

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/>

V zbirki je izvirna različica izdajatelja.

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

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 a publisher's version PDF file.

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

Stanjko, S. 2015. Izračun odtoka z manjšega porečja. Diplomaska naloga. = Calculation of the runoff from small catchment. Graduation Thesis. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 61 str. (mentorica: Šraj, M., somentor: Bezak, N.).

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/6178/>

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 PRVE STOPNJE  
VODARSTVO IN OKOLJSKO  
INŽENIRSTVO

Kandidat:

**SANDI STANJKO**

## IZRAČUN ODTOKA Z MANJŠEGA POREČJA

Diplomska naloga št.:

## CALCULATION OF THE RUNOFF FROM A SMALL CATCHMENT

Graduation thesis No.:

**Mentorica:**

doc. dr. Mojca Šraj

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Dušan Žagar

**Somentor:**

asist. dr. Nejc Bezak

**Član komisije:**

Ljubljana, \_\_\_\_\_

## **STRAN ZA POPRAVKE**

Strani z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

**IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani Sandi Stanjko izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom

**»Izračun odtoka z manjšega porečja«**

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka kot tiskana različica.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, \_\_\_\_\_ 2015

---

(Podpis)

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČKI**

<b>UDK:</b>	<b>556.1:556.51/.52(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Sandi Stanjko</b>
<b>Mentor:</b>	<b>doc. dr. Mojca Šraj</b>
<b>Somentor:</b>	<b>asist. Nejc Bezak</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Izračun odtoka z manjšega porečja</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>diplomska naloga – univerzitetni študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>61 str., 30 preg., 39 sl.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>Odtok, padavine, Velunja, Gaberke, SAGA-GIS, HEC-HMS, hidrološki model.</b>

### **Izvleček:**

Padavine so zelo kompleksen pojav, ki jih je relativno težko napovedati in modelirati. V veliki odvisnosti od padavin pa so tudi pretoki vodotokov. Zadnja leta smo priča številnim poplavam povsod po Sloveniji, ki so posledica velikih količin padavin, zato je za izračun odtoka potrebno uporabiti ustrezne hidrološke modele. V diplomski nalogi smo se osredotočili na hidrološko modeliranje z manjšega porečja v Sloveniji.

V prvem delu naloge smo predstavili osnovne pojme, ki so pomembni za razumevanje odtoka s porečja in metode za izračun vseh posameznih parametrov, potrebnih za izdelavo hidrološkega modela, od izračuna padavinskih izgub do hidrograma enote.

V praktičnem delu naloge smo prikazali primer priprave vseh potrebnih podatkov in modeliranje odtoka z zgornjega dela porečja Velunje. Model porečja smo naredili s pomočjo programa HEC-HMS, ki smo ga umerili in preverili s pomočjo merjenih podatkov ARSO. Uporabili smo podatke o merjenih pretokih z vodomerne postaje Gaberke in padavinah z najbližje padavinske postaje Šmartno pri Slovenj Gradcu.

**BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 556.1:556.51/.52(043.2)

**Author:** Sandi Stanjko

**Supervisor:** Assist. Mojca Šraj, Ph. D.

**Co-supervisor:** Assist. Nejc Bezak

**Title:** Calculation of the runoff from small catchment

**Document Type:** Graduation Thesis – University studies

**Scope and tools:** 61 p., 30 tab., 39 fig.

**Keywords:** Runoff, precipitation, Velunja, Gaberke, SAGA-GIS, HEC-HMS, hydrologic model

**Abstract:**

Precipitation is a very complex phenomenon, which is relatively difficult to predict and model. It also has a big influence on the flow rate of the catchment. In the past few years we are witnessing many floods all over Slovenia as a result of high precipitation rates, therefore appropriate hydrological models have to be selected in order to estimate the runoff from the investigated catchment. A small catchment that is located in Slovenia was modelled using different hydrological tools.

In the first part of the thesis we presented the basic concepts that are important for the understanding of the runoff and methods for calculating all individual parameters that are required for the determination of the hydrological model, e.g. calculation of the precipitation losses and unit hydrograph.

In the practical part of the thesis all the required steps were presented in order to construct a hydrological model of the upper part of the Velunja catchment and the input data was prepared.. The calibration and validation of the HEC-HMS model was conducted using the discharge data measured by the Slovenian Environment Agency (ARSO).. We used discharge data from the Gaberke station and the precipitation data from the Šmartno pri Slovenj Gradcu station.

## **ZAHVALA**

Za pomoč pri izdelavi diplomske naloge se zahvaljujem mentorci doc. dr. Mojci Šraj ter somentorju asistentu Nejcju Bezaku.

Zahvalil bi se tudi svojim staršema, ki sta me podpirala in spodbujala v času dosedanjega študija, ter vsem prijateljem, ki so mi pomagali v času mojega študija.

**KAZALO VSEBINE**

<b>1 UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1 CILJ DIPLOMSKE NALOGE .....	2
<b>2 METODE</b> .....	<b>3</b>
2.1 HIDROLOŠKI KROG.....	3
2.2 PADAVINE .....	3
2.2.1 Značilnost padavin .....	4
2.2.2 Merjenje padavin .....	5
2.2.3 Intenziteta padavin .....	6
2.2.4 ITP krivulje.....	6
2.2.5 Sintetične padavine z določeno povratno dobo.....	8
2.2.6 Odnos med padavinami in odtokom.....	8
2.3 Padavinske izgube .....	9
2.3.1 SCS model padavinskih izgub.....	10
2.4 HIDROGRAM ODTOKA .....	14
2.4.1 Površinski odtok .....	15
2.4.2 Bazni odtok.....	16
2.5 ČASOVNI PARAMETRI .....	17
2.5.1 ČAS ZAKASNITVE (Tp) .....	17
2.5.2 Čas koncentracije (Tc).....	17
2.6 SINETIČNI HIDROGRAM ENOTE .....	19
2.6.1 Snyderjev HE .....	19
2.6.1.1 Metoda Tulsa District .....	20
2.6.1.2 Metoda Denver .....	21
2.6.1.3 Metoda Riverside County .....	22
2.6.1.4 Eaglesonova metoda .....	22
2.6.1.5 Putnamova metoda.....	23
2.6.1.6 Taylor-Schwartzeva metoda .....	23
2.6.1.7 Metoda Colorado State University.....	24
2.6.2 SCS HE .....	24
2.6.3 Clarkov HE.....	25
2.6.3.1 Kerby-jeva metoda.....	26
2.6.3.2 Kirpich-ova metoda .....	26
2.6.3.3 Overton-Meadowsova metoda .....	27
2.6.3.4 SCS TR-55 metoda .....	27
2.6.3.5 Ramserjeva metoda.....	28
2.7 PROGRAMSKO ORODJE HEC-HMS .....	29
2.8 Programsko orodje SAGA-GIS .....	29



<b>3 PODATKI.....</b>	<b>30</b>
3.1 OPIS OBRAVNAVANEGA OBMOČJA VODOTOKA VELUNJE .....	30
3.1.1 Topografske karakteristike porečja Velunje .....	31
3.1.2 Raba tal .....	32
3.1.3 Geologija.....	34
3.1.4 Opis obstoječega stanja na terenu .....	35
3.1.5 Padavinski podatki .....	36
3.1.6 Podatki o pretokih .....	38
<b>4 REZULTATI .....</b>	<b>42</b>
4.1 IZRAČUN PARAMETROV KOEFICIENTA CN IN IA .....	42
4.2 Izračun parametrov sintetičnega hidrograma enote .....	42
4.2.1 Izračun časa koncentracije.....	42
4.2.2 Izračun časa koncentracije (Tc).....	44
4.3 HIDROLOŠKI MODEL POREČJA VELUNJE .....	45
4.3.1 Vhodni podatki.....	45
4.3.2 Umerjanje modela.....	46
4.3.2.1 Dogodek 4. 5. do 5. 5. 2013.....	46
4.3.2.2 Dogodek 18. 7. do 19.7. 2011.....	47
4.3.2.3 Dogodek 04. 11. do 06.11. 2012.....	48
4.3.3 Validacija modela .....	48
4.3.3.1 Dogodek 15. 6. do 16. 6. 2010.....	48
4.3.3.2 Dogodek 11. 7. do 12. 7. 2012.....	49
4.3.3.3 Dogodek 22. 8. do 23. 8. 2009.....	50
4.4 IZRAČUN PROJEKTNIH PRETOKOV .....	51
4.4.1 Verjetnostna analiza .....	51
4.4.2 Modelsko določanje projektnih pretokov.....	52
<b>5 ANALIZA .....</b>	<b>55</b>
5.1 ANALIZA REZULTATOV HEC-HMS ZA UMERJANJE MODELA .....	55
5.2 ANALIZA REZULTATOV HEC-HMS ZA VALIDACIJO MODELA .....	56
5.3 PRIMERJAVA REZULTATOV PROJEKTNIH PRETOKOV .....	57
<b>6 ZAKLJUČKI.....</b>	<b>58</b>
<b>VIRI.....</b>	<b>59</b>

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Klasifikacija zemljin po SCS (Brilly, 1993; Brilly in Šraj, 2006).....	12
Preglednica 2: Koeficienti CN za kmetijska zemljišča (USACE, 2000).....	12
Preglednica 3: Podatki o vodotoku Velunja, pridobljeni s programom SAGA-GIS.....	32
Preglednica 4: Tipi rabe tal prispevnega območja Velunje.....	33
Preglednica 5: Deleži pokrovnosti tal prispevnega območja Velunje.....	33
Preglednica 6: Povratne dobe za obdobje 1970 – 2012 za postajo Šmartno pri Slovenj Gradcu (ARSO, 2015c).....	37
Preglednica 7: Vrednosti CN za različne tipe pokrovnosti tal in odtočni potencial zemljine ter..... posamezni deleži rabe tal za porečje Velunje.....	42
Preglednica 8: Vrednosti parametrov padavinskih izgub po SCS-metodi za porečje Velunje.....	42
Preglednica 9: Časi zakasnitve, izračunani z različnimi metodami.....	43
Preglednica 10: Omejitve za izračun časa zakasnitve po metodi Tulsa District.....	44
Preglednica 11: Omejitve za izračun časa zakasnitve po metodi Riverside County.....	44
Preglednica 12: Omejitve za izračun časa zakasnitve po metodi Putnam.....	44
Preglednica 13: Časi koncentracije, izračuni po posameznih metodah.....	45
Preglednica 14: Končni čas koncentracij za različne kombinacije metod.....	45
Preglednica 15: Začetni vhodni podatki za hidrološki model Velunje do Gaberk.....	46
Preglednica 16: : Podatki in rezultati umerjanja za padavinski dogodek 04/ 05. 5. 2013.....	46
Preglednica 17: Podatki in rezultati umerjanja za padavinski dogodek 18/ 19.7.2011.....	47
Preglednica 18: Podatki in rezultati umerjanja za padavinski dogodek 04/ 6.11.2012.....	48
Preglednica 19: Vhodni podatki za validacijo modela za padavinski dogodek 15/ 16. 6.2010.....	49
Preglednica 20: Vhodni podatki modela za padavinski dogodek 11/ 12. 7.2012.....	49
Preglednica 21: Vhodni podatki za padavinski dogodek 22/ 23. 8. 2009.....	50
Preglednica 22: Rezultati verjetnostne analize maksimalnih dnevnih letnih pretokov Velunje v..... Gaberkah v obdobju 1986 – 2012.....	52
Preglednica 23: Vhodni podatki za HEC-HMS za izračun visokovodnih valov.....	53
Preglednica 24: Prikaz rezultatov umerjanja modela za porečje Velunje.....	55
Preglednica 25: Prikaz podatkov merjenih dogodkov za porečje Velunje.....	55
Preglednica 26: Odstopanja rezultatov modela in meritev.....	55
Preglednica 27: Prikaz rezultatov validacije modela za porečje Velunje.....	56
Preglednica 28: Prikaz podatkov merjenih dogodkov za porečje Velunje.....	56
Preglednica 29: Odstopanja rezultatov modela in meritev.....	56
Preglednica 30: Projektni pretoki za 10- in 100-letno povratno dobo.....	57

## KAZALO SLIK

Slika 1: Shematični prikaz hidrološkega kroga (Lutra, 2015).....	3
Slika 2: Histogram padavin.....	5
Slika 3: Instrumenti za merjenje padavin: a) totalizator, b) avtomatski dežemer (Brilly in Šraj, 2006) ..	5
Slika 4: Vpliv intenzitete padavin na hidrogram (Golob,2012) .....	6
Slika 5: Prikaz ITP krivulj v dvojnem logaritemskem merilu za različne povratne dobe.....	7
(Goranc, 2012) .....	7
Slika 6: Grafična predstavitev parametra CN za določitev odtoka v odvisnosti od.....	11
padavin (Brill in Šraj 2006).....	11
Slika 7: Osnovne lastnosti histograma odtoka (Brilly in Šraj, 2006) .....	14
Slika 8: Posamezni deli odtoka(Brilly in Šraj, 2006) .....	15
Slika 9: Ekvivalentna debelina vodne plasti (Šraj, 2014) .....	15
Slika 10: Tro točkovna metoda določanja baznega odtoka (Brilly in Šraj, 2006).....	16
Slika 11: Vpliv oblike povodja na čas koncentracije(Brilly in Šraj, 2006).....	18
Slika 12:Lokacija Velunje na zemljevidu Slovenije (Zemljevid, 2015) .....	30
Slika 13: Karta Šaleške doline (Geopedia, 2015a).....	31
Slika 14: DMR Velunje od izvira do postaje Gaberke .....	32
Slika 15: Raba tal CLC za porečje Velunje.....	33
Slika 16: Geološka karta obravnavanega območja (Geopedia, 2015).....	34
Slika 17: Hidrogeološka karta obravnavanega območja (Geopedia, 2015) .....	34
Slika 18: a) 300 metrov dolvodno od izvira b) Vegetacija v strugi vodotoka in okolici Velunje (foto:....	
Stanjko, 2015) .....	35
Slika 19: a) Srednje del toka vodotoka Velunje, b) Talni prag (foto: Stanjko, 2015).....	35
Slika 20: Vodomerna postaja Gaberke (foto: Stanjko, 2015) .....	36
Slika 21: Meteorološke postaje s podatki o ekstremnih padavinah (ARSO, 2015c).....	37
Slika 22: ITP krivulja za obdobje 1970-2012 postajo Šmartno pri Slovenj Gradcu .....	38
Slika 23: Povprečna letna višina korigiranih padavin na obravnavanem območju (ARSO, 2015c).....	38
Slika 24:Avtomatska vodomerna postaja Gaberke (foto: Stanjko, 2015) .....	39
Slika 25: Vodomerna letev z označbami najvišje izmerjene gladine (foto: Stanjko, 2015).....	40
Slika 26: Minimalni pretoki za obdobje 1986-2013 na vodomerni postaji Gaberke.....	40
Slika 27: Maksimalni pretoki za obdobje 1986-2013 na vodomerni postaji Gaberke .....	41
Slika 28: Primerjava časa zakasnitve (prikazano na y-osi) v urah po različnih metodah .....	43
Slika 29: Umerjen model za padavinski dogodek 04/ 05. 5. 2013 .....	47
Slika 30: Umerjen model za padavinski dogodek 18/ 19. 7. 2011 .....	47
Slika 31: Umerjen model za padavinski dogodek 04/ 06. 11. 2012 .....	48
Slika 32: Validacija modela za padavinski dogodek 15/ 16. 6.2010.....	49
Slika 33: Validacija modela za padavinski dogodek 11/ 12. 7.2012.....	50
Slika 34: Validacija modela za padavinski dogodek 22/ 23. 8. 2009.....	50
Slika 35: Maximalni letni pretoki na vodomerni postaji Gaberke za vodotok Velunje .....	51

---

Slika 36: Rezultat verjetnostne analize pretokov Velunje na vodomerni postaji Gaberke s petimi ..... različnimi porazdelitvami .....	52
Slika 37: Povratne dobe za ekstremer padavin na postaji Šmartno pri Slovenj Gradcu .....	53
Slika 38: Visokovodni val z 10-letno povratno dobo padavin .....	54
Slika 39: Visokovodni val z 100-letno povratno dobo padavin .....	54

## 1 UVOD

Hidrologija je veda, ki preučuje kroženje vode v naravi, njene pojavne oblike, porazdelitev v naravnem, okolju, gibanje in lastnosti. Njena glavna naloga je preučevanje kroženja vode v naravi in preučevanje njenih lastnosti. Eden od najpomembnejših delov hidrološkega kroga so padavine, kjer s tem pojmom označujemo vso vodo, ki pade na zemeljska tla, ne glede na obliko. Padavine lahko padejo v obliki: sneg, rosenje, toča, sodra, ipd (Brilly in Šraj, 2005).

Drugi pomembni člen hidrološkega kroga je površinski odtok, ki predstavlja del padavin, ki ne izhlapijo in se ne zadržijo na vegetaciji ali v lokalnih depresijah, temveč površinsko odtečejo. Površinski odtok nastane zaradi padavinskega dogodka na obravnavanem območju oziroma porečju. Količina odtoka je odvisna od več dejavnikov kot so izhlapevanje, pokrovnost tal, velikost porečja, naklon terena, sposobnost infiltracije in zasičenosti tal ipd (Brilly in Šraj, 2005).

Za izračun površinskega odtoka se v praksi pogosto uporabljajo hidrološki modeli, s katerimi transformiramo efektivne padavine v površinski odtok. V osnovi jih delimo na empirične in konceptualne. Z empiričnimi modeli poskušamo oceniti povezavo med površinskim odtokom in efektivnimi padavinami vendar ne opazujemo notranjih procesov. Med empirične modele spadajo vsi hidrogrami enote. Konceptualni modeli modelirajo hidrološke procese z uporabo določenih poenostavitev ter konceptualnega razumevanja kompleksnega površja Zemlje. Tako npr. različne podpovršinske dele, kjer se shranjuje voda (npr. podtalnica) modeliramo z uporabo t.i. »veder« (ang. bucket).

V prvem delu naloge smo predstavili teoretično ozadje, poudarek smo dali padavinam in padavinskim izgubam, ki so za konico visokovodnih valov zelo pomembne. Odločili smo se za uporabo metode SCS. Metoda SCS je preprosta metoda in je odvisna samo od parametra CN, ki predstavlja odtočni koeficient in je funkcija štirih glavnih lastnosti porečja – tipa zemljine, pokrovnosti tal, predhodne vlažnosti zemljine in hidroloških pogojev (Dirnbek, 2008). Pomembni parametri za izračun so še bazni odtok, čas

koncentracije in čas do konice pretoka. V nadaljevanju teorije smo predstavili različne metode, za izračun časa koncentracije in časa pojava konice pretoka.

V praktičnem delu naloge smo prikazali izračun vseh potrebnih parametrov za izdelavo hidrološkega modela na primeru zgornjega dela porečja Velunje. Za izračun koeficienta CN smo uporabili podatke o rabi tal, ki smo jih določili s pomočjo programskega orodja SAGA-GIS in evropske karte pokrovnosti tal CLC Corine (Geoportal ARSO, 2015). Pripravili smo tudi vse potrebne podatke za izdelavo sintetičnega hidrograma enote. Ko smo pripravili vse podatke, smo izdelali hidrološki model. Model smo umerili in validirali z uporabo podatkov z vodomerne postaje Gaberke na vodotoku Velunja. Izračunali smo tudi odtok s povirja Velunje za različne izbrane povratne dobe.

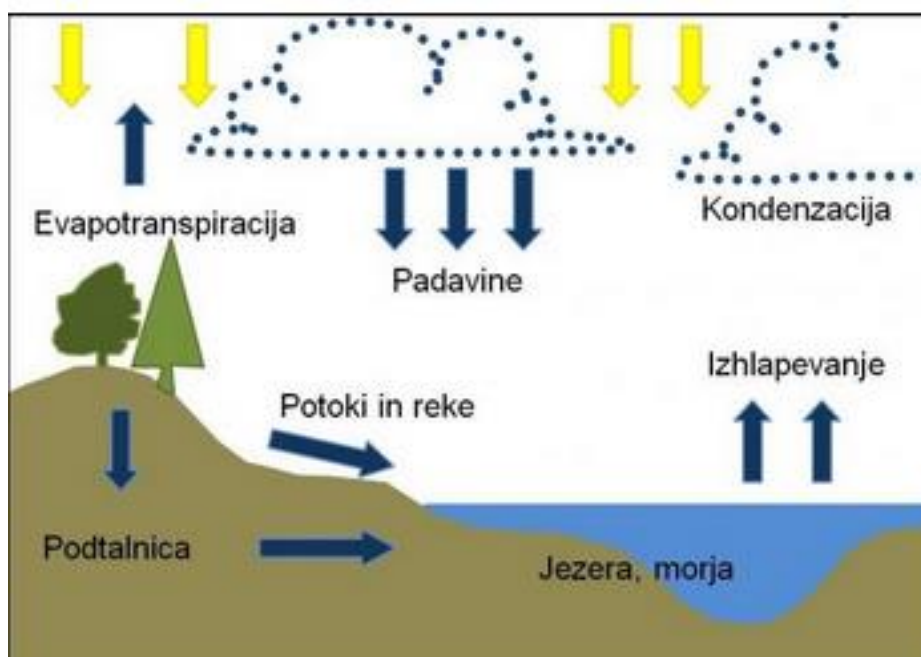
### **1.1 Cilj diplomske naloge**

Cilj diplomske naloge je določiti odtok z manjšega porečja. Dimenzioniranje različnih hidrotehničnih objektov, upravljanje z vodami, načrtovanje, ipd., zahteva poznavanje konic visokovodnih valov. Določanje odtoka glede na padavinske dogodke z določeno povratno dobo v praksi uporabljamo pri načrtovanju različnih hidrotehničnih objektov, kot so npr. visokovodni zadrževalniki. V diplomski nalogi smo želeli predstaviti postopek izračuna odtoka na primeru povirja Velunje, ter pripravo vseh potrebnih podatkov o lastnostih porečja, ki so potrebni za izdelavo hidrološkega modela s programom HEC-HMS. V ta namen smo se seznanili tudi z GIS orodji in metodami analiziranja podatkov. Hidrološki model smo nato umerili z merjenimi padavinskimi dogodki in merjenimi pretoki, ki so bili izmerjeni v okviru državnega hidrološkega in meteorološkega monitoringa, ki ga izvaja Agencija RS za okolje (ARSO, 2015).

