Ostale vrednosti so neobčutljive, enako kot pri individualni analizi občutljivosti. Torej, če vrednosti parametra UZL padejo pod 20 mm/d bo simulacija slaba. Enako kot K1 prikazuje večjo občutljivost na dan 18.9.2007. Primer vpliva skrajne nizke vrednosti parametra UZL na hidrogram prikazuje slika 49.

Parameter PERC [mm/ $\Delta t$ ] predstavlja maksimalno pronicanje iz srednjega v spodnji rezervoar. Ima večji vpliv od parametra K2, ker vpliva na praznjenje srednjega rezervoarja. Tako kot parameter K2 prikazuje večjo občutljivost na dan 19.9.2007.





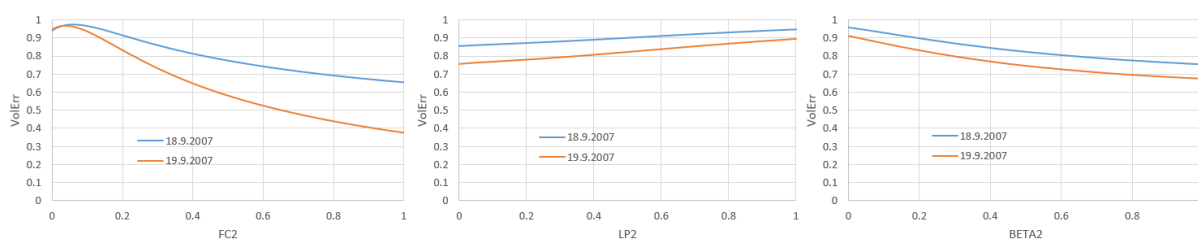
Slika 47: Grafa parametrov UZL in PERC glede na VolumeError.



Slika 48: Vpliv parametra UZL na hidrogram.

Izmed parametrov računa vlage v tleh in evapotranspiracije prikazuje največji vpliv na volumensko napako parameter FC drugega vegetacijskega razreda. FC [mm] predstavlja največjo količino vode v tleh oz. poljsko kapaciteto. Kot napisano pri individualni analizi ima FC pomembno vlogo pri razdeljevanju efektivnih padavin v odtok in vlažnost zemljine, zato je tudi eden glavnih parametrov za kontroliranje volumenskih napak. Začetne vrednosti razpona imajo višje vrednosti kriterijske funkcije. Večjo občutljivost prikazuje na dan 19.9.2007.

Parametra LP in BETA ne izkazujeta večjega vpliva na volumensko napako in na maksimalni pretok ob poplavi.



Slika 49: Grafi parametrov FC, LP in BETA za drugi vegetacijski razred glede na VolumeError.

## 6 ZAKLJUČEK

Parametri modela, ki odražajo največji vpliv na rezultate modela so opredeljeni skozi analizo občutljivosti. V tem delu smo analizirali občutljivost in funkcijo parametrov HBV-light modela z Nash-Sutcliffovim kriterijem na podatkih porečja Bolske za leto 2007.

Individualna analiza občutljivosti parametrov okoli kalibriranih optimalnih točk je pokazala, da imajo največji vpliv na model parametri računa generiranja odtoka. Analiza parametra K0 ni uspela identificirati. Vpliv parametra K0 je opazen samo pri velikih pretokih, zato pri tako velikem vzorcu parameter ni prišel do izraza.

Parametri računa vlage v tleh in evapotranspiracije so pokazali večjo občutljivost le v drugem vegetacijskem razredu. To kaže na velik vpliv gozda, ki predstavlja ta razred in ki pokriva 60% obravnavane površine. Parametri računa akumulacije in taljenja snegu so se pokazali kot neobčutljivi za dani model in obravnavano obdobje. Razlog je iskati v skromni snežni odeji v obravnavanem obdobju.

Za zelo občutljiv parameter se je izkazal PCALT; ta opisuje spreminjanje količine padavin z nadmorsko višino. Parameter močno vpliva na območni padavinski vhodni podatek in tako tudi na sam odtok.