## 2 METODE

### 2.1 Hidrološki krog

Hidrološki krog je kompleksno zaporedje procesov kroženja vode v naravi (slika 1). Hidrološki krog je lahko za Zemljo obravnavan kot zaprt sistem, ker je celotna količina vode v krogu konstantna. Pod določenimi pogoji in predpostavkami lahko natančno določimo vpliv karakteristik prispevnega območja na padavine, infiltracijo in evapotranspiracijo. Celotna prispevna površina je neprekinjena površina, s katere se vse površinske vode stekajo v vodno telo in vplivajo na njegovo stanje (Bedient et al. 2008).



Slika 1: Shematični prikaz hidrološkega kroga (Lutra, 2015)

### 2.2 Padavine

S pojmom padavine zajamemo in opišemo vso vodo, ki pade na površino zemlje: dež, sneg, rosenje, toča, sodra ipd. Oblika, v kateri prispejo padavine do zemeljskega površja, pa je odvisno od temperature v plasteh zraka, skozi katere voda potuje. Padavine niso le voda, ki pada in nastaja visoko v atmosferi, ampak so vse oblike vodne pare v zemeljskem ozračju in tudi na njenem površju med nje spada tudi megla. Padavine so del hidrološkega kroga, ki je razdeljen na štiri večje faze (Golob, 2012):

- padavine,
- evapotranspiracija,
- vodni tok,
- podtalna voda.

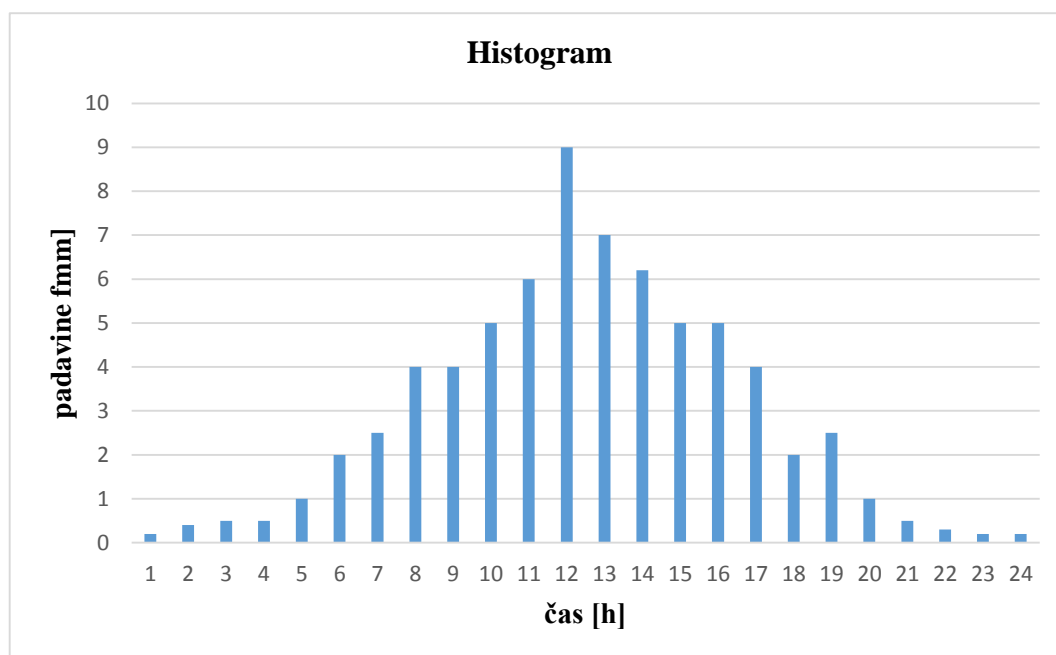
Prvi dve fazi preučuje predvsem meteorologija, medtem ko sta vodni tok in podtalna voda pomembni za odtok in sta v veliki odvisnosti od prvih dveh (Gray, 1973). Za večino raziskav in analiz v povezavi z vodo, sušo in namakanjem so padavine osnovni podatek. Za merjenje padavin oziroma padavinskega vzorca uporabljamo različne inštrumente, ki jih v osnovi delimo na ročne in avtomatske merilne naprave. Če hočemo vzorce kontrolirati in merske napake izključiti, je priporočljivo merjenje na obeh vrstah instrumentov (Kozakiv, 2013).

### **2.2.1 Značilnost padavin**

Značilnost padavin je, da so po prostoru zelo neenakomerno razporejene. Na njihovo količino vplivajo predvsem bližina morja, geografska širina, relief in pa tudi vpliv urbanizacije, kot na primer velika mesta (Brilly in Šraj, 2005).

Časovno razporeditev padavin prikazujemo s histogramom (slika 2). V praksi histogram dobimo z meritvami, ki se izvajajo na padavinskih postajah, določi pa se ga lahko tudi s simulacijami z računalniškimi programi na podlagi dobljenih verjetnostnih analiz podatkov o padavinah za daljša obdobja. V tem primeru govorimo o sintetičnih histogramih padavin. Pri uporabi histogramov uporabljamo tudi dve predpostavki, in sicer, da so padavine razporejene enakomerno znotraj časovnega intervala in, da so enakomerno razporejene po celotni prispevni površini (Brilly in Šraj, 2005).





Slika 2: Histogram padavin

### 2.2.2 Merjenje padavin

Padavine merimo z različnimi instrumenti: ombrometri, ombrografi, totalizatorji, disdrometri in z meteorološkimi radarji (slika 3). Višina ali količina padavin pa se nato odčita ročno ali avtomatsko (Brilly in Šraj, 2005).

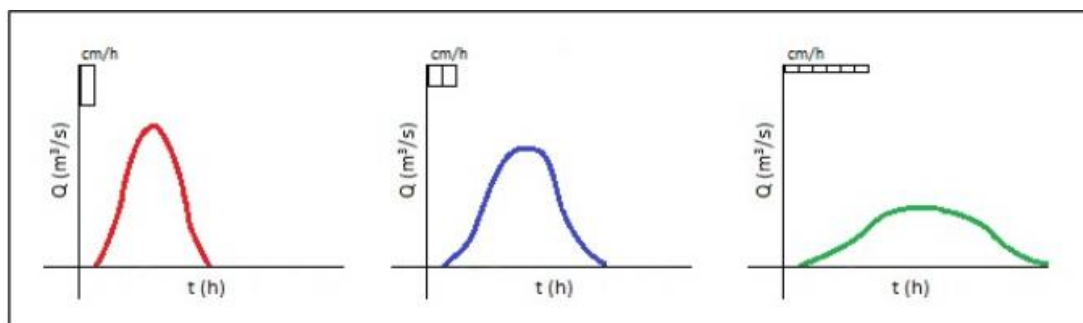


Slika 3: Instrumenti za merjenje padavin: a) totalizator, b) avtomatski dežemer (Brilly in Šraj, 2006)

### 2.2.3 Intenziteta padavin

Intenziteta padavin ima zelo velik vpliv na površinski odtok in padavinski dogodki, za katere je značilna velika intenziteta, lahko povzročijo hiter odtok padle vode s porečja, ki lahko v ekstremnih primerih privede do poplav. Večja intenziteta padavin pomeni povečan volumen v istem časovnem obdobju, tako je površinski odtok časovno krajši, vendar se zato lahko konica močno poveča in povzroči poplavljanje. Pri manj prepustnih tleh je značilen tudi pojav zablatenja zgornje tanke plasti zemljine (Shaw, 1994).

Na sliki 4, lahko vidimo lep primer, kako intenziteta padavin v odvisnosti od časa vpliva na konico in trajanje odtoka. Količina efektivnih padavin je pri vseh treh enaka, spreminja se samo trajanje padavin. Prvi dogodek je tako trajal 1 uro, drugi 2 in tretji 6 ur. Ker je količina padavin v vseh treh primerih enaka je tudi celoten volumen vode ki odteče enak. Spreminja se samo konica vala in njegova oblika (trajanje).



Slika 4: Vpliv intenzitete padavin na hidrogram (Golob,2012)

### 2.2.4 ITP krivulje

ITP razmerje lahko zapišemo kot matematično razmerje med intenziteto  $i$ , trajanjem  $d$  in povratno dobo  $T$  (Minh Nhat in sod., 2006):

$$i = f(T, d) \tag{1}$$

kjer je:

- $i$  intenziteta padavin [mm/h],
- $d$  trajanje padavin [min],
- $T$  povratna doba [leta].

Ker se v angleškem jeziku povezuje med intenziteto, trajanjem in povratno dobo imenuje »intensity-duration-frequency« poznamo okrajšavo ITP tudi kot IDF (intensity–duration–frequency). ITP ponazarja padavinski vzorec na izbranem območju kot razmerje med intenziteto  $i$  in trajanjem padavin  $d$  z določeno povratno dobo. Različne povratne dobe večinoma prikažemo kar na istem enem grafu (slika 5).

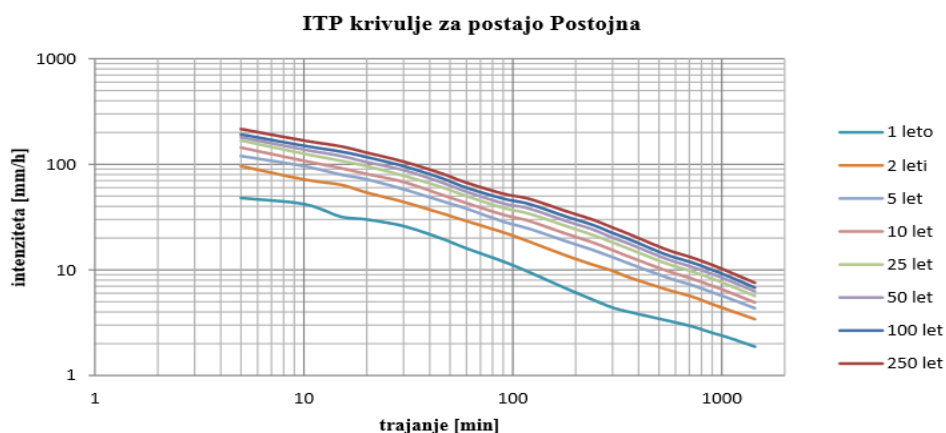
Povratna doba dogodka je povprečno obdobje let med padavinami z izbrano intenziteto in padavinami večje ali enake intenzitete (Mikos in sod., 2003). V hidrologiji pogosto uporabljamo namesto porazdelitvene funkcije  $F_x(x)$  zvezo  $1/(1 - F_x(x))$  ali povratno dobo  $T$  (Brilly in Šraj, 2015):

$$T(x) = \frac{1}{1 - F_x(x)} \quad (2)$$

pri čemer je:

$T(x)$	povratna doba
$F(x)$	porazdelitvena funkcija

Za primer vzemimo ITP krivuljo z 10-letno povratno dobo. Krivulja nam pove, da je 10 % verjetnosti, da se bo dogodek zgodil ali bil presežen v nekem letu oziroma v našem primeru, da bo dosežena ali presežena določena intenziteta padavin. V daljšem obdobju to pomeni, da se bo določena intenziteta padavin zgodila v povprečju enkrat v 10 letih oziroma desetkrat v 100 letih (Brilly in Šraj, 2005).



Slika 5: Prikaz ITP krivulj v dvojnem logaritemskem merilu za različne povratne dobe (Goranc, 2012)

Da podatke z ITP krivulje lažje odčitamo jo je najbolje prikazati na dvojni logaritemski skali, kjer se njihov izgled nekoliko spremeni, in sicer v ravne vzporedne črte kar je primernejše za odčitavanje (slika 5) (Goranc, 2012).

Za razumevanje ITP krivulj je pomembno, da se zavedamo, da ne izhajajo iz določene nevihte in ne prikazujejo verjetnosti dogodka točno določene nevihte, temveč verjetnost intenzitete na podlagi statistične obdelave velikega števila podatkov o padavinah. Ob tem pa je potrebno določiti še določene spremenljivke, ki so vezane na lokalne in meteorološke pogoje (Goranc, 2012).

### **2.2.5 Sintetične padavine z določeno povratno dobo**

Metoda za določanje sintetičnih histogramov padavin (USACE, 2000) je vgrajena tudi v hidrološki model HEC-HMS. Določitev sintetičnih padavin poteka s pomočjo standardnega postopka, kjer moramo najprej določiti povratno dobo naliva, ki ga želimo simulirati. Povratna doba je v mejah med 1 in 500 let in pomeni povprečno verjetnost za naliv z določenim trajanjem in intenziteto. Nalivi, lahko trajajo od 5 minut do 10 dni. Poleg trajanja in povratne dobe naliva moramo poznati tudi vsoto padavin vsakega delnega naliva, ki ima trajanje krajše od izbranega.

Program HEC-HMS na podlagi vnesenih podatkov in s pomočjo linearne interpolacije logaritemskih vrednosti debelin vodne plasti in trajanja tvori histogram tako, da je njegova največja vrednost na sredini trajanja naliva, naslednja vrednost je pred maksimumom, tretja sledi maksimumu, četrta je pred drugo največjo itd. (Brilly in Šraj, 2005).

### **2.2.6 Odnos med padavinami in odtokom**

Odnos med padavinami in odtokom je definiran s hidrološkim krogom kot je prikazano na sliki 1. Proces odтока se začne s padavinami, ki lahko padejo na vegetacijo, na tla ali neposredno na druga vodna telesa. V naravnih hidroloških sistemih se lahko velik del padavin, ki dosežejo površje tal, vrne v atmosfero z evaporacijo in transpiracijo, ki sta med padavinskimi dogodki omejeni. Del padavin pa lahko pronica v tla, kjer je voda začasno shranjena v zgornjih, deloma zasičenih plasteh tal. Od tu se voda lahko vrača na

površje zaradi kapilarnosti ali pa odteka pod površjem v drugo vodno telo ali pa pronica do podtalnice. Voda, ki se ne infiltrira, odteče po površju v vodotok (Brilly in Šraj, 2005).

### **2.3 Padavinske izgube**

Padavine, ki so bile delno prestrežene ali so se infiltrirale na površini ter ne prispevajo k površinskemu odtoku, lahko imenujemo tudi padavinske izgube. Padavine, ki prispevajo k površinskemu odtoku imenujemo učinkovite ali neto padavine. Padavinske izgube so sestavljene iz padavin, ki so se infiltrirale v zemljinu, so ostale na površinah cest ali streh in preprosto niso mogle površinsko ali podpovršinsko odteči in tistih padavin, ki so ostale na listih dreves in na drugih vrstah vegetacije.

Za račun padavinskih izgub uporablja program HEC-HMS naslednje metode (Dirnbek in Šraj, 2010):

- Model začetnih in enakomernih izgub,
- Model deficita in enakomernih izgub,
- Model SCS,
- Model Green–a in Ampt–a,
- Model stalnega računa vlažnosti zemljine(SMA),
- Mrežasti model deficita in enakomernih izgub,
- Mrežasti model stalnega računa vlažnosti zemljine,
- Eksponentno metodo,
- Smith – Paralagenov model.

Z zgoraj naštetimi metodami izračunamo izgube padavin za vsak časovni interval posebej. Izgube se nanašajo na višino padavin v določenem časovnem obdobju. Preostale padavine pa imenujemo učinkovite padavine, saj predstavljajo površinski odtok in so enakomerno porazdeljene po porečju in predstavljajo površinski odtok (Brilly in Šraj, 2006).

Kritična koraka pri modeliranju sta metodi za račun izgub in ocena parametrov, saj se vse metode računa izgub ne morejo uporabiti z vsemi metodami transformacij padavin v odtok (Brilly in Šraj, 2006).

Začetne izgube  $I_a$  predstavljajo prestrezanje in skladiščenje vode na začetku padavinskega dogodka. Prestrezanje je posledica absorpcije padavin na vegetaciji, skladiščenje pa posledica topografije porečja. Voda, ki se skladišči v depresijah, se nato infiltrira v tla oziroma izhlapi v atmosfero (Brilly in Šraj, 2006).

### 2.3.1 SCS model padavinskih izgub

The Soil Conservation Service (SCS) oz. ameriška agencija ministrstva za kmetijstvo je s pomočjo poskusov izdelala klasifikacijo različnih vrst zemljine glede na njihovo prepustnost. S koeficientom CN so opisane zemljine, ki zajema vplive pedologije, rabe tal in predhodne vlažnosti zemljine. Koeficient  $I_a$  opisuje izgube na površini porečja, preden pride do infiltracije vode v zemljino (Brilly in Šraj, 2006).

$$Pe = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S} \quad (3)$$

kjer je:

- $Pe$  akumulirane efektivne padavine v času  $t$  [mm],
- $P$  višina padavin v času  $t$  [mm],
- $I_a$  začetne izgube [mm],
- $S$  maksimalno potencialno zadrževanje (retenzija – mera za sposobnost porečja odvzeti in zadržati padavine) [mm].

S pomočjo poizkusov in analiz za manjša eksperimentalna porečja je SCS razvil empirično zvezo med  $I_a$  in  $S$  (Brilly in Šraj, 2006):

$$I_a = 0.2 \quad (4)$$

Kumulativne efektivne padavine v času  $t$  lahko zapišemo kot (Brilly in Šraj, 2006):

$$Pe = \frac{(P-2 \cdot S)^2}{P+0.8 \cdot S} \quad (5)$$

Maksimalno zadrževanje  $S$  in karakteristike povodja porečja so povezani s parametrom CN (Brilly in Šraj, 2006):

$$S = \frac{25400 - 254 \cdot CN}{CN} \quad (6)$$

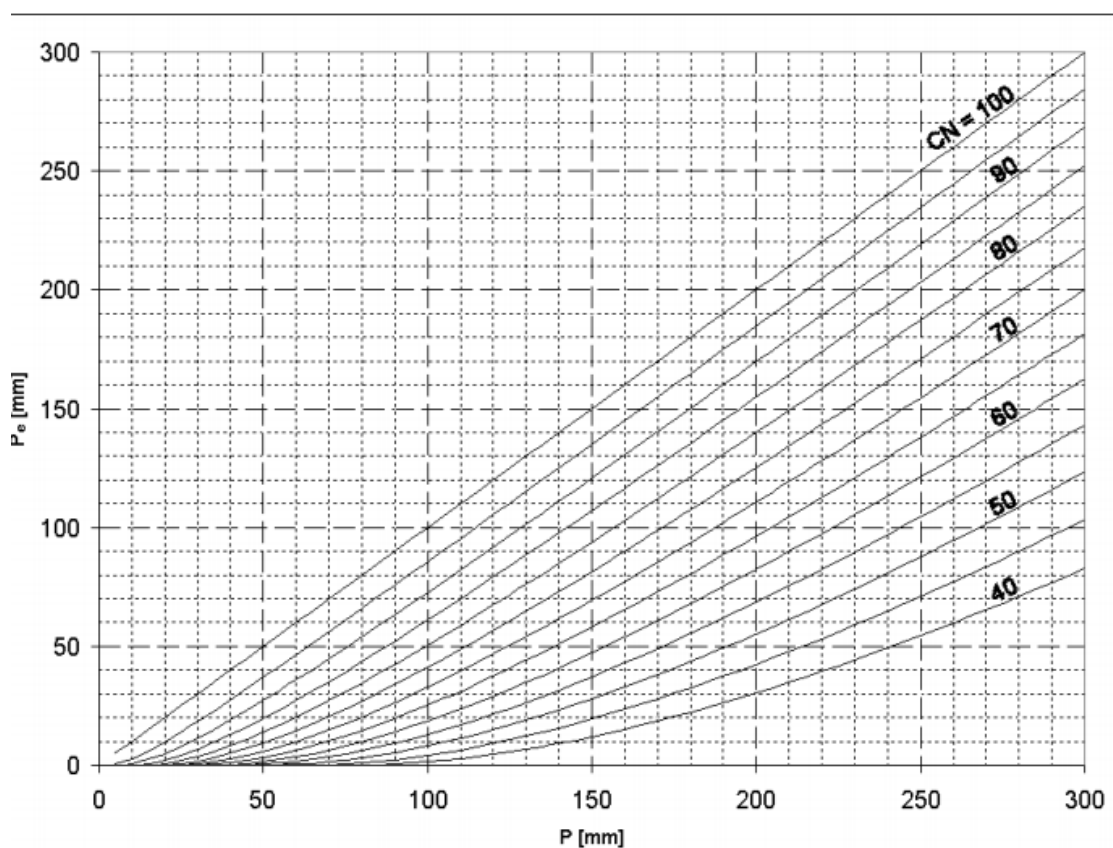
CN izračunamo po naslednji enačbi (Brilly in Šraj, 2006):

$$CN_{skupen} = \frac{\sum A_i * CN_i}{\sum A_i} \quad (7)$$

$CN_{skp}$  enoten skupen CN za račun odtoka,

$CN_i$  CN posameznega dela podporečja,

$A_i$  površina pripadajočega podporečja.



Slika 6: Grafična predstavitev parametra CN za določitev odtoka v odvisnosti od padavin (Brill in Šraj 2006)

Koeficient CN je bil najprej razvit kot orodje za oceno transformacije padavin v odtok za kmetijska območja v Združenih državah Amerike, sedaj pa se metoda, predvsem zaradi svoje popularnosti in

enostavnosti, uporablja povsod po svetu. Koeficient CN je brezdimenzijski koeficient, ki predstavlja odtočne razmere s posameznih površin in je tudi vhodni parameter metode SCS za izračun padavinskih izgub. Njegove teoretične možne meje so od med 0 in 100 ter uporabne ocenjene vrednosti običajno med 48 in 98. S koeficient CN lahko opišemo lastnosti zemljine in vpliv pedologije, rabe tal ter predhodno vlažnosti zemljine. Za izračun izgub je potrebno v program HEC – HMS podati vrednosti *CN* in *Ia* za vsako posamezno podporečje. (Sovre, 2009)

Preglednica 1: Klasifikacija zemljin po SCS (Brilly, 1993; Brilly in Šraj, 2006)

Skupina zemljine	opis	Stopnja izgub (mm/hr)
A	Nizek odtočni potencial. Zemljina ima tudi, če je nasičena, visoko stopnjo infiltracije. Globoke, dobro drenirane zemljine z zmerno teksturo (pesek, globoka rečna naplavina)	7.5 – 11.5
B	Povprečni do nizek odtočni potencial. Zemljina ima, če je nasičena, povprečno stopnjo infiltracije vode. Plitve rečne naplavine, peščena ilovica z zmerno prepustnostjo.	3.85 – 7.5
C	Visok do zmeren odtočni potencial. Zemljina ima, če je nasičena, nizko stopnjo infiltracije vode. Glinena ilovica, plitva peščena ilovica, zemljine z nizko vsebnostjo organskih snovi in zemljine z običajno visoko vsebnostjo gline	1.3 – 3.85
D	Visok odtočni potencial. Zemljina ima, če je nasičena, zelo nizko stopnjo infiltracije vode. Zemljine z visoko gladino talne vode, z glinastim slojem ali neprepustnim slojem na površini ali tik pod površino, zaslanjena zemljišča ipd. Zemljine imajo zelo nizko stopnjo prepustnosti.	0.00 – 1.3

Preglednica 2: Koeficienti CN za kmetijska zemljišča (USACE, 2000)

Raba tal	Hidrol. pogoji				
		A	B	C	D
Pašnik, prerija	slabi	68	79	86	89
	povprečni	49	69	79	84
	dobri	39	61	74	80
Travnik, košen	-	30	58	71	78
Grmičevje	slabi	48	67	77	83
	povprečni	35	56	70	77
	dobri	30	48	65	73

se nadaljuje...



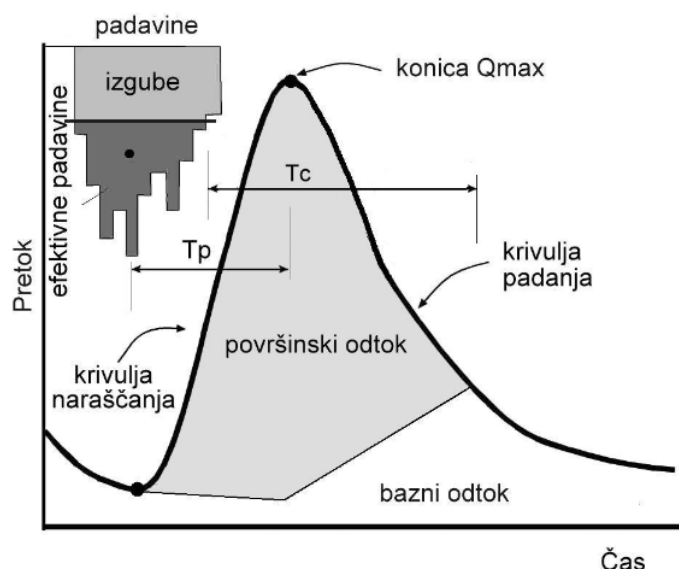
...nadaljevanje preglednice 2

Gozd v kombinaciji s travo (plantaje, sadovnjaki)	slabi	57	73	82	86
	povprečni	43	65	76	82
	dobri	32	58	72	79
Gozd	slabi	45	66	77	83
	povprečni	36	60	73	79
	dobri	30	55	70	77
Kmetija s poslopjem, podeželsko cesto in okoliškimi parcelami	-	59	74	82	86
<b>Ledina, neobdelan svet</b>					
gola zemljina	-	77	86	91	94
delno poraščena zemljina (ostanki posevkov)	slabi	76	85	90	93
	dobri	74	83	88	90
<b>Poljščine v vrsti</b>					
v ravni vrsti	slabi	72	81	88	91
	dobri	67	78	85	89
v ravni vrsti, delna poraščenost	slabi	71	80	87	90
	dobri	64	75	82	85
po plastnicah	slabi	70	79	84	88
	dobri	65	75	82	86
po plastnicah, delna poraščenost	slabi	69	78	83	87
	dobri	64	74	81	85
po plastnicah in na terasah	slabi	66	74	80	82
	dobri	62	71	78	81
po plastnicah in na terasah, delna poraščenost	slabi	65	73	79	81
	dobri	61	70	77	80
<b>Nizka čita</b>					
v ravni vrsti	slabi	65	76	84	88
	dobri	63	75	83	87
v ravni vrsti, delna poraščenost	slabi	64	75	83	86
	dobri	60	72	80	84
po plastnicah	slabi	63	74	82	85
	dobri	61	73	81	84
po plastnicah, delna poraščenost	slabi	62	73	81	84
	dobri	60	72	80	83
po plastnicah in na terasah	slabi	61	72	79	82
	dobri	59	70	78	81
po plastnicah in na terasah, delna poraščenost	slabi	60	71	78	81
	dobri	58	69	77	80
<b>Gosto sejane stročnice ali kolobarjen travnik</b>					
v ravni vrsti	slabi	66	77	85	89
	dobri	58	72	81	85
po plastnicah	slabi	64	75	83	85
	dobri	55	69	78	83
po plastnicah in na terasah	slabi	63	73	80	83
	dobri	51	67	76	80

## 2.4 Hidrogram odtoka

Skupen hidrogram odtoka je sestavljen iz dveh osnovnih delov: neposrednega baznega odtoka in površinskega odtoka. Hidrogram neposrednega površinskega odtoka je preoblikovanje učinkovitih padavin v odtok. Bazni odtok pa je del padavin, ki pronica skozi tla, dokler ta ne doseže podtalnice, ki bogati vodotok (Bedient in sod., 2008; Tinta 2011). Dodatno hidrogram odtoka sestavljajo še padavine, ki padejo neposredno v strugo in medtok (slika 7). Ker vseh posameznih delov ne moremo meriti ločeno, hidrogramu merjenega odtoka v praksi izločamo le dva osnovna dela: bazni in površinski del odtoka.

Najmanjši bazni odtok kot posledico izcejanja podzemnih voda zaznamo v strugi vodotoka, ko dalj časa ni padavin (slika 7). Po pojavu večjih padavinah se začne pretok vode v vodotoku naraščati, čez čas doseže maksimum in nato postopoma upada. Diagram časovnih sprememb pretoka v vodotoku imenujemo hidrogram (Brilly in Šraj, 2006).



Slika 7: Osnovne lastnosti histograma odtoka (Brilly in Šraj, 2006)

Slika 7 prikazuje pomembne komponente histograma odtoka, ki so naslednje:

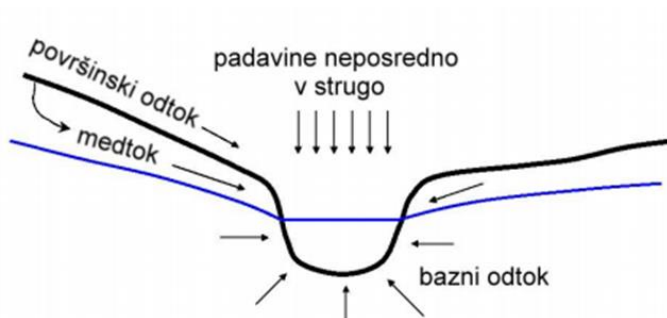
- krivulja naraščanja,
- konica(vrh) grafa,
- krivulja padanja,
- bazni odtok.

Na sliki 7 pa so prikazani tudi časovni parametri:

- čas zakasnitve  $T_p$ ,
- čas koncentracije  $T_c$ .

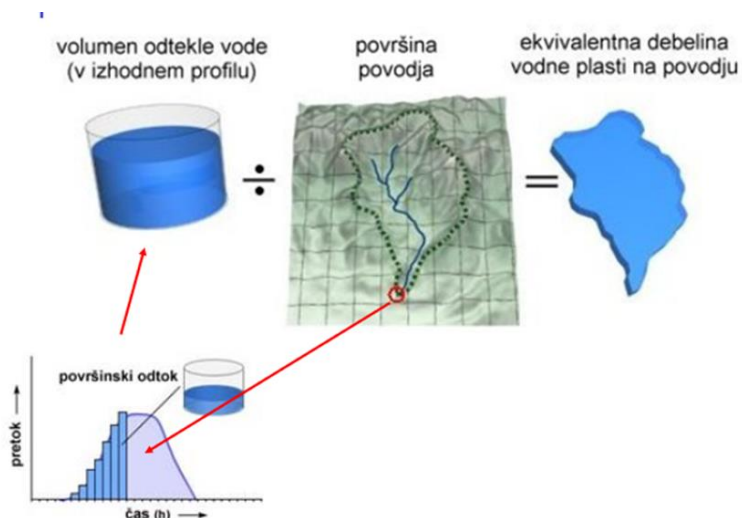
#### 2.4.1 Površinski odtok

Površinski odtok imenujemo del padavin, ki prispejo na površino zemlje in se ne zadržijo na rastlinah ali v tleh ali izhlapijo temveč odtečejo podpovršinsko in površinsko v mrežo vodotokov. Voda teče pod vplivom gravitacije proti najnižji točki določene padavinskega območja ali prispevne površine, opredeljenega s topografskimi in z geološkimi lastnostmi (Brilly in Šraj, 2005).



Slika 8: Posamezni deli odtoka (Brilly in Šraj, 2006)

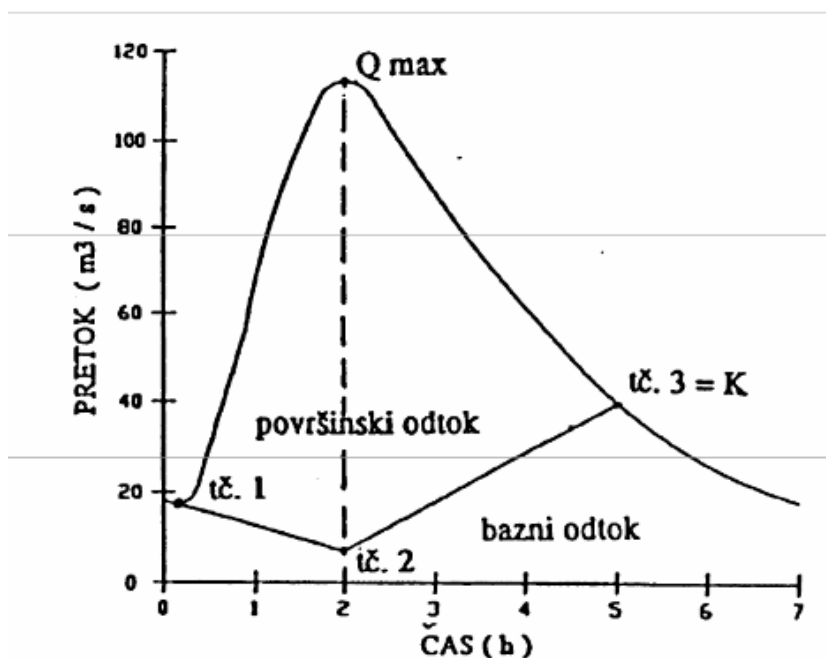
Na sliki 9 je grafično prikazan izračun ekvivalente debeline vodne plasti na porečju določenega vodotoka. Opisana je kot volumen odtekle vode na celotno površino porečja.



Slika 9: Ekvivalentna debelina vodne plasti (Šraj, 2014)

## 2.4.2 Bazni odtok

Bazni odtok je tisti del odtoka, ki je v vodotoku prisoten tudi po daljšem obdobju brez padavin. Hidrogram torej vsebuje površinski, podpovršinski in bazni odtok. Odvisno od dejanskih geoloških lastnosti porečja ima razmejitev med posameznimi pretoki lahko različne oblike. V praksi se najpogosteje uporablja tri točkovna metoda določanja baznega odtoka. Pri eni izmed tro-točkovnih metod izločanja baznega odtoka je točka 1 na sliki 9 določena s časom začetka površinskega odtoka, ki ga povzročijo padavine (trenutek, ko je pretok v strugi začel naraščati). Točka 3 označuje mesto, kjer površinski tok preneha. Točko 3 dobimo tako, da krivuljo pretokov izrišemo v logaritemskem merilu. Na mestu kjer krivulja v logaritemskem merilu preide v premico se nahaja točka 3. Točka 2 se nahaja na ordinati, ki poteka skozi vrh hidrograma in predstavlja presečišče premic, ki gresta skozi točko 1 in 3 (Brilly in Šraj, 2006).



Slika 10: Tro točkovna metoda določanja baznega odtoka (Brilly in Šraj, 2006)

## 2.5 Časovni parametri

### 2.5.1 Čas zakasnitve ( $T_p$ )

Čas zakasnitve je definiran kot (Timing parameters, 2005):

1. Čas od začetka učinkovitih padavin do konice pretoka (NRCS, 1972, McCuen, 1984).
2. Čas od težišča učinkovitih padavin do konice pretoka (Eagelson, 1962).

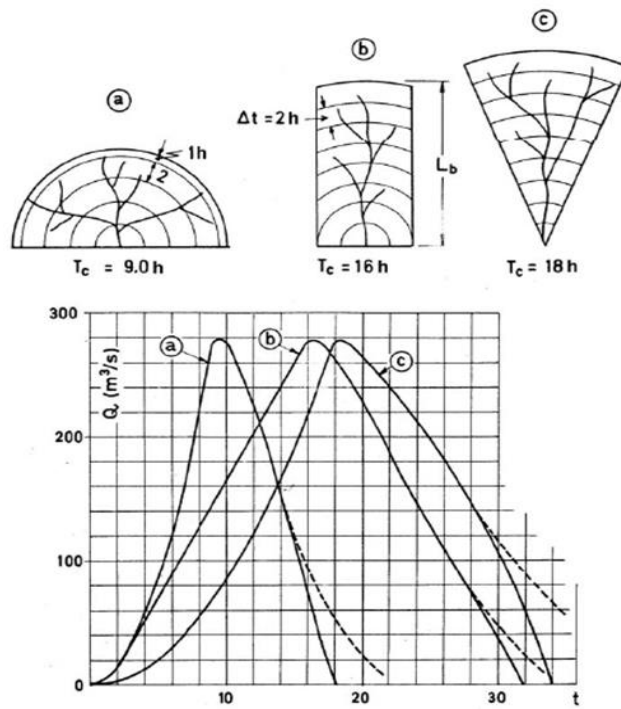
Površinski odtok se začne sočasno z začetkom učinkovitih padavin, vendar se največja količina odtoka zamakne za čas, ki je potreben, da voda priteče do iztoka iz porečja. Čas zakasnitve se uporablja v mnogih študijah, vendar so v uporabi različne definicije in postopki (Rao in Delleur, 1973)

### 2.5.2 Čas koncentracije ( $T_c$ )

Tudi za čas koncentracije ( $T_c$ ) obstaja več definicij (Timing parameters, 2005):

1. Čas potovanja delca vode od hidravlično najbolj oddaljenega dela porečja do iztoka iz porečja. Drugače povedano je to čas od konca učinkovitih padavin do konca površinskega odtoka. To definicijo so uporabili mnogi avtorji pri svojih raziskavah (Kirpich, 1940; USACE, 1966; NRCS, 1972; Schultz in Lopez, 1974; McCuen, 1998)
2. Čas od konca učinkovitih padavin do prevojne točke na krivulji upadanja hidrograma (Bell in Kar, 1969; NRCS, 1972).
3. Čas od težišča učinkovitih padavin do prevojne točke na krivulji upadanja hidrograma (Subramanya, 1984; McCuen, 1998).

Bistvena razlika med obema definicijama je, da prvo uporabljamo za izdelavo konceptualnih hidroloških modelov, kadar nimamo na voljo merjenih podatkov. Drugi dve pa se uporabljata, ko imamo že izdelan hidrogram iz meritev in lahko čas koncentracije odčitamo (Fang, 2005).



Slika 11: Vpliv oblike povodja na čas koncentracije (Brilly in Šraj, 2006)

## 2.6 Sinetični hidrogram enote

Metode sintetičnih hidrogramov enote se uporabljajo predvsem pri transformaciji efektivnih padavin v površinski odtok padavin s porečja, ko nimamo dostopnih merjenih podatkov ali pa ti niso dovolj zanesljivi, da bi lahko naredili hidrogram enote. Sintetične hidrograme oblikujemo na podlagi določenih lastnosti porečja in različnih teoretičnih in empiričnih izhodišč (Brilly in Šraj, 2006).

V toku zgodovine je bilo razvitih veliko različnih enačb od različnih avtorjev, za določanje časa koncentracije. Najbolj znanimi in pomembni so naslednji avtorji: Clark, Morgan, Carter, Kerby-Hatheway, Van Sickle, MCuen, Brensby-Williams, Eagelson, USBR, Linsley in še veliko drugih.

Veliko različnih avtorjev pa je predstavilo enačbe časa zakasnitve. Med najbolj znanimi so: Putnam, Snyder, Tulsa District, Simas, Riverside Country, Denver, Espey, SCS in Hawkins, SCS.

Hidrogram enote se izdelava za posamezno podporečje z enim ali dvema parametroma. Parametri sintetičnega hidrograma enote se večinoma nanašajo na značilnosti porečja. Zato se hidrogram enote lahko oceni za nemerjena porečja z geomorfologijo tal, pokrovnostjo oz. rabo tal, itd (Fang in sod., 2005a).

V nadaljevanju diplomske naloge smo predstavil različne modele sintetičnih HE, ki smo jih potem uporabili za modeliranje z modelom HEC-HMS:

- Snyderjev model,
- SCS model,
- Clarkov model.

### 2.6.1 Snyderjev HE

Snyder je raziskavo odtoka naredil v visokogorju ZDA, kjer je na novo naredil vse meritve. Na podlagi meritev pretokov in padavin je Snyder določil hidrograme enote, jih parametriziral in parametre povezal z merjenimi vrednostmi. Za čas zakasnitve HE je predlagal enačbo (Brilly in Šraj, 2006):

$$T_p = 0.7516 \cdot C_t(L \cdot L_c)^{0.3} \quad (8)$$

kjer je:

$T_p$  čas zakasnitve [h],

$C_t$  koeficient povodja [1.8 – 2.2],

- $L$  dolžina glavnega toka od iztočnega profila do razvodnice [km],  
 $L_c$  dolžina glavnega toka od iztočnega profila do prereza na vodotoku, ki je najbližje centroidu povodja [km].

### 2.6.1.1 Metoda Tulsa District

Razvita je bila na podlagi poskusov, ki jih je izvedla enota Tulsa District USACE v Oklahomi v ZDA in velja predvsem za naravna porečja v podeželskih krajih (Brilly in Šraj, 2006). Enačba za izračun časa zakasnitve za naravna povodja je naslednja:

$$Tp = 0.708 \cdot \left( \frac{L \cdot L_c}{\sqrt{S}} \right)^{0.39} \quad (9)$$

kjer je:

- $Tp$  čas zakasnitve [h],  
 $L$  dolžina glavnega toka od iztočnega profila do razvodnice [km],  
 $L_c$  dolžina glavnega toka od iztočnega profila do prereza na vodotoku, ki je najbližje centroidu povodja [km],  
 $S$  padec povodja [‰].

Priporočljivo je, da se pri računanju s to enačbo upoštevajo naslednje omejitve:

1. površina povodja naj bo med 2.3 in 1300 km<sup>2</sup>;
2. padec povodja naj znaša od 0.8 do 15.5 ‰;
3. dolžina povodja naj bo med 2.2 in 100 km;
4. dolžina toka do centroida povodja pa med 1 in 50 km.

Tulsa District US A.C.E. je razvil tudi naslednjo enačbo za izračun maksimalnega pretoka:

$$qp = 4.1515 \cdot Tp^{-0.92} \quad [\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2] \quad (10)$$

Koeficient maksimalnega pretoka ( $Cp$ ) pa določimo po naslednji enačbi:

$$Cp = \frac{qp \cdot Tp}{6.992} \quad (11)$$



### 2.6.1.2 Metoda Denver

V Denver Area Urban Drainage in Flood Control District so leta 1975 razvili enačbo za določanje vrednosti časa zakasnitve  $T_p$  (Brilly in Šraj, 2006):

$$T_p = 0.6333 \cdot C_t \cdot \left( \frac{L \cdot L_c}{\sqrt{S}} \right)^{0.48} \quad (12)$$

pri čemer je:

- $T_p$  čas zakasnitve od težišča histograma učinkovitih padavin do pojava maksimalnih pretokov hidrograma [h],
- $L$  dolžina vodotoka od iztočnega profila do konca roba povodja [km],
- $L_c$  dolžina vodotoka od iztočnega profila do prereza na vodotoku, ki je najbližja težišču vodotoka [km],
- $S$  ocenjen vzdolžni padec celotnega vodotoka [m/m],
- $C_t$  koeficient refleksijskega časa pojava maksimalnega pretoka [-].

V omenjenih enačbah je  $I$  enak odstotku neprepustne površine povodja. S pomočjo koeficientov  $P$  in  $C_t$ , izračunanih na osnovi predhodnih enačb, lahko določimo koeficient maksimalnega pretoka  $C_p$ :

$$C_p = 0.867 \cdot P \cdot C_t \cdot A^{0.39} \quad (13)$$

pri čemer je:

- $C_t$  koeficient refleksijskega časa pojava maksimalnega pretoka,
- $P$  parameter nastopa konice hidrograma,
- $A$  površina povodja [km<sup>2</sup>].

Za izračun koeficienta  $C_p$  po omenjeni metodi uporabimo naslednji pomožni koeficient  $P$ , določen v odvisnosti od odstotka neprepustne površine  $I$  (Brilly in Šraj, 2006):

$$P = 0.002450 \cdot I^2 - 0.0120 \cdot I + 2.16 \quad (14)$$

Pri pogoju da je:  $0 \leq I \leq 40$

Vrednosti za  $C_t$ , ki se uporabljajo pri postopku Colorado Urban Hydrograph, so odvisne od odstotka neprepustne površine  $I$  in jih določamo z enačbo (Brilly in Šraj, 2006):

$$C_t = -0.00371 \cdot I + 0.163$$

Pri pogoju da je:  $0 \leq I \leq 10$

### 2.6.1.3 Metoda Riverside County

Riverside County Food Control in Water Conservation District iz Kalifornije sta metodo razvila leta 1963. Enačba je zelo podobna enačbi metodi Tulsa District (U.S. Army Corps of Engineers). Enačba ima obliko (Brilly in Šraj, 2006):

$$T_p = 0.5077 \cdot C \cdot \left( \frac{L \cdot Lca}{\sqrt{S}} \right)^{0.38} \quad (15)$$

kjer je:

- $C$  koeficient, ki je odvisen od naklon terena:  
 $C = 1.2$  za strm teren;  
 $C = 0.72$  za srednje strm teren;  
 $C = 0.38$  za ravninski teren,
- $L$  dolžina odvodnika [km],
- $Lc$  dolžina vodotoka od iztočnega profila do prereza na vodotoku, ki je najbližja težišču vodotoka [km],
- $S$  nagib povodja [‰],
- $T_p$  čas zakasnitve [h].