Z analizo občutljivosti s spreminjanjem dveh parametrov hkrati smo opazovali medsebojni vpliv parov parametrov modela in hkrati učinek glede na individualno analizo. Pri večini kombinacij je opazen medsebojni vpliv in s tem razlika v rezultatih modela. To je dokaz negotovosti v rezultatih modela in potrjuje hipotezo ekvifinalnosti.

Analiza občutljivosti parametrov generiranja odtoka za obdobje od 18.9.2007 do 22.9.2007 ne prikazuje bistvene razlike glede na individualno analizo občutljivosti. Vzrok temu, da parametri dosežajo nekoliko višje rezultate kriterija učinkovitosti je v krajšem obdobju analize. V splošnem lahko potrdimo predpostavko primernosti Nash-Sutcliffovega kriterija učinkovitosti za simuliranje špic pretokov.

Vpliv parametrov na maksimalni pretok ob poplavi smo analizirali s pomočjo kriterijske funkcije volumenske napake. Parametri, ki so pokazali velik vpliv na maksimalni pretok so: K0, K1, UZL, PERC in FC. Vpliv parametra K0 se v obravnavanem primeru izkazuje samo na maksimalnem pretoku ob poplavi.

Z analizo občutljivosti smo določili neobčutljiva vegetacijska območja in neobčutljivost parametrov računa akumulacije in taljenja snega. Z uporabo konstantnih vrednosti za manj občutljive parametre si olajšamo delo pri analizi negotovosti.

V nadaljnji študiji bi bilo potrebno opraviti analize na podlagi različnih ocenjevalnih kriterijev modela oziroma kombinaciji le teh. Priporočljivo bi bilo opraviti tudi temporalno analizo spremembe »optimalnih« parametrskih vrednosti in opazovati njen vpliv na strukturo modela.

## 7 VIRI

Abebe, A. N., Ogden, L. F., Pradhan, R. N. 2010. Sensitivity and uncertainty analysis of the conceptual HBV rainfall–runoff model: Implications for parameter estimation. *Journal of Hydrology*. 389, 3-4: 301-310.

[doi:10.1016/j.jhydrol.2010.06.007](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.007)

Aghakouchak, A., Habib, E. 2010. Application of a Conceptual Hydrologic Model in Teaching Hydrologic Processes. *International Journal of Engineering Education*. 26, 4: 963-973.

ARSO. 2008.

[http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov\\_arhiv\\_tab.php?p\\_vodotok=Bolska](http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php?p_vodotok=Bolska) (Pridobljeno 4.7.2016).

Bergström, S. 1991. Principles and Confidence in Hydrological Modelling. *Nordic Hydrology*. 22, 2: 123-136.

Beven, K. 2001. How far can we go in distributed hydrological modelling? *Hydrology and Earth System Sciences*. 5, 1: 1-12.

Beven, K. J. 2009. *Environmental modelling: an uncertain future?* New York, Routledge: 310 str.

Bolska. 2007. Wikipedija.

<https://sl.wikipedia.org/wiki/Bolska> (Pridobljeno, 4.7.2016).

Brilly, M., Sapač, K., Vidmar, A., Globevnik, L., Kobold, M., Zabret, K., Koprivšek, M., Sečnik, M., Anzeljc, D. 2015. Analiza poplavnega dogodka maja 2014 v Bosni in Hercegovini za porečje reke Bosne. Inštitut za vode Republike Slovenije.

Crick, M. J., Hill, M. D. Charles, D. 1987. The Role of Sensitivity Analysis in Assessing Uncertainty. *Proceedings of an NEA Workshop on Uncertainty Analysis for Performance Assessments of Radioactive Waste Disposal Systems*, Paris, OECD. 19, 13: 1-258.

Da Silva, M. G., De Oliveira de Aguiar Netto, A., De Jesus Neves, R.J., Do Vasco, A.N., Alme Faccioli, G.G. 2015. Sensitivity analysis and calibration of hydrological modeling of the watershed Northeast Brazil. *Journal of Environmental Protection*. 6: 837-850.

Demaria, M. E., Nijssen, B., Wagener, T. 2007. Monte Carlo sensitivity analysis of land surface parameters using the Variable Infiltration Capacity model. *Journal of Geophysical research*. 112, D11.  
[doi: 10.1029/2006JD007534](https://doi.org/10.1029/2006JD007534)

ECAD. 2016.