Pogoj pri računanju s to enačbo je da mora biti površina porečja med 6 in 1670 km<sup>2</sup>.

### 2.6.1.4 Eaglesonova metoda

Eaglesonova metoda je bila razvita leta 1962 in je bila namenjena računanju časa zakasnitve na urbaniziranih porečjih s kanalizacijskim sistemom (Brilly in Šraj, 2006):

$$T_p = 0.1596 \cdot \left( \frac{L \cdot Lca}{\sqrt{S}} \right)^{0.39} \quad (16)$$

kjer so:

$L$	dolžina vodotoka [km],
$Lca$	dolžina vodotoka od iztočnega profila do prereza na vodotoku, ki je najbližja težišču vodotoka [km],
$S$	ocenjeni nagib odtočnega kanala [%],
$Tp$	čas zakasnitve [h].

### 2.6.1.5 Putnamova metoda

Enačba je bila izdelana za čas zakasnitve za urbana območja leta 1972. Enačba je bila preverjena na vodotokih okraja Wichita v Kansasu, poizkuse pa je izvajal U.S. Geological Survey (Brilly in Šraj, 2006):

$$T_p = 0.2548 \cdot \sqrt{\frac{L}{\sqrt{S}}} \cdot I^{-0.57} \quad (17)$$

kjer so:

$L$	dolžina vodotoka [km],
$I$	delež neprepustne površine [-],
$S$	ocenjeni nagib odtočnega kanala [%],
$Tp$	čas zakasnitve [h].

Veljavnost enačbe se giblje:

1. za površine od 0.77 do 388.5 km<sup>2</sup>,
2. za  $L/S$  od 370 do 33278,
3. za neprepustne površine od 0 do 0.3.

### 2.6.1.6 Taylor-Schwartzeva metoda

Metodo sta razvila Taylor in Schwartz leta 1952, ko sta analizirala 20 povodij ob Atlantiku v ZDA. Predstavila sta enačbo, ki vključuje vpliv topografskih značilnosti porečja (Brilly in Šraj, 2006):

$$C_t = \frac{0.6}{\sqrt{S}} \quad (18)$$

kjer je:

$C_t$	koeficient, ki določa topografske lastnosti porečja,
$S$	padec porečja [m/m].

V Snyderjevi enačbi lahko za določitev časa zakasnitve uporabimo koeficient  $C_t$ :

$$T_p = 0.7516 \cdot C_t (L L_c)^{0.3} \quad (19)$$

kjer je:

- $T_p$  čas zakasnitve [h],
- $C_t$  koeficient povodja [1.8 – 2.2],
- $L$  dolžina glavnega toka od iztočnega profila do razvodnice [km],
- $L_c$  dolžina glavnega toka od iztočnega profila do prereza na vodotoku, ki je najbližje centroidu povodja [km].

### 2.6.1.7 Metoda Colorado State University

Leta 1974 je bila na državni univerzi v Koloradu razvita metoda, ki vključuje vpliv prepustnosti tal porečja:

$$C_t = \frac{7.81}{I^{0.78}} \quad (20)$$

kjer je:

- $C_t$  koeficient, ki določa topografske lastnosti povodja,
- $I$  odstotek neprepustne površine povodja [%].

$T_p$  nato izračunamo s pomočjo Snyderjeve enačbe (poglavje 2.9.1).

### 2.6.2 SCS HE

Metoda SCS je parametrična metoda določanja HE. Metoda temelji na osnovi povprečij HE, ki so določeni iz merjenih padavin in odtoka za večje število manjših kmetijskih porečij v ZDA (Brilly in Šraj, 2006).

Čas zakasnitve  $T_p$  se lahko oceni z umerjanjem v programu HEC-HMS. Za nemerjena podpovodja SCS predlaga, da je čas zakasnitve HE povezan s časom koncentracije  $T_c$ :

$$T_p = 0.6 \cdot t_c \quad (21)$$

Parameter SCS hidrograma enote je čas zakasnitve. Čas zakasnitve pri SCS metodi je po definiciji enak kot pri Snyderjevi metodi. Tako lahko vrednosti časa zakasnitve povzamemo po že prikazanih postopkih. SCS je podal še eno enačbo za določitev časa zakasnitve (Brilly in Šraj, 2006):

$$T_p = L^{0.8} \frac{(Sr+25.4)^{0.7}}{28.14 \cdot \sqrt{Y}} \quad (22)$$

kjer je:

- $T_p$  čas od težišča histograma učinkovitih padavin do vrha enotnega, hidrograma [h],
- $L$  hidravlična dolžina povodja [km],
- $Sr$  maksimalna retenzija povodja [mm],
- $Y$  naklon povodja [%].

Vrednost retenzije  $Sr$  se računa neposredno na osnovi koeficienta  $CN$  (curve number) (preglednici 2 in 3):

$$Sr = \frac{25400 - 254 \cdot CN}{CN} \quad (23)$$

### 2.6.3 Clarkov HE

Metoda Clarka izpelje HE porečja z eksplicitno predstavitvijo dveh kritičnih procesov pri transformaciji učinkovitih padavin v odtok:

1. premik presežka od izvora skozi celoten dren do iztoka iz porečja
2. zmanjšanje velikosti iztoka s skladiščenjem presežka skozi porečje

Kratkotrajno skladiščenje vode na porečju v zemljini, na površju in v strugi igra pomembno vlogo pri transformaciji učinkovitih padavin v odtok. Metoda linearnega rezervoarja je skupna predstavitev učinka skladiščenja (Brilly in Šraj, 2006).

Clarkova metoda (1945) zahteva pri določanju hidrograma enote izračun treh parametrov:  $T_c$  (čas koncentracije),  $R$  (akumulacijski koeficient) ter krivuljo čas-površina (Brilly in Šraj, 2006).

### 2.6.3.1 Kerby-jeva metoda

Metoda je bila razvita leta 1959, priporočljiva pa je za izračun časa koncentracije ( $T_c$ ) površinskega toka porečja, kjer dolžina površinskega toka ne presega od 100 do 150 metrov (Brilly in Šraj, 2006):

$$T_c = 0.024 \cdot \left( \frac{n \cdot L}{\sqrt{S}} \right)^{0.467} \quad (24)$$

kjer je:

$T_c$	čas koncentracije površinskega toka povodja [h],
$S$	nagib porečja [m/m],
$n$	koeficient hrapavosti porečja,
$L$	dolžina površinskega toka [m].

Priporočila za uporabo koeficientov hrapavosti površine zemljišča so:

- gladka, neprepustna površina:  $n = 0.02$ ,
- gladka, strnjena odkrita prst:  $n = 0.1$ ,
- skromna trava, kulture ali zmerno hrapava in nepokrita prst:  $n = 0.2$ ,
- pašniki ali povprečna trava:  $n = 0.4$ ,
- listnati gozd:  $n = 0.6$ ,
- strnjeni gozdovi in gosta trava:  $n = 0.8$ .

### 2.6.3.2 Kirpich-ova metoda

Leta 1940 je Kirpich razvil enačbo za izračun časa koncentracije površinskega toka na majhnih porečjih. Enačbo je razvil na osnovi raziskav merjenih hidrogramov. Ugotovil je, da je čas koncentracije površinskega toka enak času, ki ustreza naraščanju vode v vodotoku od najnižje do najvišje gladine (Brilly in Šraj, 2006):

$$T_c = \frac{0.066 \cdot L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (25)$$

kjer je:

$T_c$	čas koncentracije površinskega toka povodja [h]
$S$	nagib povodja [m/m]
$n$	koeficient hrapavosti povodja
$L$	dolžina površinskega toka [m].

### 2.6.3.3 Overton-Meadowsova metoda

Leta 1976 sta Overton in Meadows razvila enačbo za določanje časa potovanja površinskih tokov na razdaljah do 100 metrov (Brilly in Šraj, 2006):

$$Tt = \frac{0.091 \cdot (n \cdot L)^{0.8}}{\sqrt{P_2} \cdot S^{0.4}} \quad (26)$$

kjer je:

$T_t$	čas potovanja [h],
$S$	nagib [m/m],
$n$	Manningov koeficient površinske hrapavosti,
$L$	dolžina površinskega toka [m],
$P_2$	2-letne, 24-urne padavine [mm].

Manningovi koeficienti hrapavosti za različne površine so:

gladka površina (asfalt, beton, makadam, utrjena prst)	$n = 0.011$
neobdelana površina	$n = 0.05$
obdelane površine: ostanek kritine $\leq 20\%$	$n = 0.06$
obdelane površine: ostanek kritine $> 20\%$	$n = 0.17$
plitva trava:	$n = 0.15$
gosta trava:	$n = 0.24$
trava bermuda:	$n = 0.41$
naravna prerija:	$n = 0.13$
redko zaraščeni gozdovi:	$n = 0.4$
gosti gozdovi:	$n = 0.8$

### 2.6.3.4 SCS TR-55 metoda

Leta 1986, je SCS priporočil naslednje enačbe za določanje plitvih koncentriranih tokov (Brilly in Šraj, 2006):

$$v = 4.918 \cdot \sqrt{S} \quad \dots \dots \dots \text{netlakovane površine} \quad (27)$$

$$v = 6.196 \cdot \sqrt{S} \quad \dots \dots \dots \text{tlakovane površine} \quad (28)$$

kjer sta:

- $v$  hitrost toka [m/s],  
 $S$  nagib terena [m/m].

S hitrostmi, določenimi na osnovi omenjenih enačb, lahko izračunamo čas potovanja z enačbo:

$$Tt = \frac{L}{3600 \cdot v} \quad (29)$$

kjer so:

- $T$  površinski čas potovanja [h],  
 $L$  razdalja površinskega toka [m],  
 $v$  hitrost površinskega toka [m/s].

### 2.6.3.5 Ramserjeva metoda

Enačbo za določanje časa koncentracije v strugah je izpeljal Ramser leta 1927, vendar ne velja za porečja manjša od 5 km<sup>2</sup>, ker na tako majhnih porečjih prevladuje površinski tok (Brilly in Šraj, 2006):

$$Tc = 0.01997 \cdot Lk^{0.77} \cdot Sk^{-0.385} \quad (30)$$

kjer so:

- $Tc$  čas koncentracije [min],  
 $Lk$  dolžina struge [m],  
 $Sk$  povprečni nagib kanala [m/m].

Celoten čas koncentracije izračunamo kot vsoto časov potovanja po površini porečja, v plitvem koncentriranem toku in po strugi.



## 2.7 Programsko orodje HEC-HMS

Hidrološki modeli so vsa orodja, ki opisujejo količinski odnos med odtokom in padavinami in omogočajo oceno odtoka s povodja na podlagi podatkov o padavinah. Obstaja veliko matematičnih modelov, od preprostih empiričnih formul ali soodvisnosti med odtokom in padavinami do kompleksnih matematičnih modelov, zasnovanih na fizikalnih procesih kroženja vode v naravi (WMO, 1994).

V praksi se ime hidrološki modeli običajno ne uporablja za modele, ki obravnavajo celoten hidrološki krog, ampak za modele površinskega odtoka in potovanja poplavnega vala. Razvoj hidroloških modelov sega v obdobje po 2 svetovni vojni in je bil odvisen od razvoja računalnikov in programskih jezikov. Eden najstarejših in najbolj znanih programov za simulacijo površinskega odtoka je bil model HEC-1, ki je bil razvit leta 1967 v Hidrološkem centru Inženirskega korpusa ameriške vojske v Davisu, Kalifornija. Prva verzija programa, razvita za DOS okolje, je bila predstavljena leta 1968 (Brilly, 1993).

Novo in posodobljeno verzijo programa HEC-HMS so predstavili leta 1998. Prilagojena je za modernejšo računalniško opremo in tudi za delo z okni. Program je v osnovi namenjen modeliranju padavinskega odtoka s porečij ter visokovodnih valov z izbrano povratno dobo. Hidrograme, ki jih v programu izračunamo, lahko uporabimo neposredno ali pa v povezavi še s kakšno drugo programsko opremo za različne študije. Lahko recimo napovedujemo odtok ali visokovodne valove iz določenega porečja, lahko ga uporabimo tudi za modeliranje prepustov in pregrad, študije vpliva urbanizacije na odtok in podobno. Projekt v programu HEC-HMS sestoji iz treh modelov: modela porečja, kontrolnega modela in meteorološkega modela (US Army Corps of Engineers, 2015).

## 2.8 Programsko orodje SAGA-GIS

SAGA-GIS je odprtokodni in prosto dostopni program, ki podpira vektorske in rasterske podatkovne formate (SAGA-GIS, 2015). Dobra lastnost programa je njegova uporabnost tako za tiste, ki se prvič srečajo z GIS orodji (geografski informacijski sistem) kot za tiste, ki želijo izvajati zahtevne GIS analize. Vsebuje veliko zbirko geo-znanstvenih algoritmov in je predvsem močno orodje za analize digitalnih modelov višin (DMV) in digitalnih modelov reliefa (DMR). Je program, ki združuje močna orodja za geografske analize in ima intuitiven ter uporabniku prijazen grafični uporabniški vmesnik (GUI). Prav tako lahko uporabnik razvije svoje module in jih enostavno implementira v program. Slabi in pomanjkljivi dokumentaciji lahko pripisujemo vzrok slabe prepoznavnosti SAGA-orodja med uporabniki GIS programskih orodij (Stavbar, 2011).

### 3 PODATKI

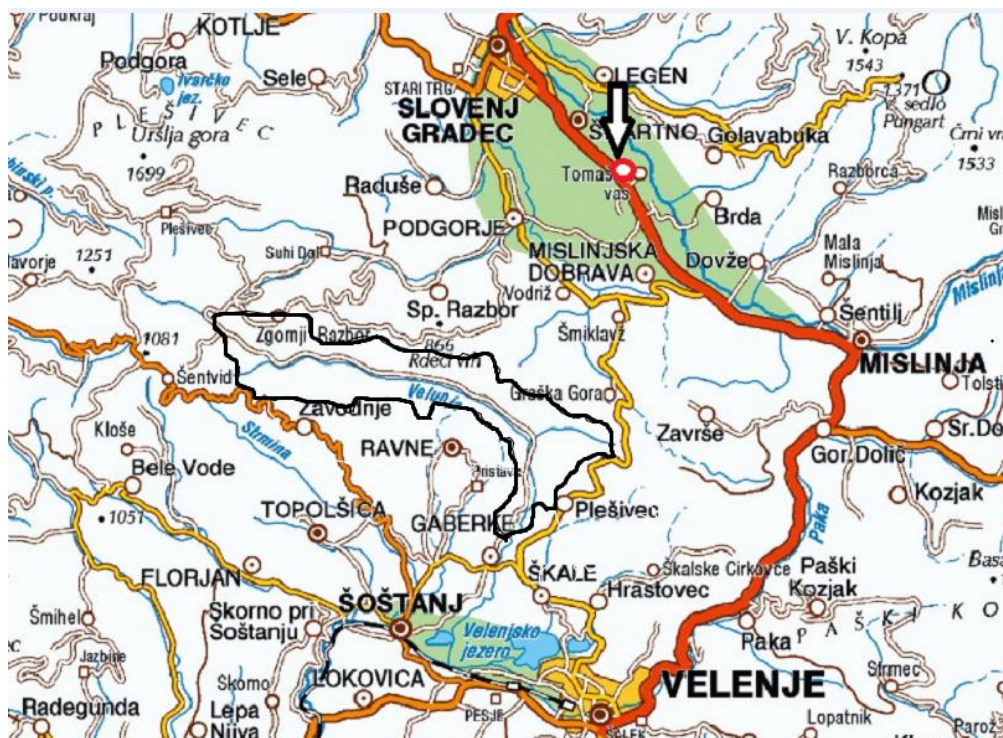
#### 3.1 Opis obravnavanega območja vodotoka Velunje

Območje, ki smo ga obravnavali leži v severno-vzhodnem delu Slovenije, v bližini mesta Velenje. Glavni vodotok Šaleške doline je reka Paka, ki izvira pod Brešarjevo planino v bližini vasi Zg. Razbor. Reka Paka ima veliko pritokov med njimi so: Polinca, Ponikva, Lepena, Klančnica, Toplica, itd., ki so desni pritoki ter levi pritoke, ki so: Glažarica, Jeseničnica, Trebušnica ter Lokoviški in Hudi potok. Med pritoki Pake je najdaljša in najbolj vodnata Velunja (Sorè, 1957). Ta izvira pod Ciganjsko visoko planoto. Do sotočja z Graško gorsko je njen tok horizontalen. Tam pa nas preseneti veliko koleno, ki obrne zgornji tok Velunje iz smeri Z-V v smer S-J oziroma JZ. Velunja je od »Strmške žage« do »Grabnerja« mejna voda med občinama Šoštanj in Mestno občino Velenje. Desni breg je na robu Gaberk in leži na skrajnem zahodu Plešivca. Velunja teče skozi različne vasi, kot so Ravne, Gabeke, itd v smeri proti Velenju. Tam se izliva v Pako kot eden izmed njenih desnih pritokov v neposredni bližini Šoštanja. Paka nadaljuje svojo pot proti Savinji, kateri se pridruži v Rečici ob Paki, nato se ta združi s Savo v Zidanem Mostu.



Slika 12: Lokacija Velunje na zemljevidu Slovenije (Zemljevid, 2015)

Na sliki 13 je prikazana Šaleška dolina. S puščico je označena meteorološka postaja Šmartno pri Slovenj Gradcu. Območje označeno s črno, pa je prispevno območje vodotoka Velunje do vodomerne postaje Gabeke.

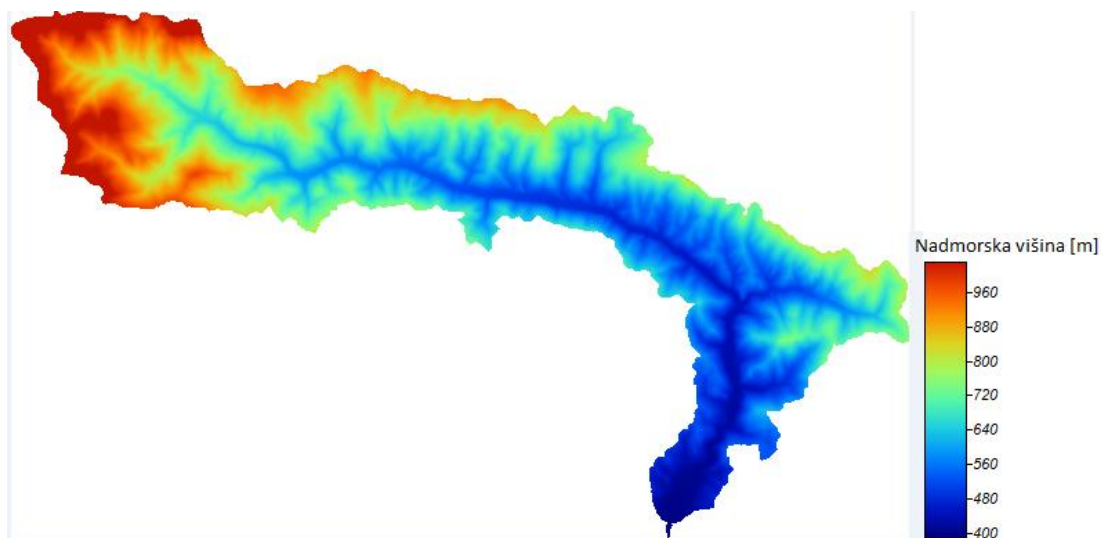


Slika 13: Karta Šaleške doline (Geopedia, 2015a)

### 3.1.1 Topografske karakteristike porečja Velunje

Topografske karakteristike (nagib, površina, raba tal) porečja Velunje smo določili s programskim orodjem SAGA-GIS (SAGA-GIS, 2015) in na podlagi digitalnega modela reliefa (DMR) Slovenije. Obravnavali smo porečje od izvira do vodomerne postaje Gaberke (slika 14).

Nadmorska višina se giblje med 991 m pod Ciganjsko visoko planoto v bližini vasi Zgornji Razbor in 391m do vodomerne postaje Gaberke, ki se nahaja v vasi Gaberke v bližini Šoštanja. Površina prispevnega območja je 27,4 km<sup>2</sup>. Padec struge vodotoka je 4,04 %. Povprečni naklon celotnega porečja terena je 41,9 %. Najdaljša dolžina vodnega toka je 14,9 km, dolžina vodotoka od iztočnega profila do prereza na vodotoku, ki je najbližje težišču vodotoka pa je 8,5 km.



Slika 14: DMR Velunje od izvira do postaje Gaberke

Preglednica 3: Podatki o vodotoku Velunja, pridobljeni s programom SAGA-GIS

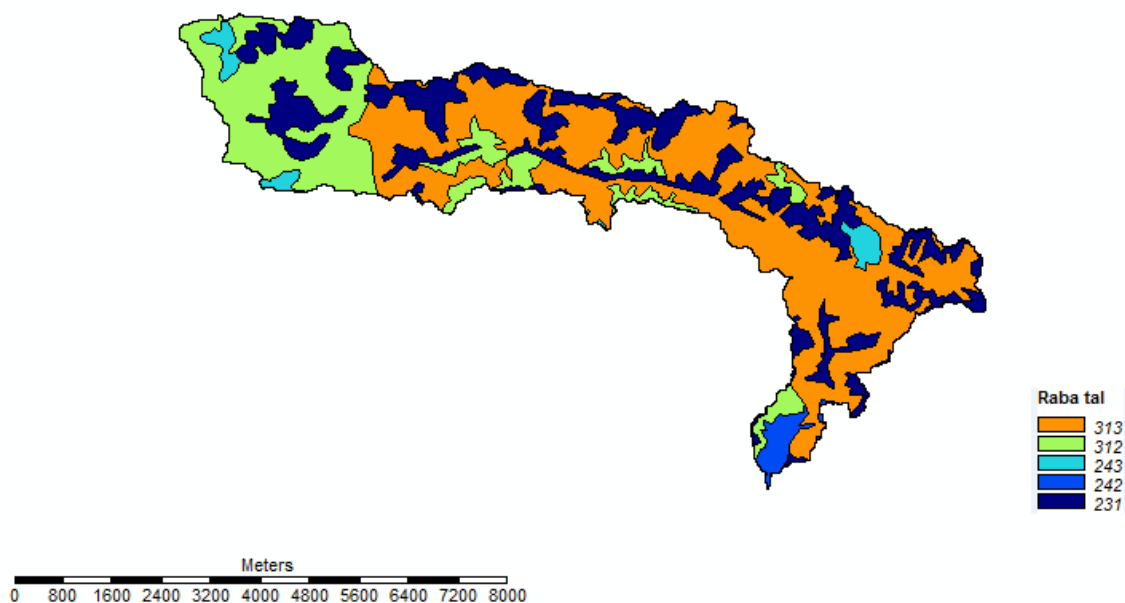
Porečje	Površina [km <sup>2</sup> ]	S (povp. naklon [%o])	S (padec struge [%o])	L [km]	Lca [km]
Velunja	27,44	419	40,4	14,89	8,45

Kjer je:

- L* dolžina vodotoka od iztočnega profila do iztoka iz porečja [km],
- Lca* dolžina vodotoka od iztočnega profila do prereza na vodotoku, ki je najbližja težišču vodotoka [km].

### 3.1.2 Raba tal

Območje Velunje je pretežno zaraščeno z gozdovi, velik del rabe tal pa predstavljajo tudi pašniki. Na celotnem obravnavanem območju je zelo malo urbanih površin. V preglednici 4 vidimo različne vrste pokrovnosti tal na porečju Velunje, različne kategorije so opisane z opisom 1, 2 in 3, pri čemer je opis 1 najbolj splošen, medtem ko je opis 3 podroben. Pri nadaljnjih izračunih smo upoštevali opis 2.



Slika 15: Raba tal CLC za porečje Velunje

Preglednica 4: Tipi rabe tal prispevnega območja Velunje

Razred	Opis1	Opis2	Opis3
231	Pašniki	Pašniki	Kmetijske površine
242	Kmetijske površine drobnoposestniške strukture	Mešane kmetijske površine	Kmetijske površine
243	Pretežno kmetijske površine z večjimi območji vegetacije	Mešane kmetijske površine	Kmetijske površine
312	Iglasti gozd	Gozdovi	Gozdne in deloma ohranjene naravne površine
313	Mešani gozdovi	Gozdovi	Gozdne in deloma ohranjene naravne površine

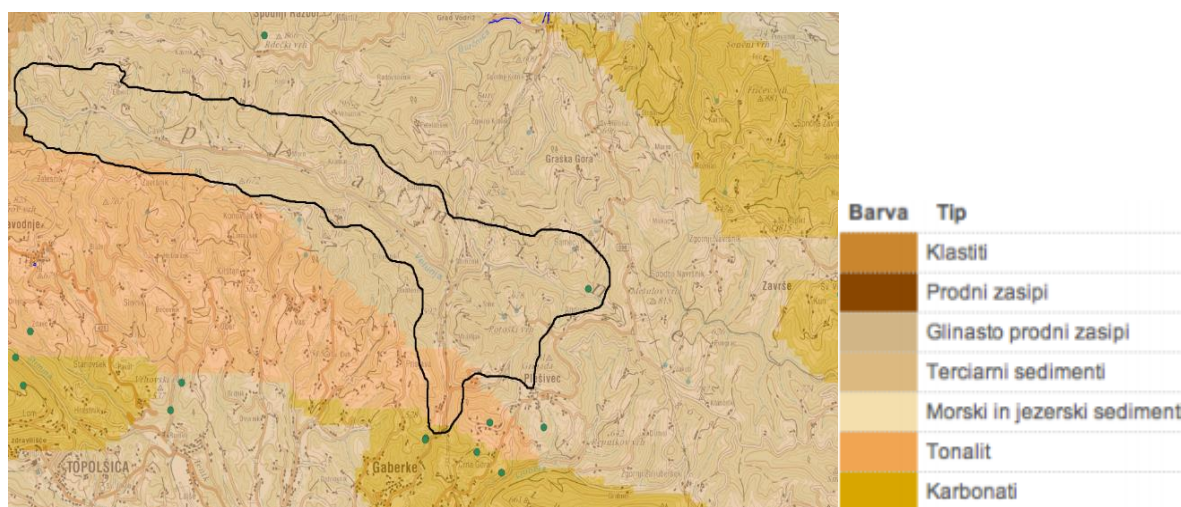
Preglednica 5: Deleži pokrovnosti tal prispevnega območja Velunje

Pokrovnost tal	Površina v [km <sup>2</sup> ]	Delež v [%]
Pašniki	6,9	25,0
Gozdovi	19,4	70,6
Mešane kmetijske površine	1,2	4,4
Skupaj	27,4	100

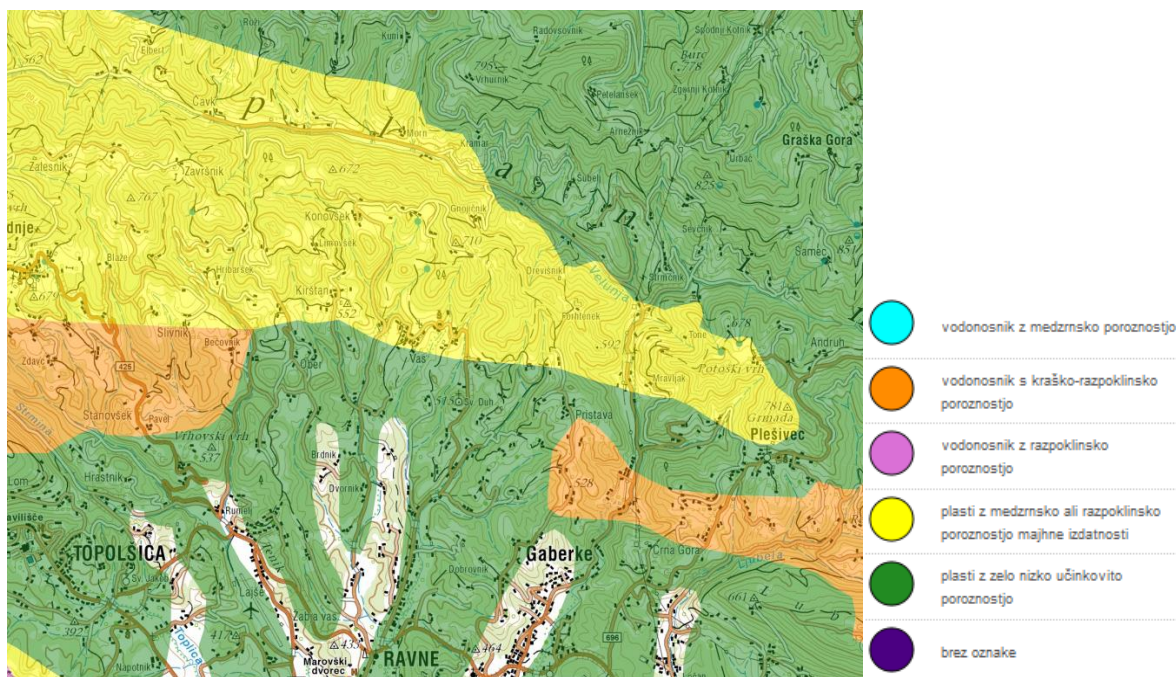


### 3.1.3 Geologija

Na obravnavanem območju geološka sestava ni raznolika. Iz geološke karte (slika 16) lahko ugotovimo, da je podlaga sestavljena iz terciarnih sedimentov. Iz hidrogeološke karte (slika 17) pa lahko ugotovimo, da vodotok Velunja teče nad tremi različnimi hidrogeološkimi plastmi. Največji delež predstavljajo plasti z medzrnsko ali razpoklinsko poroznostjo majhne izdatnosti, sledi jim plast z zelo nizko učinkovito poroznostjo ter zelo majhen delež predstavlja vodonosnik s kraško poroznostjo



Slika 16: Geološka karta obravnavanega območja (Geopedia, 2015)



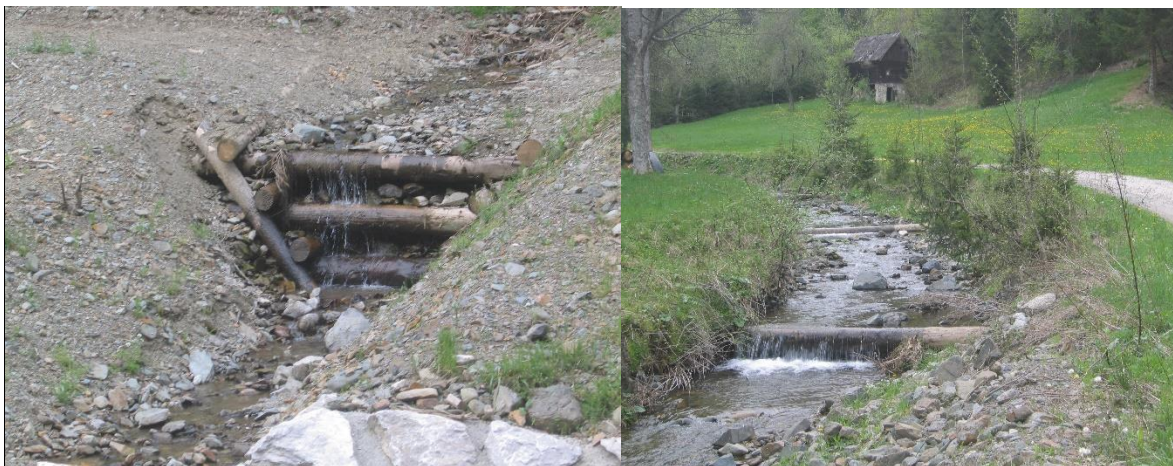
Slika 17: Hidrogeološka karta obravnavanega območja (Geopedia, 2015)



### 3.1.4 Opis obstoječega stanja na terenu

Dne 31.4.2015 sem opravil terenski ogled, kjer sem preveril kako izgleda vodotok Velunja od izvira do vodomerne postaje Gaberke.

Na sliki 18 lahko vidimo, da je struga ob izviru precej kamnita. Na sliki 19 pa lahko tudi vidimo, da je precej zaraščena z vegetacijo.



Slika 18: a) 300 metrov dolvodno od izvira b) Vegetacija v strugi vodotoka in okolici Velunje (foto: Stanjko, 2015)



Slika 19: a) Srednje del toka vodotoka Velunje, b) Talni prag (foto: Stanjko, 2015)



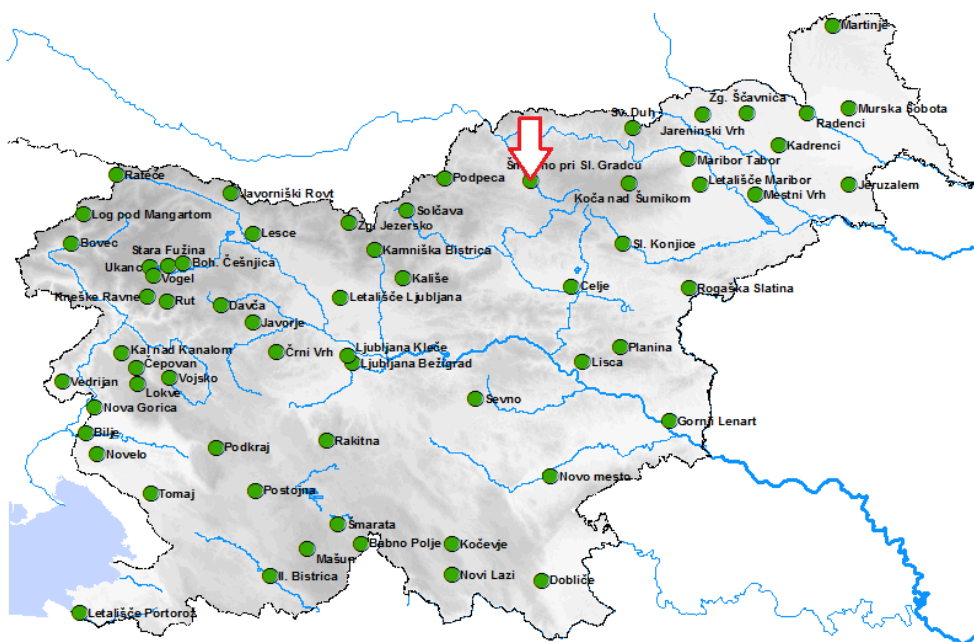
Slika 20: Vodomerna postaja Gaberke (foto: Stanjko, 2015)

### 3.1.5 Padavinski podatki

Osnovni podatek za izračun površinskega odtoka so padavine. Za izračun in modeliranje odtoka s povirja Velunje smo uporabili 5-minutne padavinske podatke z najbližje meteorološke postaje Šmartno pri Slovenj Gradcu (slika 21) za obdobje 2009-2013 (ARSO, 2015a). Merjene histograme izbranih padavinskih dogodkov smo uporabili za umerjanje in validacijo hidrološkega modela površinskega odtoka.

Poleg tega smo dodatno v hidrološkem modelu Velunje uporabili tudi podatke o padavinah, ki so na podlagi zgodovinskega vzorca že preračunane za posamezne povratne dobe (ITP krivulje) (slika 22) za obdobje 1970-2012 (ARSO, 2015b) in smo jih v hidrološki model vnesli kot sintetične padavine z določeno povratno dobo. Tudi ti podatki so bili vzeti za meteorološko postajo Šmartno pri Slovenj Gradcu (slika 21).

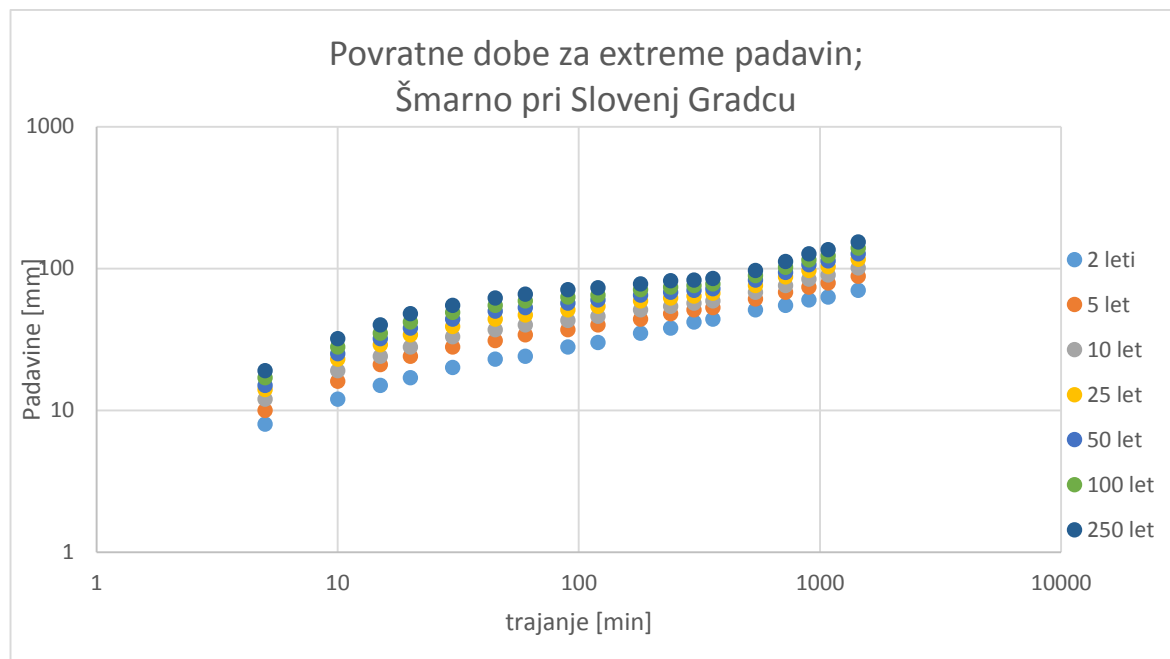




Slika 21: Meteorološke postaje s podatki o ekstremnih padavinah (ARSO, 2015c)

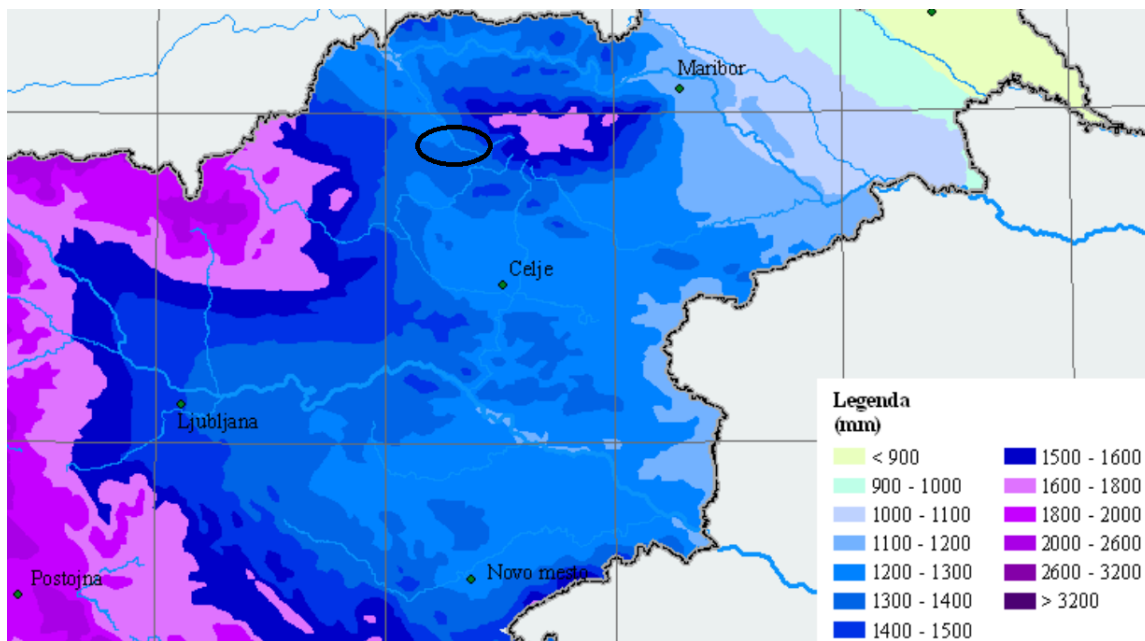
Preglednica 6: Povratne dobe za obdobje 1970 – 2012 za postajo Šmartno pri Slovenj Gradcu (ARSO, 2015c)

trajanje padavin	POVRATNA DOBA						
	2 leti	5 let	10 let	25 let	50 let	100 let	250 let
5 min	8	10	12	14	15	17	19 mm
10 min	12	16	19	23	25	28	32 mm
15 min	15	21	24	29	32	35	40 mm
20 min	17	24	28	34	38	42	48 mm
30 min	20	28	33	39	44	49	55 mm
45 min	23	31	37	44	50	55	62 mm
60 min	24	34	40	47	53	59	66 mm
90 min	28	37	43	51	57	63	71 mm
120 min	30	40	46	54	60	65	73 mm
180 min	35	44	51	59	65	71	78 mm
240 min	38	48	54	62	68	74	82 mm
300 min	42	51	57	64	70	76	83 mm
360 min	44	53	59	67	72	78	85 mm
540 min	51	61	68	76	83	89	97 mm
720 min	55	68	76	87	94	102	112 mm
900 min	60	74	84	97	106	115	127 mm
1080 min	63	79	90	103	113	123	136 mm
1440 min	70	88	101	116	127	139	154 mm



Slika 22: ITP krivulja za obdobje 1970-2012 postajo Šmartno pri Slovenj Gradcu

Na sliki 23 pa lahko vidimo povprečno letno višino padavin za obdobje 1971-2000 (ARSO, 2015b). Na obravnavnem območju znašajo povprečne letne padavine 1200 – 1400 mm padavin na leto.



Slika 23: Povprečna letna višina korigiranih padavin na obravnavanem območju (ARSO, 2015c)

### 3.1.6 Podatki o pretokih

V nalogi smo uporabili podatke o pretokih z vodomerne postaje Gaberke (slika 24). Na vodotoku Velunja se sicer nahaja več vodomernih postaj: Družmirje, Plešivec, Šoštanj in Gaberke. Postaja

Gaberke se nahaja približno 1,7 km gorvodno od izliva Velunje v Šoštanjsko jezero (Družmirsko jezero) in pozneje v reko Pako. Meritve na vodomerni postaji Gaberke so začeli izvajati leta 1986. Šifra postaje Gaberke glede na klasifikacijo, ki jo vodi ARSO, je 6415, postaja pa leži na nadmorski višini 390,5 m. Postaja je opremljena z avtomatskim merskim instrumentom.

Za verjetnostne analize visokovodnih konic smo uporabili dnevne vrednosti pretokov za celotno obdobje meritev, in sicer od leta 1986-2013 (ARSO, 2015d). Za izdelavo hidrološkega modela HEC-HMS pa smo uporabili urne vrednosti pretokov za obdobje 2009-2013 (ARSO, 2015d). Maksimalne in minimalne vrednosti pretokov za celotno obdobje meritev so prikazane na slikah 26 in 27. Povprečna vrednost letnih minimalnih pretokov znaša 0,08 m<sup>3</sup>/s, najmanjša vrednost pa je bila izmerjena leta 2006, in je znašala 0,013 m<sup>3</sup>/s. Povprečna vrednost maksimalnih pretokov znaša 17,58, največji pretok pa je znašal 74 m<sup>3</sup>/s v letu 1995.