[http://www.ecad.eu/utills/mapserver/eobs\\_maps.php](http://www.ecad.eu/utills/mapserver/eobs_maps.php) (Pridobljeno 5.7.2016).

Fazarinc, R. 2007. Neurje 18. septembra 2007 na območju Savinje. Mišičev vodarski dan 2007.

Gardner, R. H., Huff, D. D., O'Neill, R. V., Mankin, J. B., Carney, J., Jones, J. 1980. Application of error analysis to a marsh hydrology model. *Water Resources Research*. 16, 4: 659-664.

[doi: 10.1029/WR016i004p00659](https://doi.org/10.1029/WR016i004p00659)

Gayathri, K. D., Ganasri, B. P., Dwarakish, G. S. 2015. A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*. 4: 1001 – 1007.

[doi: 10.1016/j.aqpro.2015.02.126](https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126)

Grillakis, M. G., Tsanis, I. K., Koutroulis, A. G. 2010. Application of the HBV hydrological model in a flash flood case in Slovenia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 10, 12: 2713-2725.

[doi:10.5194/nhess-10-2713-2010](https://doi.org/10.5194/nhess-10-2713-2010)

Hamby, D. M. 1994. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environmental Monitoring and Assessment*. 32, 2: 135-154.

[doi:10.1007/BF00547132](https://doi.org/10.1007/BF00547132)

Jelen, A., Klemenčič, M., Popovič, E. 2015. Spodnja savinjska dolina: v toku idej in doživetij po dolini zelenega zlata. Društvo mladih geografov Slovenije. 18. geografski raziskovalni tabor 2014.

Knoben, W. J. M. 2013. Estimation of non-stationary hydrological model parameters for the Polish Wełna catchment. Thesis for the degree of Master of Science in Civil Engineering and Management. Netherland, University of Twente (self-publishing W. J. M., Knoben).

Kobold, M. 2009. Vpliv podnebnih sprememb na ekstremne hidrološke pojave. *Ujma*, številka 23.

Kobold, M., Brilly, M. 2006. The use of HBV model for flash flood forecasting. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 6, 3: 407-417.

[doi:10.5194/nhess-6-407-2006](https://doi.org/10.5194/nhess-6-407-2006)

Kobold, M., Sušelj, K., Polajnar, J., Pogačnik, N. 2008. Calibration techniques used for HBV hydrological model in Savinja catchment. *Conference abstracts*. Str.: 14.

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

Komac, B., Natek, K., Zorn, M. 2008. Geografski vidiki poplav v Sloveniji. Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU. *Geografija Slovenije* 20.

Kotar, A. 2013. Vpliv podnebnih sprememb na visoke pretoke Vipave. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Kotar).

Loucks, D. P., Van Beek, E. 2005. Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications. Italy, Unesco: 680 str.

Mein, R. G., Brown, B. M. 1978. Sensitivity of optimized parameters in watershed models. Water Resources Research. 14, 2: 299-303.

[doi: 10.1029/WR014i002p00299](https://doi.org/10.1029/WR014i002p00299)

McCuen, H. R. 1973. The Role of Sensitivity Analysis in Hydrologic Modeling. Journal of Hydrology. 18, 1: 37-53.

[doi: 10.1016/0022-1694\(73\)90024-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(73)90024-3)

McCuen, R.H., Snyder W.M. 1986. Hydrologic modeling: Statistical methods and applications. New Jersey, PRENTICE-HALL: 568 str.

Mishra, S. Uncertainty and sensitivity analysis techniques for hydrologic modeling. 2009. Journal of hydroinformatics. 11, 3-4: 282-298.

Moradkhani, H., Sorooshian, S. 2009. General Review of Rainfall-Runoff Modeling: Model Calibration, Data Assimilation, and Uncertainty Analysis. Hydrological Modelling and the Water Cycle. 63: 1–24.

[doi: 10.1007/978-3-540-77843-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-540-77843-1_1)

Natek, M. 1978. Poplavna območja v Spodnji Savinjski dolini. Geografski zbornik, 18, Ljubljana, str. 7-91.

Ouyang, S., Puhmann, H., Wang, S., von Wilpert, K., Sun, J. O. 2014. Parameter uncertainty and identifiability of a conceptual semi-distributed model to simulate hydrological processes in a small headwater catchment in Northwest China. Ecological Processes. 3, 14.