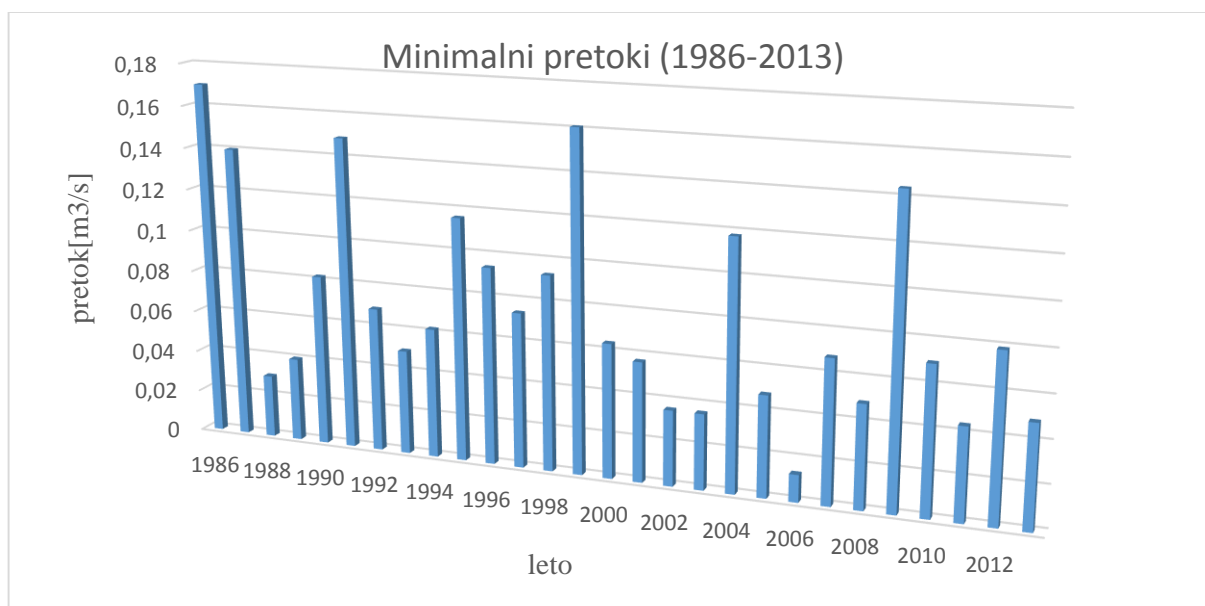
Sliki 24 in 25 sta bili posneti dne 31.4.2015 ob 13:10 ko je bil vodostaj 35cm in pretok 0,25m<sup>3</sup>/s. Vodostaj sem očital sam na merski letvi ter pozneje preveril še na spletni strani ARSO. Najvišji vodostaj so izmerili leta 09.08.1995 ob 17:51, ko je bila odčitana vrednost 360cm. Takrat so tudi izmerili največji pretok in sicer 74 m<sup>3</sup>/s.



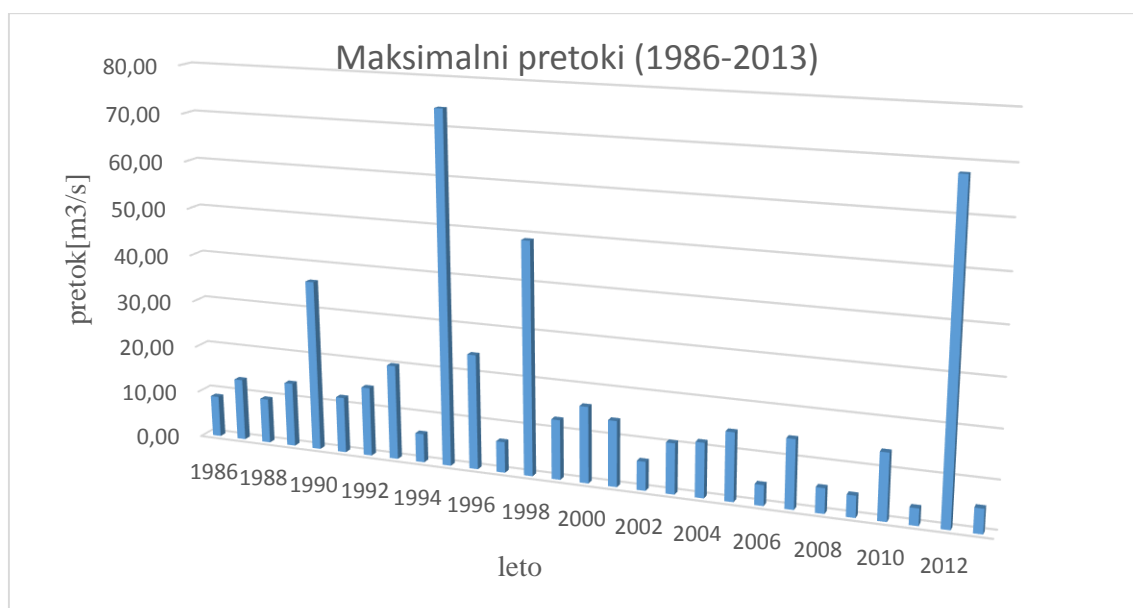
Slika 24: Avtomatska vodomerna postaja Gaberke (foto: Stanjko, 2015)



Slika 25: Vodomerne letev z označbami najvišje izmerjene gladine (foto: Stanjko, 2015)



Slika 26: Minimalni pretoki za obdobje 1986-2013 na vodometri postaji Gaberke



Slika 27: Maksimalni pretoki za obdobje 1986-2013 na vodomerni postaji Gaberke

## 4 REZULTATI

### 4.1 Izračun parametrov koeficienta *CN* in *Ia*

V preglednici 7 so prikazane izbrane vrednosti *CN*, ki smo jih določili na podlagi preglednic 2 in 3 in odtočni potencial, ki smo ga definirali z upoštevanjem podatkov, prikazanih v preglednici 1. V preglednici 7 so prikazani tudi deleži posamezne rabe tal na porečju Velunje in pripadajoči utežni koeficienti *CN*. Raba in pokrovnost tal je bila določena z uporabo programa SAGA-GIS in naslednjih vhodnih podatkov: digitalni model višin (DMV) in karta rabe tal glede na klasifikacijo CLC Corine.

Preglednica 7: Vrednosti *CN* za različne tipe pokrovnosti tal in odtočni potencial zemljine ter posamezni deleži rabe tal za porečje Velunje

Pokrovnost tal	Površina [km <sup>2</sup> ]	Izbrani <i>CN</i>	Delež v [%]	Delež <i>CN</i>
Pašniki	6,9	74	25,0	18,5
Gozdovi	19,4	66	70,6	46,9
Mešane kmetijske površine	1,2	68	4,4	2,7
Skupaj	27,5		100	<u>68,08</u>

V preglednici 8 so predstavljeni izračuni parametrov *CN*, začetne izgube *Ia* ter maksimalno zadrževanje *S* za porečje Velunje do Gaberk. Vse potrebne enačbe so prikazane v poglavju 2.3.

Preglednica 8: Vrednosti parametrov padavinskih izgub po SCS-metodi za porečje Velunje

Porečje	<i>CN</i>	<i>S</i>	Začetne izgube <i>Ia</i> v [mm]
Velunja	68,08	119,1	23,8

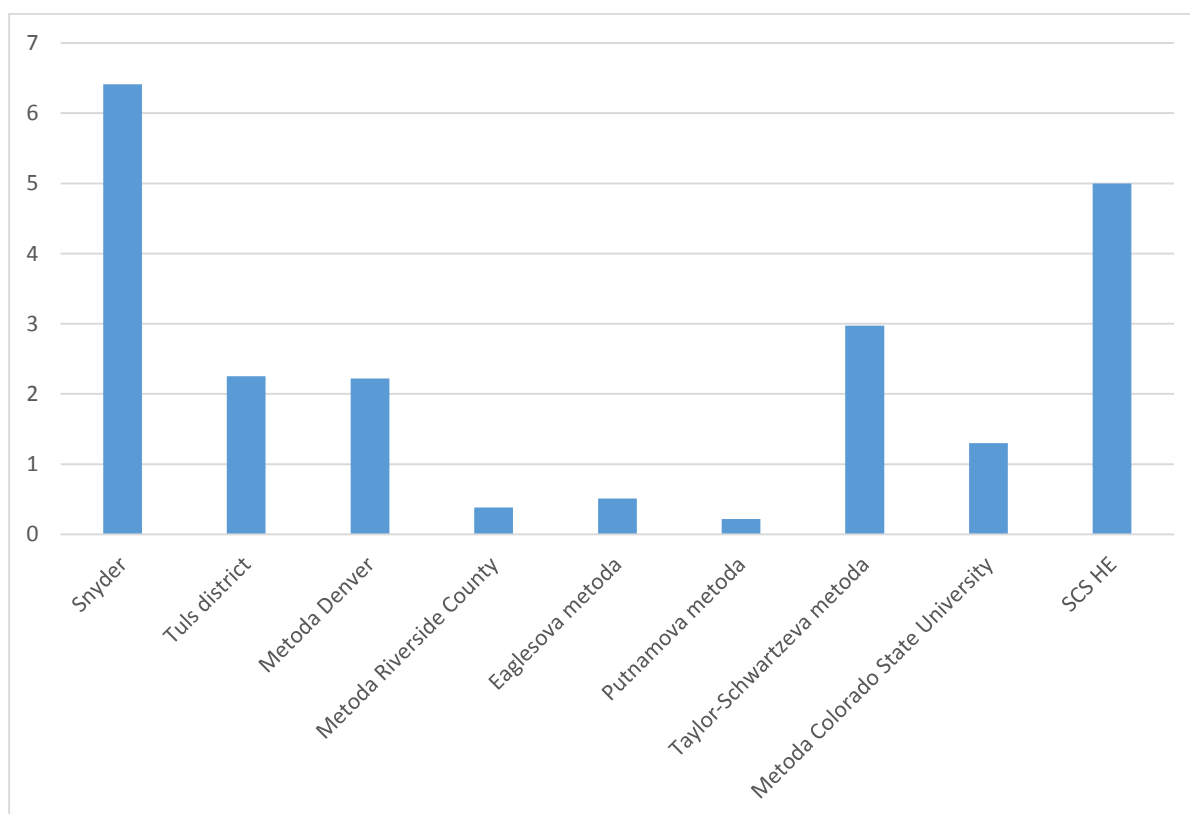
### 4.2 Izračun parametrov sintetičnega hidrograma enote

#### 4.2.1 Izračun časa koncentracije

Za izračun časa zakasnitve (*T<sub>p</sub>*) po različnih metodah smo uporabili enačbe iz poglavja 2. Rezultati izračunov so prikazani v preglednici 9.

Preglednica 9: Časi zakasnitve, izračunani z različnimi metodami

<u>Metoda</u>	<u>Čas zakasnitve(<math>T_p</math>)</u> <u>[h]</u>	<u><math>C_p</math></u> <u>[l]</u>
Snyder	6,41	0,69
Tulsa district	2,25	0,63
Metoda Denver	2,22	0,49
Metoda Riverside County	0,38	/
Eaglesova metoda	0,51	/
Putnamova metoda	0,22	/
Taylor-Schwartzeva metoda	2,97	/
Metoda Colorado State University	1,3	/
SCS HE	5	/



Slika 28: Primerjava časa zakasnitve (prikazano na y-osi) v urah po različnih metodah

Za končni čas časa zakasnitve  $T_p$ , smo izbrali povprečje metod Tulsa District-ove, Riverside County in Putnam-ove metode. Za ta korak smo se odločili, ker so le-te metode najbolj zadoščale pogojem in omejitvam posameznih metod.

Preglednica 10: Omejitve za izračun časa zakasnitve po metodi Tulsa District

<b>Tulsa District</b>		
<b><u>Omejitve:</u></b>	<b><u>Velunja</u></b>	<b><u>Pogoj:</u></b>
površina povodja naj bo med 2.3 in 1300 km <sup>2</sup>	27,5 km <sup>2</sup>	<u>OK</u>
padec povodja naj znaša med 0.8 in 15.5 %	419‰	<u>NI OK</u>
dolžina povodja naj bo med 2.2 in 100 km	14,9 km	<u>OK</u>
dolžina toka do centroida povodja pa med 1 in 50 km	8,5 km	<u>OK</u>

Preglednica 11: Omejitve za izračun časa zakasnitve po metodi Riverside County

<b>Riverside County</b>		
<b><u>Omejitve:</u></b>	<b><u>Velunja</u></b>	<b><u>Pogoj:</u></b>
površina med 5,96 in 1670,54 km <sup>2</sup>	27,5 km <sup>2</sup>	<u>OK</u>

Preglednica 12: Omejitve za izračun časa zakasnitve po metodi Putnam

<b>Putnam</b>		
<b><u>Omejitve:</u></b>	<b><u>Velunja</u></b>	<b><u>Pogoj:</u></b>
površina A od 0,77 do 388,5 km <sup>2</sup>	27,5 km <sup>2</sup>	<u>OK</u>
za L / S od 370 do 33278	2,4	<u>NI OK</u>
za neprepustne površine od 0 do 0.3%	1%	<u>NI OK</u>

$$Tp(\text{izbran}) = \frac{Tp(\text{Tulsa district}) + Tp(\text{Riverside County}) + Tp(\text{Putnamove})}{n} \quad (31)$$

$$Tp(\text{izbran}) = \frac{2,25 + 0,38 + 0,22}{3} = 0,95 \text{ h} \quad (32)$$

Medtem ko smo za koeficient maksimalnega pretoka  $C_p$  izbrali povprečje vseh izračunanih metod: Denver, Tulsa district in Denver.

$$Cp(\text{izbran}) = \frac{Cp(\text{Denver}) + Cp(\text{Tulsa district}) + Cp(\text{Denver})}{n} \quad (33)$$

$$Cp(\text{izbran}) = \frac{0,69 + 0,63 + 0,49}{3} = 0,60 \quad (34)$$

#### 4.2.2 Izračun časa koncentracije ( $T_c$ )

V preglednici 13 so prikazani časi koncentracij  $T_c$ , ki smo jih dobili s pomočjo enačb iz poglavja 2. Pri izračunu časa koncentracije iščemo najdaljšo razdaljo vodne poti od razvodnice prispevnega območja do struge vodotoka Velunje in potem naprej do postaje Gaberke. Celotni čas koncentracije dobimo tako, da seštejemo posamezne čase potovanja vode:

- Prvih 100 metrov vodne poti (po površini porečja) – metodi Kerby ali Kirpich;



- Preostanek poti po površini porečja (koncentriran plitev tok) - Overton-Meadowsova ali SCS TR-55;
- Pot vode po strugi vodotoka – Ramserjeva metoda.

Preglednica 13: Časi koncentracije, izračunani po posameznih metodah

<b>Metoda</b>	<b>Čas koncentracije (<math>T_c</math>) [h]</b>
Kerby	0,2
Kirpich	0,02
Overton-Meadows	1,3
SCS TR-55	1,5
Ramser	0,8

S podatki iz preglednice 13, lahko s kombinacijo različnih metod dobimo različne čase koncentracij. Mi smo vzeli za izračun  $T_c$  seštevek metod (Kirpich + Overton-Meadows + Ramser), ki znaša 2,1 h.

Preglednica 14: Končni čas koncentracij za različne kombinacije metod

<b>Metoda</b>	<b>Čas koncentracije <math>T_c</math> [h]</b>
Kerby + Overton-Meadows + Ramser	2,3
Kerby + SCS TR-55 + Ramser	1,4
Kirpich + Overton-Meadows + Ramser	2,1
Kirpich + SCS TR-55 + Ramser	1,3

### 4.3 Hidrološki model porečja Velunje

#### 4.3.1 Vhodni podatki

Vhodni podatki za hidrološki model HEC-HMS na primeru vodotoka Velunje so bili naslednji:

- površina prispevnega območja ( $A$ ),
- izgube (začetne izgube  $I_a$ ,  $CN$  ter delež neprepustne površine  $I$ ,
- čas zakasnitve ( $T_p$ ), koeficient maksimalnega pretoka ( $C_p$ ),
- bazni odtok,
- padavine,
- pretok.

Prve tri zgodaj navedene točke so vse skozi ostajale iste, za različne dogodke. Zadnje tri pa so se spreminjale v odvisnosti od pripadajočega baznega odtoka, padavin in pretoka v času dogodka.

Koeficient CN smo v prvi fazi določili s pomočjo rabe tal in odtočnega potenciala zemljine (preglednica 7), po končanem umerjanju modela pa smo določili končno vrednost, ki je znašala 75. S tem so se spremenile tudi začetne izgube, ki so odvisne od koeficienta CN. Začetni parametri modela so prikazani v preglednici 15.

Preglednica 15: Začetni vhodni podatki za hidrološki model Velunje do Gaberk

<b>Vhodni podatki za HEC-HMS</b>	
površina prispevnega območja[A]	27,44 km <sup>2</sup>
začetne izgube [Ia]	23,8
koeficient [CN]	68,1
delež neprepustne površine [I]	1 %
čas zakasnitve[Tp]	1 h
koeficient maksimalnega pretoka(Cp)	0,60

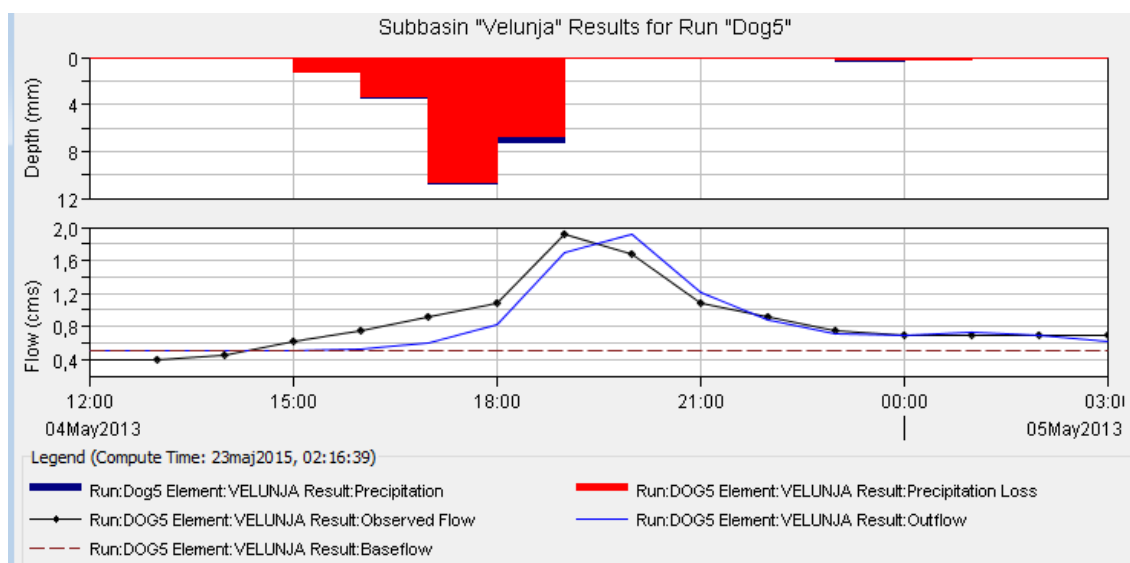
#### 4.3.2 Umerjanje modela

##### 4.3.2.1 Dogodek 4. 5. do 5. 5. 2013

Prvi dogodek, izbran za umerjanje modela je bil padavinski dogodek, ki se je zgodil iz 4. 5. 2013 na 5. 5.2013. Dogodek je trajal od 12:00 dne 4. 5. 2013 do 03:00 dne 5. 5.2013, v tem času pa je padlo 25 mm dežja. Za CN smo dobili vrednost 75, pripadajoče začetne padavinske izgube so bile 16,9 mm ter čas zakasnitve 1 ura (preglednica 16). Bazni odtok je pri tem znašal 0,55 m<sup>3</sup>/s. Rezultat umerjanja lahko vidimo na sliki 29.

Preglednica 16: : Podatki in rezultati umerjanja za padavinski dogodek 04/ 05. 5. 2013

<b>Vodotok</b>	<b>Datum</b>	<b>Trajanje dogodka [h]</b>	<b>Padavine [mm]</b>	<b>CN[/]</b>	<b>Tp[h]</b>	<b>Cp[/]</b>
Velunja	04/ 05.5. 2013	15	23	75	1	0,5



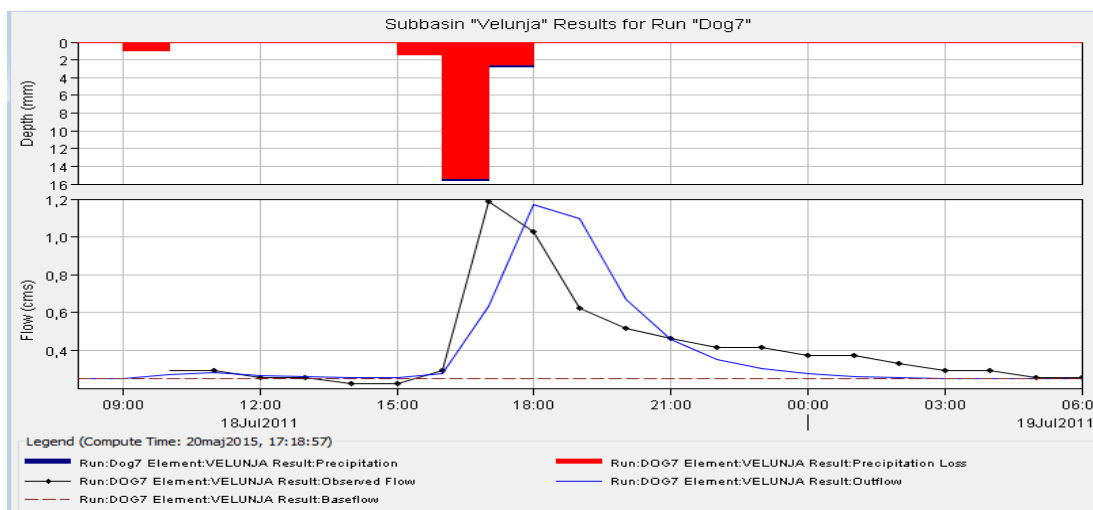
Slika 29: Umerjen model za padavinski dogodek 04/ 05. 5. 2013

#### 4.3.2.2 Dogodek 18. 7. do 19.7. 2011

Drugi padavinski dogodek, ki smo ga izbrali za umerjanje, se je zgodil iz 18. 7. 2011 na 19. 7. 2011. Dogodek je trajal od 08:00 dne 18. 7. 2011 do 06:00 dne 19. 7. 2011, v tem času pa je padlo 21,2 mm dežja. Za CN smo določili vrednost 75 ter čas zakasnitve 1 ura (preglednica 17). Bazni odtok je v tem času znašal 0,25 m<sup>3</sup>/s. Rezultat umerjanja je prikazan na sliki 30.

Preglednica 17: Podatki in rezultati umerjanja za padavinski dogodek 18/ 19.7.2011

Vodotok	Datum	Trajanje dogodka [h]	Padavine [mm]	CN[/]	Tp[h]	Cp
Velunja	18/ 19. 7. 2011	22	21,2	75	1	0,5



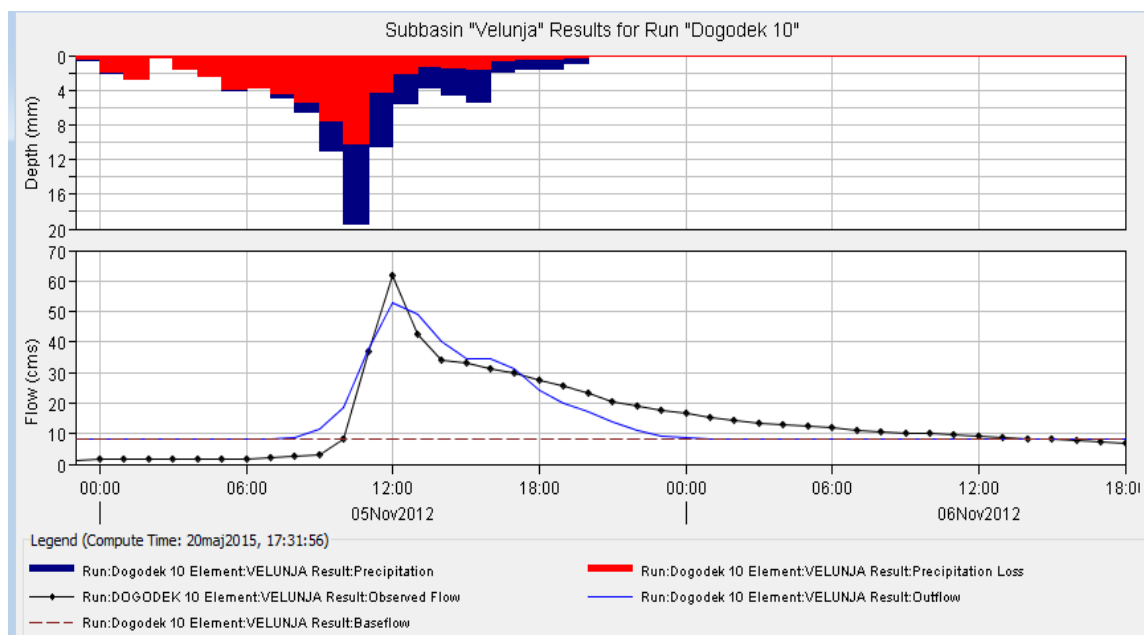
Slika 30: Umerjen model za padavinski dogodek 18/ 19. 7. 2011

### 3.4.2.3 Dogodek 04. 11. do 06.11. 2012

Za tretji padavinski dogodek, smo izbrali večji dogodek, ki se je zgodil s 04. 11. na 06. 11. 2012. Dogodek je trajal od 23:00 dne 04. 11. 2012 do 18:00 dne 06. 11. 2012, v tem času pa je padlo 99,5 mm dežja. Za CN smo določili vrednost 75 ter čas zakasnitve 1 ura (preglednica 18). Bazni odtok je znašal 8 m<sup>3</sup>/s. Rezultat umerjanja lahko vidimo na sliki 31.

Preglednica 18: Podatki in rezultati umerjanja za padavinski dogodek 04/ 6.11.2012

Vodotok	Datum	Trajanje dogodka [h]	Padavine [mm]	CN[/]	Tp[h]	Cp[/]
Velunja	04/ 06. 11. 2012	43	99,5	75	1	0,5



Slika 31: Umerjen model za padavinski dogodek 04/ 06. 11. 2012

### 4.3.3 Validacija modela

Pri postopku validacije smo uporabili nove tri padavinske dogodke, ki so se zgodili 15/ 16. 6.2010, 11/ 12. 7.2012 in 22/ 23. 8. 2009. Pri tem pa smo uporabili že umerjene vrednosti parametrov modela, prikazane v poglavju 4.3.2.

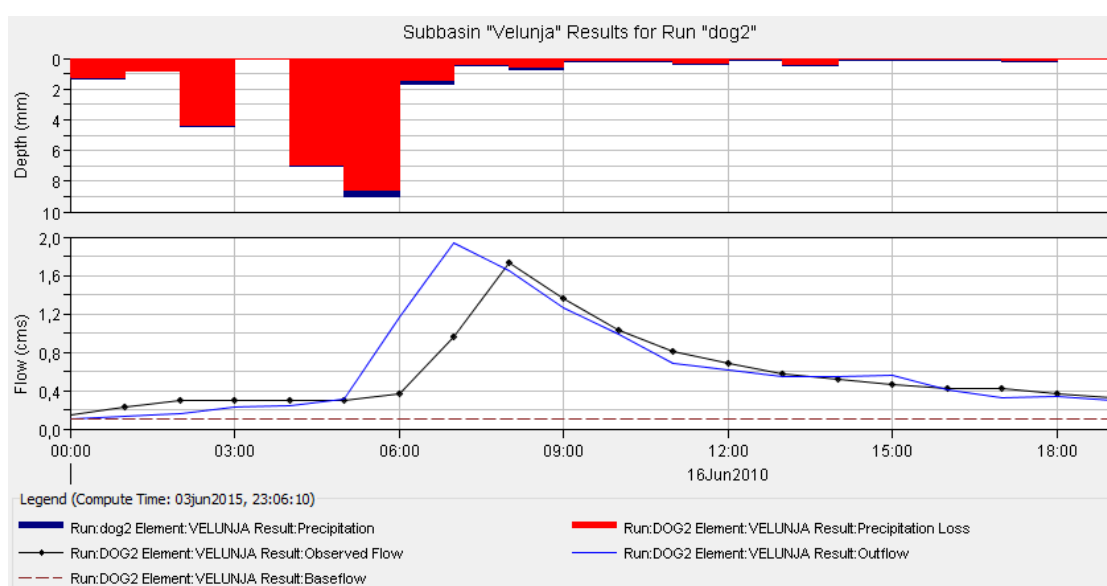
#### 4.3.3.1 Dogodek 15. 6. do 16. 6. 2010

Za prvi padavinski dogodek za validacijo modela, smo izbrali dogodek, ki se je zgodil v noči 15. 6. 2010

na 16. 6. 2010. Dogodek je trajal od 24:00 dne 15. 6. 2010 do 19:00 dne 16. 6. 2010, v tem času pa je padlo 28,8 mm dežja. Bazni odtok je pri tem znašal 0,1 m<sup>3</sup>/s. Rezultat modeliranja lahko vidimo na sliki 32.

Preglednica 19: Vhodni podatki za validacijo modela za padavinski dogodek 15/ 16. 6.2010

Vodotok	Datum	Trajanje dogodka [h]	Padavine [mm]	CN[/]	Tp[h]	Cp[/]
Velunja	15/ 16. 6. 2010	19	28,8	75	1	0,5



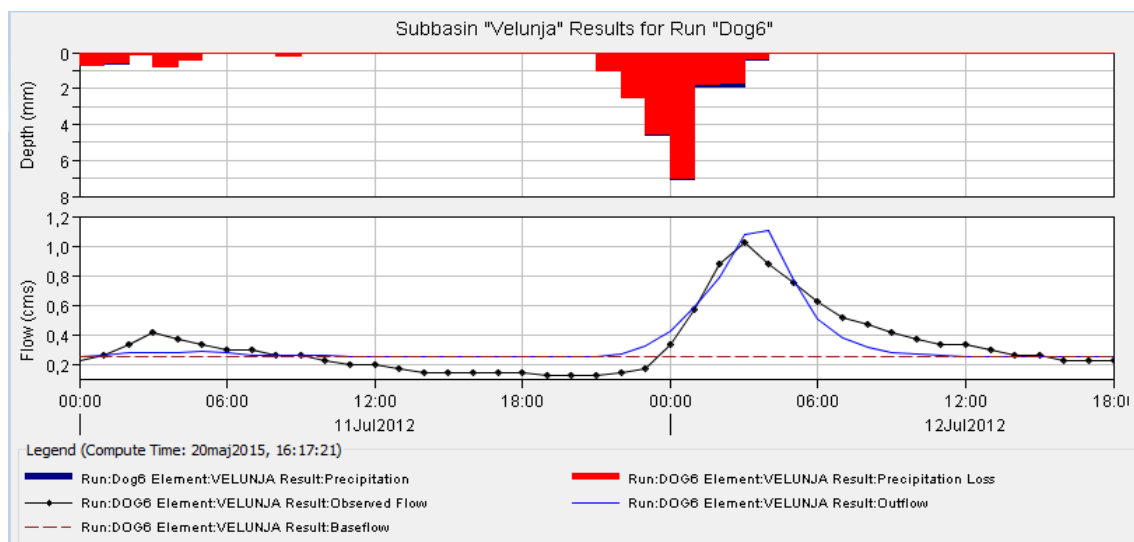
Slika 32: Validacija modela za padavinski dogodek 15/ 16. 6.2010

#### 4.3.3.2 Dogodek 11. 7. do 12. 7. 2012

Za drugi padavinski dogodek za validacijo, smo izbrali dogodek, ki se je zgodil v noči s 11. 7. 2012 na 11. 7. 2012. Dogodek je trajal od 24:00 dne 11. 7. 2012 do 18:00 dne 11. 7. 2012, v tem času pa je padlo 22,4 mm dežja. Bazni odtok je pri tem znašal 0,25 m<sup>3</sup>/s. Rezultat modeliranja lahko vidimo na sliki 33.

Preglednica 20: Vhodni podatki modela za padavinski dogodek 11/ 12. 7.2012

Vodotok	Datum	Trajanje dogodka [h]	Padavine [mm]	Cn[/]	Tp[h]	Začetne izgube Ia v [mm]
Velunja	11/ 12. 7.2012	18	22,4	75	1	0,5



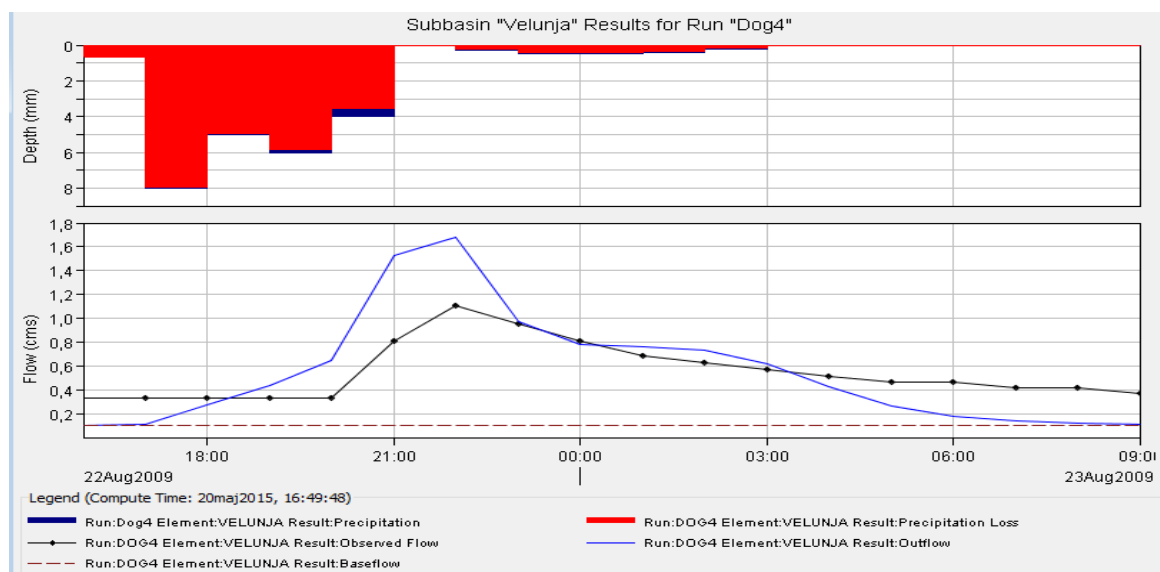
Slika 33: Validacija modela za padavinski dogodek 11/ 12. 7.2012

#### 4.3.3.3 Dogodek 22. 8. do 23. 8. 2009

Za tretji padavinski dogodek, smo izbrali dogodek, ki se je zgodil iz 22. 8. 2009 na 23. 8. 2009. Dogodek je trajal od 16:00 dne 22. 8. 2009 do 09:00 dne 23. 8. 2009, v tem času pa je padlo 26,8 mm dežja. Bazni odtok je pri tem znašal 0,1 m<sup>3</sup>/s. Rezultat modeliranja je prikazan na sliki 34.

Preglednica 21: Vhodni podatki za padavinski dogodek 22/ 23. 8. 2009

Vodotok	Datum	Trajanje dogodka [h]	Padavine [mm]	CN[/]	Tp[h]	Cp
Velunja	22 /23. 8. 2009	17	26,8	75	1	0,5

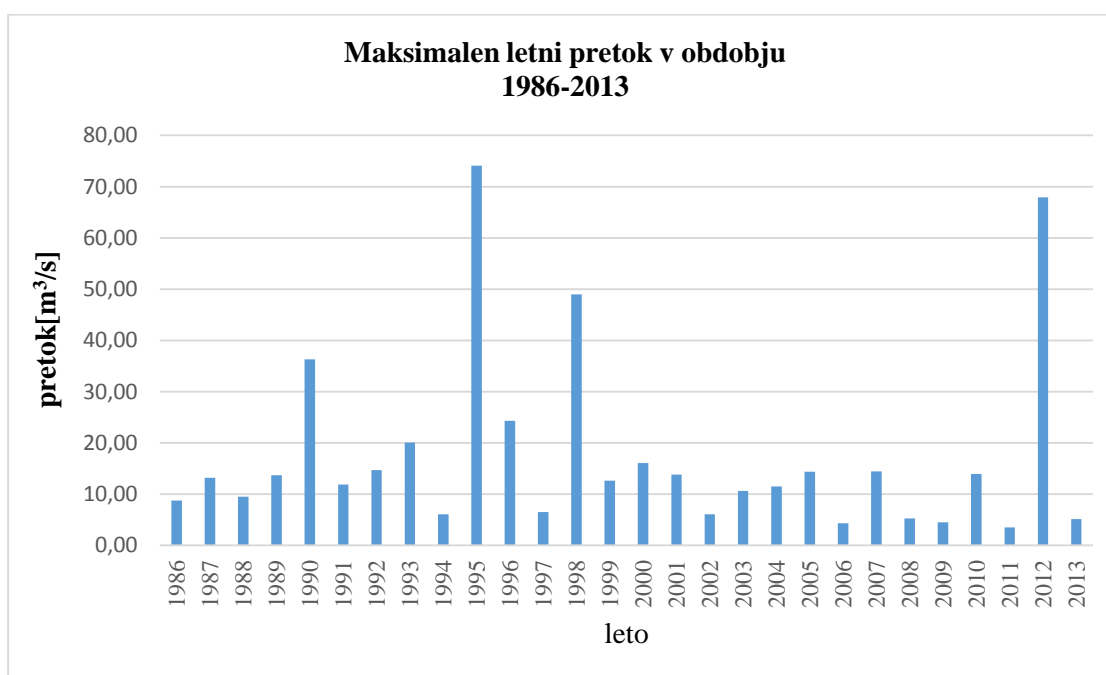


Slika 34: Validacija modela za padavinski dogodek 22/ 23. 8. 2009

## 4.4 Izračun projektних pretokov

### 4.4.1 Verjetnostna analiza

Merjeni pretoki Velunje so dostopni na spletni strani ARSO, ki tudi upravlja s postajo (ARSO, 2015d). Za verjetnostno analizo smo uporabili največje izmerjene letne vrednosti konic za vodomerno postajo Gaberke (slika 35). Uporabili smo podatke od leta 1986-2013.



Slika 35: Maximalni letni pretoki na vodomerni postaji Gaberke za vodotok Velunje

Za verjetnostno analizo visokovodnih konic obstaja vrsta teoretičnih verjetnostnih porazdelitev. Pogosto uporabljene v hidrologiji so Gaussova ali normalna porazdelitev, logaritemska normalna porazdelitev, porazdelitev gamma, Pearsonova III in logaritemska Pearsonova III porazdelitev in Gumbelova porazdelitev (Brilly in Šraj, 2005). V preglednici 22 so s petimi različnimi porazdelitvami izračunani projektni pretoki z 10- in 100-letno povratno dobo.

Za umestitev merjenih pretokov v verjetnostno mrežo pa smo podatke obdelali še z empirično porazdelitveno funkcijo po Weibulu:

$$F(x) = \frac{m}{(N+1)} \quad (33)$$

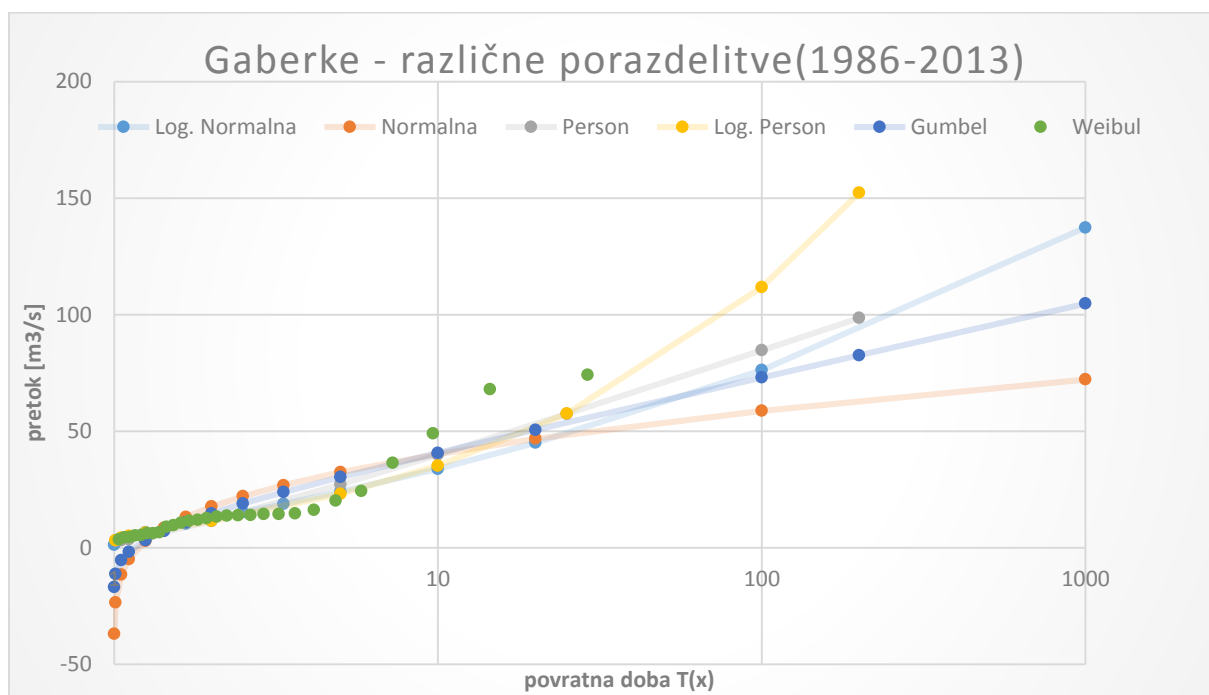
kjer je  $m$  mesto podatka v ranžirni vrsti ter  $N$  število vseh podatkov v vzorcu.

V hidrološki praksi se za opis verjetnosti pojava največkrat uporablja povratna doba. Zveza med povratno dobo  $T$  in porazdelitveno funkcijo  $F_x$  je predstavljena z naslednjo enačbo 2:

kjer je  $T(x)$  povratna doba in  $F(x)$  porazdelitvena funkcija

Preglednica 22: Rezultati verjetnostne analize maksimalnih dnevnih letnih pretokov Velunje v Gaberkah v obdobju 1986 – 2012

Povratna doba	Porazdelitev				
	Normalna	Log-normalna	Pearson III	Log-Pearson III	Gumbel
	Q [m <sup>3</sup> /s]	Q [m <sup>3</sup> /s]	Q [m <sup>3</sup> /s]	Q [m <sup>3</sup> /s]	Q [m <sup>3</sup> /s]
10 let	47	45	39	35	40
100 let	59	76	85	112	72



Slika 36: Rezultat verjetnostne analize pretokov Velunje na vodomerni postaji Gaberke s petimi različnimi porazdelitvami

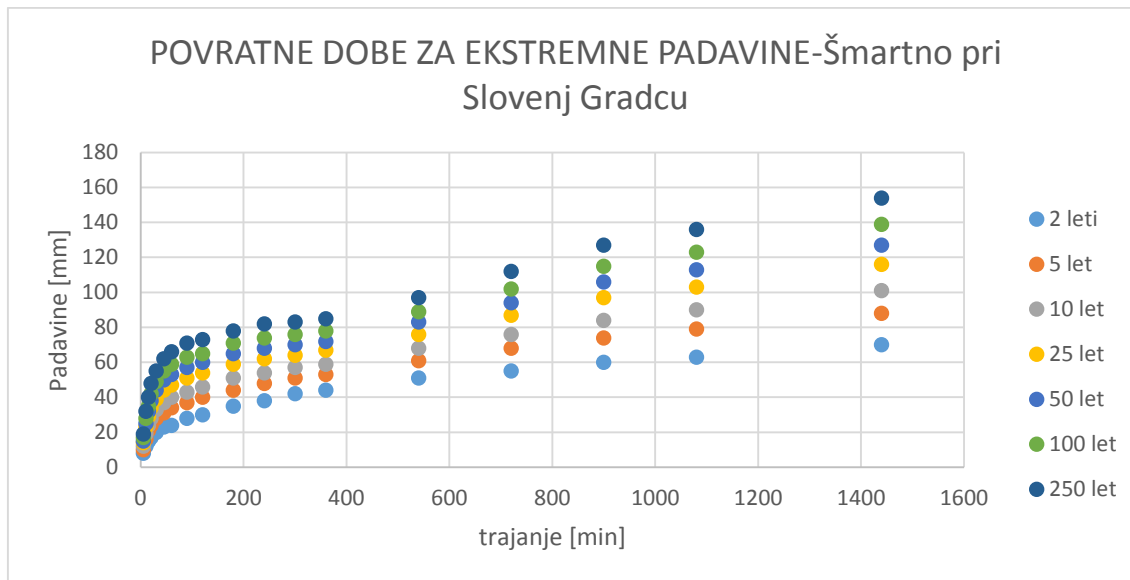
Za najprimernejšo porazdelitveno funkcijo za postajo Gaberke smo izbrali logaritemsko Pearsonovo III porazdelitev.