[doi: 10.1186/s13717-014-0014-9](https://doi.org/10.1186/s13717-014-0014-9)

Pechlivanidis, I. G., Jackson, B. M., McIntyre, N. R., Wheater, H. S. 2011. Catchment scale hydrological modelling: A review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in context of recent developments in technology and applications. Global NEST Journal. 13, 3: 193-214.

Primožič, M. 2007. Umerjanje HBV modela za porečje reke Save v Sloveniji. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Primožič).

Pugelj, A. 2012. Analiza visokovodnih valov Save v Šentjakobu. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Pugelj).

Refsgaard, C. J., Knudsen, J. 1996. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research*. 32, 7: 2189-2202.

[doi:10.1029/96WR00896](https://doi.org/10.1029/96WR00896)

Radinja, D. 1960. Kvarterni klastični sedimenti v Savinjski dolini. Elaborat. Ljubljana, Inštitut za geografijo SAZU, 42 str.

Seibert, J. 1997. Estimation of parameter uncertainty in the HBV model. *Nordic Hydrology*. 28, 4/5: 247-262.

Seibert, J., McDonnell, J. 2010. Land-cover impacts on streamflow: a change-detection modelling approach that incorporates parameter uncertainty. *Hydrological Sciences Journal*. 55, 3: 316-332.

Seibert, J., Vis, P. J. M. 2012. Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences*. 16, 9: 3315-3325.

[doi:10.5194/hess-16-3315-2012](https://doi.org/10.5194/hess-16-3315-2012)

Singh, V. P. 1995. *Computer Models of Watershed Hydrology*. Colorado, Water Resources Publications: 1130 str.

Song, X., in sod. 2015. Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. *Journal of Hydrology*. 523: 739-757.

[doi:10.1016/j.jhydrol.2015.02.013](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.013)

Sušnik, M., Robič, M., Pogačnik, N., Ulaga, F., Kobold, M., Lalić, B., Vodenik, B., Štajdohar, M. 2007. Visoke vode in poplave v septembru 2007. 18. Mišičev vodarski dan 2007. Zbornik referatov, VGP, Maribor, 10. december 2007.

Štrukelj, M. 2008. Poplave v Sloveniji 18.09.2007. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Štrukelj).

Tang, Y., Reed, P., Wagener, T., van Werkhoven, K. 2007. Comparing sensitivity analysis methods to advance lumped watershed model identification and evaluation. *Hydrology and Earth System Sciences*. 11, 2: 793-817.

[doi:10.5194/hess-11-793-2007](https://doi.org/10.5194/hess-11-793-2007)

Trenberth, E. K., Smith, L., Qian, T., Dar, A., Fasillo, J. 2007. Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model data. *Journal of Hydrometeorology*. 8: 758-769.  
[doi:10.1175/JHM600.1](https://doi.org/10.1175/JHM600.1)

Uhlenbrook, S., Seibert, J., Leibundgut, C., Rodhe, A. 1999. Prediction uncertainty of conceptual rainfall-runoff models caused by problems in identifying model parameters and structure. *Hydrological Sciences*. 44, 5: 779-797.

Van der Velde, M. 2009.

<https://mhvandervelde.wordpress.com/> (Pridobljeno 5.7.2016).

Vodna bilanca Slovenije 1971-2000. 2016.

[http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/vodna%20bilanca/vodna\\_bilanca.html](http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/vodna%20bilanca/vodna_bilanca.html) (Pridobljeno, 20.6.2016).

Visoke vode in poplave 18. septembra 2007. 2008.

<http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Visoke%20vode%20in%20poplave%2018.%20septembra%202007.pdf> (Pridobljeno 26.6.2016).

Xu, Chong-yu. 2002. Hydrologic models. Sweden, Uppsala University Department of Earth Sciences Hydrology: 168 str.

Zahrastnik, A. Značilnosti kanaliziranih vodotokov v spodnji savinjski dolini na primeru potoka Trnavica. Diplomski naloga. Maribor, Univerza v Mariboru, Filozofska fakulteta, oddelek za geografijo (samozaložba A. Zahrastnik).