#### 4.4.2 Modelsko določanje projektnih pretokov

S pomočjo izdelanega hidrološkega modela porečja in podatkov ARSO o padavinah z 10- in 100- letno povratno dobo (ITP krivulje) za padavinsko postajo Šmartno pri Slovenj Gradcu smo izračunali



pripadajoče projektne pretoke v izbranem merskem profilu (na lokaciji vodomerne postaje Gaberke) porečja Velunje. Vhodni podatki v model so prikazani v preglednici 23.

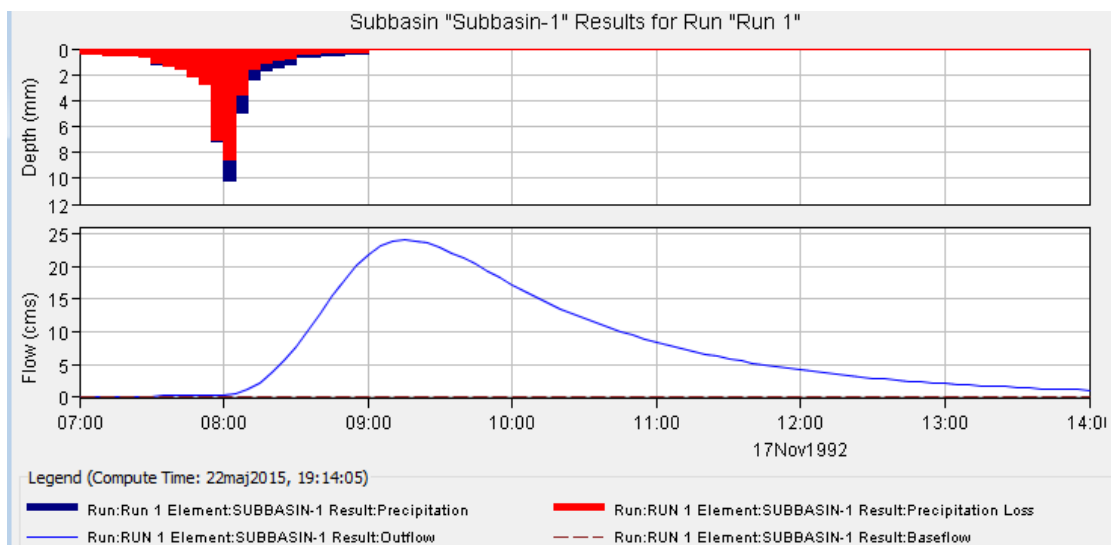


Slika 37: Povratne dobe za ekstremske padavin na postaji Šmartno pri Slovenj Gradcu

Preglednica 23: Vhodni podatki za HEC-HMS za izračun visokovodnih valov

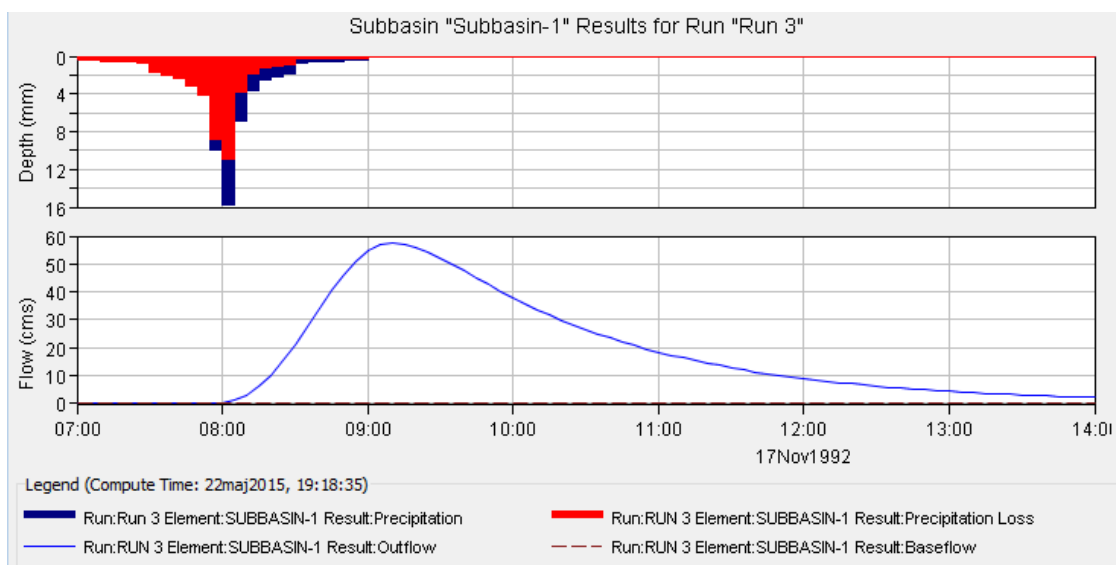
Vhodni podatki za HEC-HMS		Povratne dobe padavin v [mm]		
		Čas [min]	10 let	100 let
površina prispevnega območja [A]	27,44 km <sup>2</sup>			
začetne izgube [Ia]	16,9 mm	5 min	12	17
koeficient [CN]	75	15 min	24	35
neprepustne površine [I]	1 %	60 min	40	59
čas zakasnitve [Tp]	1 h	120 min	46	65
koeficient maksimalnega pretoka (Cp)	0,5			

Na slikah 38 in 39 so prikazani rezultati modeliranja.



Slika 38: Visokovodni val z 10-letno povratno dobo padavin

Maksimalen pretok z 10-letno povratno dobo znaša  $24\text{m}^3/\text{s}$ . Količina učinkovitih padavin je znašala 44,3 mm, izgub pa 37 mm.



Slika 39: Visokovodni val z 100-letno povratno dobo padavin

Maksimalen pretok znaša  $57,5\text{ m}^3/\text{s}$ . Količina učinkovitih padavin je znašala 63 mm, izgub pa 46 mm.

## 5 ANALIZA

### 5.1 Analiza rezultatov HEC-HMS za umerjanje modela

Za umerjanje modela porečja Velunje do Gaberk s pomočjo programa HEC-HMS smo izbrali padavinske dogodke 04/ 05.5. 2013, 18/ 19.7. 2011 in 04/ 06.11. 2012. Primerjava rezultatov modela in meritev ter odstopanja so prikazana v preglednicah 24 do 26.

Preglednica 24: Prikaz rezultatov umerjanja modela za porečje Velunje

<b>MODEL</b>			
<b>Dogodek</b>	<b>max pretok (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>volumen odтока (1000m<sup>3</sup>)</b>	<b>čas nastopa vrha odтока od pričetka nevihte(hh:mm)</b>
04/ 05.5. 2013	1,9	46,6	20:00
18/ 19.7. 2011	1,2	34,9	18:00
04/ 06.11. 2012	56,9	2398,5	12:00

Preglednica 25: Prikaz podatkov merjenih dogodkov za porečje Velunje

<b>MERITEV</b>			
<b>Dogodek</b>	<b>max odtok (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>volumen odтока (m<sup>3</sup>)</b>	<b>čas nastopa vrha odтока od pričetka nevihte(hh:mm)</b>
04/ 05.5. 2013	1,91	47,24	19:00
18/ 19.7. 2011	1,18	30,72	17:00
04/ 06.11. 2012	61,7	2186,79	12:00

Preglednica 26: Odstopanja rezultatov modela in meritev

<b>ODSTOPANJE MODEL-MERITEV (%)</b>			
<b>Dogodek</b>	<b>max odtok</b>	<b>volumen odтока</b>	<b>Razlika v času (hh:mm)</b>
04/ 05.5. 2013	0,53 %	1,37 %	- 01:00
18/ 19.7. 2011	-1,67 %	-0,90 %	- 01:00
04/ 06.11. 2012	10,57 %	0,01 %	00:00

Na podlagi analize umerjenih modelov lahko ugotovimo, da se konica hidrograma pri merjenem odtoku pojavi v dveh primerih eno uro prej, medtem ko se v tretjem primeru pojavi ob istem času kot pri meritvi. Merjeni in modelirani maksimalni odtok in volumen odtoka se v prvih dveh primerih razlikujeta do 2 %. V tretjem primeru pa so bile razlike 0,01 % za volumen in 10 % za maksimalni odtok. Sklepamo, da

je razlog v veliki količini padavin in posledično je bil pretok veliko večji, kar seveda lahko hitro poveča tudi odstopanje.

## 5.2 Analiza rezultatov HEC-HMS za validacijo modela

Za validacijo modela porečja Velunje s pomočjo programa HEC-HMS smo izbrali padavinske dogodke 15/ 16. 6. 2010, 11/ 12. 7. 2012 in 22/ 23. 8. 2009. Primerjava rezultatov modela in meritev ter odstopanja so prikazana v preglednicah 27 do 29.

Preglednica 27: Prikaz rezultatov validacije modela za porečje Velunje

<b>MODEL</b>			
<b>Dogodek</b>	<b>max odtok (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>volumen odтока (1000 m<sup>3</sup>)</b>	<b>čas nastopa vrha odтока od pričetka nevihte(hh:mm)</b>
15/ 16. 6. 2010	1,9	44,2	07:00
11/ 12. 7. 2012	1,1	52,4	04:00
22/ 23. 8. 2009	1,7	35,1	12:00

Preglednica 28: Prikaz podatkov merjenih dogodkov za porečje Velunje

<b>MERITEV</b>			
<b>Dogodek</b>	<b>max odtok (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>volumen odтока (1000 m<sup>3</sup>)</b>	<b>čas nastopa vrha odтока od pričetka nevihte(hh:mm)</b>
15/ 16. 6. 2010	1,73	40,75	08:00
11./12. 7. 2012	1,03	50,25	03:00
22./23. 8. 2009	1,1	34,26	12:00

Preglednica 29: Odstopanja rezultatov modela in meritev

<b>ODSTOPANJE MODEL-MERITEV (%)</b>			
<b>Dogodek</b>	<b>max odtok</b>	<b>volumen odтока</b>	<b>Razlika v času(hh:mm)</b>
15/ 16. 6. 2010	-8,95 %	1,37 %	+ 01:00
11/ 12. 7. 2012	-6,36 %	-4,10 %	- 01:00
22/ 23. 8. 2009	-35,29 %	-2,39 %	00:00

Na podlagi analize rezultatov validacije modela ugotovimo, da se konica hidrograma pri merjenem odtoču pojavi v enem primeru eno uro prej, v drugem pa uro pozneje. Medtem ko se v tretjem primeru pojavi ob isteč času, kot pri merjenem dogodku. Pri prvem dogodku je razlika v maksimalnem odtoču 9 %, a je odstopanje volumnov le 1,4 %. Pri drugi meritvi je bilo ravno obratno. Pri tretjem dogodku je

odstopanje v konici pretoka največje in sicer 35 %, je pa ujemanje volumnov dobro. Do takega odstopanja je verjetno prišlo zato, ker se je dogodek zgodil sredi avgusta, ko je bila sušno obdobje. V 4 urah je takrat zapadlo 23 mm padavin. Zaradi izsušenih tal, so se padavine v večji meri infiltrirale, česar pa model ne zmore dovolj dobro simulirati. Ugotovimo torej lahko, da smo volumen odtoka izračunali v povprečju na 2,3 % natančno, medtem ko smo maksimalen odtok izračunali v povprečju na 7 % natančno.

Čas pojava konice smo dobili v 2 primerih zelo natančno, v štirih primerih pa so se modelirane in izmerjene vrednosti razlikovale za 1 uro.

Sklepamo, da do razlik prihaja predvsem zaradi različnih obdobj v letu in različne predhodne namočenosti tal. Na primer dogodek 22/ 23. 8. 2009 je nastopil v sušnem obdobju, dogodek 04/ 06.11. 2012 pa je nastopil v deževnem obdobju. Pri dogodku, ki se je zgodil v avgustu, smo dobili z modelom prevelik maksimalni pretok, medtem ko smo pri dogodku, ki se je zgodil v novembru, dobili premajhnega. Medtem, ko so v novembru zemljine že namočene in je posledično delež odtoka večji kot pri padavinskem dogodku, ko se večji delež padavin infiltrira. Ostali štirje dogodki so se zgodili v mesecu maju, juniju in juliju. Predpostavljamo, da so zato razlike med merjenimi in modeliranimi vrednostmi manjše.

### 5.3 Primerjava rezultatov projektnih pretokov

Primerjava projektnih pretokov, dobljenih z verjetnostno analizo in modelom je pokazala, da dobimo z verjetnostno analizo veliko višje vrednosti (preglednica 33). Sicer so večinoma te razlike vedno velike, a največkrat dobimo višje vrednosti z modelom. Prvi razlog je predvsem v tem, ker predpostavimo, da padavine z določeno povratno dobo, povzročijo odtok z enako povratno dobo. Drugi razlog pa je ta, da pri modeliranju uporabljamo sintetični naliv, ki je dejansko sestavljen iz ekstremnih vrednosti več nalivov različnih trajanj. V našem primeru pa je razlika verjetno posledica različnega obdobja in vpliva podnebnih sprememb, saj je verjetnostna analiza narejena za obdobje 1986-2013, ITP krivulje pa smo pridobili za obdobje 1970-2009.

Preglednica 30: Projektni pretoki za 10- in 100-letno povratno dobo

VELUNJA		
Povratna doba(leta)	Qmax(m <sup>3</sup> /s) Log. person III	Qmax(m <sup>3</sup> /s) HEC-HMS
10	35	24
100	112	57,5

## 6 ZAKLJUČKI

V diplomski nalogi smo predstavili primer izdelave hidrološke študije visokih valov z določitvijo dejanskih maksimalnih pretokov in volumnov visokovodnih valov. V nalogi smo predstavili pripravo vseh potrebnih podatkov za tovrstne analize in osnove za izdelavo hidrološkega modela s pomočjo programa HEC–HMS. Topografske karakteristike porečja smo določili s programskim orodjem SAGA-GIS.

Na podlagi podatkov o padavinah in pretoku, ki nam jih je posredovala Agencija RS za okolje, smo izdelali hidrološki model porečja Velunje do vodomerne postaje Gaberke. Model smo umerili in preverili. Izbrali smo tri padavinske situacije, na podlagi katerih smo model umerili, z dodatnimi tremi pa smo ga validirali.

Za vodomerno postajo Gaberke smo izdelali tudi verjetnostno analizo visokovodnih konic, hkrati pa tudi z modelom izračunali visokovodne valove s povratno dobo 10 in 100 let. Tako izračunane hidrograme površinskega odtoka in projektne pretoke lahko uporabimo neposredno ali pa v povezavi s katero drugo programsko opremo za različne študije, kot so napovedovanje poplavnih valov, ugotavljanje odtoka s povodij, modeliranje pregrad in prepustov, študije vpliva urbanizacije na odtok, izdelavo opozorilne karte poplav in podobno.

Odtok z določenega porečja je težko dobro določiti, potrebno je veliko časa in volje da pridemo do končnih rezultatov. Zamudna je predvsem priprava vseh potrebnih podatkov, kot so npr. izračuni časov zakasnitve in koncentracij po različnih metodah. Umerjanje modela mora potekati na več različnih dogodkih, če želimo model ustrezno umeriti in ga uporabiti tudi za namen hidrološke napovedi.

Ugotovili smo, da ima velik vpliv na končni rezultat v HEC-HMS-ju tudi obdobje v letu, saj program sam ne predpostavlja, da je v obdobju od junija do avgusta v Sloveniji večinoma sušno obdobje in da se zaradi tega veliko več padavin infiltrira v podtalje. Največja pomanjkljivost tega modela je torej neupoštevanje predhodne vlažnosti zemljine. Kljub temu pa smo prišli do zadovoljivih rezultatov in tako prikazali celovit in praktičen primer izračuna odtoka z manjšega porečja.

**VIRI**

ARSO. 2015a. Padavinski podatki. Message to: Vičar, Z., 10. 3. 2015. Osebna komunikacija.

ARSO. 2015b. Povratne dobe za ekstremne padavine. [http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/tables/precip\\_return\\_periods\\_newe](http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/tables/precip_return_periods_newe) (Pridobljeno 12. 5. 2015.)

ARSO. 2015c. Povprečna letna višina korigiranih padavin in meteorološke postaje s podatki o ekstremnih padavinah. <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/maps/> (Pridobljeno 5. 5. 2015.)

ARSO. 2015d. Arhivski hidrološki podatki. [http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov\\_arhiv\\_tab.php](http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php) (Pridobljeno 4. 5. 2015.)

Bedient, P. B. Huber, W. C. in Vieux, B. E. 2008. Hydrology and floodplain analysis, Upper Saddle River: Prentice Hall.: 795 str.

Brilly, M. 1993. Priročnik za program HEC 1. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 122 str.

Brilly M., Šraj M. 2006. Modeliranje površinskega odtoka in navodila za program HEC- HMS: Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 167 str.

Brilly, M., Šraj, M. 2005. Osnove hidrologije. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 304 str.

Dirnbek, L., Šraj, M. 2010. Hidrološko modeliranje: Vpliv histograma padavin na hidrogram površinskega odtoka = Hydrological modelling: The influence of precipitation hyetograph on runoff hydrograph. Gradbeni vestnik 59/3: 48–56.

Fang, X., Pradhan, P., Malla, R. 2006. Estimating time of concentration for Texas watersheds. Texas, Lamar University, Department of Civil Engineering: 14 str.

Gray, D.M. 1973. A general text with special Emphasis on Canadian conditions. V: Gray, D.M. Handbook on the principles of Hydrology. Port Washington: 691 str.

Geopedia. 2015. [http://www.geopedia.si/#T105\\_x499072\\_y112072\\_s9\\_b4](http://www.geopedia.si/#T105_x499072_y112072_s9_b4) (Pridobljeno 2. 3. 2015.)

Golob, A. 2012. Analiza časovnih parametrov hidrograma za izbrana področja. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Golob): 86 str.

Goranc, N. 2012. Izdelava in primerjava ITP krivulj z različno izbiro porazdelitev. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba N. Goranc): 93 str.

Feldman, A. D. 2000. Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Tehnični priročnik, 20 Massachusetts Ave., NW Washington, DC, HQ U.S. Army Corps of Engineers: 149 str.

Kozakiv, D. 2013. Vpliv vegetacije na vodno bilanco porečja. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Kozakiv): 113 str.

Lutra. 2015. Kroženje vode. Inštitut za ohranjanje naravne dediščine. <http://izobrazevanje.lutra.si/krozenje-vode.html> (Pridobljeno 15. 5. 2015.)

Mikoš, M., Krajnc, A., Matičič, B., Müller, J., Rakovec, J., Roš, M., Brilly, M. 2003. Hidrološko izrazje = Terminology in hydrology. Acta hydrotechnica: 20, 32. [ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a32\\_1.pdf](ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a32_1.pdf) (Pridobljeno 15. 5. 2015.)

Minh Nhat, L., Tachikawa, Y., Takara, K. 2006. Establishment of Intensity-Duration-Frequency Curves for Precipitation in the Monsoon Area of Vietnam. Annuals of Disaster Prevention Research Institute. Kyoto University, 49 B: 93–103.

Rao, R.A., Delleur, J.W. 1973. Instantaneous unit hydrographs, peak discharges and time lags in urban basins. Lafayette, Purdue University: 14 str.

SAGA-GIS. 2015. SAGA-GIS. <http://www.saga-gis.org/> (Pridobljeno 17. 2. 2015)

Shaw, E.M.1994. Hydrology in practice.London,Taylor and Francis Group: 628 str.

Sorè , A. 1957. Šaleška dolina [http://zgs.zrc-sazu.si/Portals/8/Geografski\\_vestnik/Pred1999/GV\\_27\\_01\\_044\\_086.pdf](http://zgs.zrc-sazu.si/Portals/8/Geografski_vestnik/Pred1999/GV_27_01_044_086.pdf): 86 str. (Pridobljeno 17. 4. 2015)

Sovre, K. 2009. Hidrološka študija visokih voda Bistrice v porečju Sotle. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezija (samozaložba K. Sovre): 113 str.



Stavbar, G. 2011. Pregled odprtokodnih programov za obdelavo lidarskih podatkov, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 106 str.

Timing parameters, 2005. Literatur review on timing parameters for hydrographs. Project Number 0-4696 Research Project Title: "Estimating Timing Parameters of Direct Runoff and Unit Hydrograph for Texas Watersheds" 82 str. <http://www.depts.ttu.edu/techmrtweb/Reports/Complete%20Reports/4696%20complete.pdf>: (Pridobljeno 5. 5. 2015.)

Tinta, T. 2011. Hidrogram enote v hidroloških modelih. Diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezija (samozaložba T. Tinta): 105 str.

US Army Corps of Engineers. 2000. Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Tehnical Reference Manual: 149 str.

US Army Corps of Engineers. 2015. HEC-HMS software. <http://www.usace.army.mil/> (Pridobljeno 5. 5. 2015.)

Zemljevidi. 2012. Zemljevid Slovenija. [http://www.hervardi.com/zemljevidi/slovenija\\_relief.jpg](http://www.hervardi.com/zemljevidi/slovenija_relief.jpg) (Pridobljeno 5. 5. 2015.)

WMO, 1994. Guide to Hydrological practices, No. 168, Fifth edition: 735 str.