

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Heco, D., 2015. Določanje parametra CN za manjše porečje. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Šraj, M., somentor Bezak, N.): 64 str.

Datum arhiviranja: 23-07-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



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

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

This is original version of final thesis.

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

Heco, D., 2015. Določanje parametra CN za manjše porečje. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Šraj, M., co-supervisor Bezak, N.): 64 p.

Archiving Date: 23-07-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM VODARSTVO IN
KOMUNALNO INŽENIRSTVO

Kandidat:

DAMIR HECO

DOLOČANJE PARAMETRA CN ZA MANJŠE POREČJE

Diplomska naloga št.: 262/VKI

DETERMINATION OF RUNOFF CURVE NUMBER FOR SMALL WATERSHED

Graduation thesis No.: 262/VKI

Mentorica:

doc. dr. Mojca Šraj

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Dušan Žagar

Somentor:

asist. Nejc Bezak

Ljubljana, 09. 07. 2015

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Damir Heco izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Določanje parametra CN za manjše porečje«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 2. 7. 2015

Damir Heco

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 556.1:556.5(043.2)
- Mentor:** doc. dr. Mojca Šraj
- Somentor:** asist. Nejc Bezak
- Naslov:** Določanje parametra CN za manjše porečje
- Tip dokumenta:** Dipl. nal.-UNI
- Obseg in oprema:** 64 str., 16 pregl., 37 sl., 21 en.
- Ključne besede:** parameter CN, padavine, odtok, SCS-CN metoda, hidrogram

Izvleček

Parameter CN se v hidrologiji uporablja za oceno površinskega odtoka, ki ga povzroči določena količina padavin. Ocenimo ga na podlagi rabe tal in lastnosti zemljine. Poznavanje lastnosti porečja in njegove sposobnosti ustvariti odtok zaradi padavin je ena izmed ključnih raziskovalnih tem v hidrologiji. Pomembno vlogo pri tem igra parameter CN, ki smo ga v diplomski nalogi določili za manjše porečje Mačkovega grabna po štirih metodah, in sicer po pogosto uporabljeni empirični SCS metodi na podlagi rabe tal in tipa zemljine, iz meritev pretokov in padavin za vsak obravnavani padavinski dogodek posebej, z metodo asimptotičnega pristopa ter s hidrološkim modelom, ki smo ga s pomočjo merjenih padavin in pretokov umerili in validirali. Dobljene rezultate oziroma vrednosti parametra CN po različnih metodah smo med seboj primerjali in analizirali. Realne vrednosti parametra so se gibale od 60,7 do 74,5. Na koncu smo analizirali še vpliv sezonskosti na oceno parametra CN.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

- UDC:** 556.1:556.5(043.2)
- Author:** Damir Heco
- Supervisor:** Assist. Prof. Mojca Šraj, Ph.D.
- Co-advisor:** Assist. Nejc Bezak
- Title:** Determination of runoff curve number for small watershed
- Document type:** Graduation Thesis – University studies
- Scope and tools:** 64 p., 16 tab., 37 fig., 21 eq.
- Keywords:** runoff curve number, rainfall, runoff, SCS-CN method, hydrograph

Abstract

Runoff curve number (CN) is a parameter used in hydrology for predicting runoff from rainfall excess, depending on the land use and soil type. Knowledge about the characteristics of the watershed and its ability to generate runoff from rainfall is one of the key research topics in hydrology. An important factor is the CN parameter. The CN parameter for the small catchment Mačkov graben was determined using four different approaches: commonly used empirical SCS method, which is based on land use and soil type, using rainfall-runoff data, with asymptotic approach and with hydrological model, which was calibrated and validated using the measured rainfall and runoff data. We have also compared and analysed the runoff curve numbers, which were obtained with different methods. Useful values were between 60,7 and 74,5. Furthermore, analysis of the seasonality of the CN parameter were performed.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorici doc. dr. Mojci Šraj in asist. Nejcju Bezaku za vse strokovne nasvete in pomoč, ki sta mi jo nudila pri izdelavi diplomske naloge.

Zahvalil bi se tudi staršema in bratu, ki so me v času študija podpirali, spodbujali in mi vseskozi stali ob strani.

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
KAZALO VSEBINE	VI
KAZALO PREGLEDNIC	VIII
KAZALO SLIK	IX
1 UVOD	1
1.1 Cilj diplomskega dela	2
2 PADAVINE IN ODTOK	3
2.1 Padavine	3
2.2 Padavinske izgube	4
2.3 Površinski odtok	4
2.4 Hidrogram odtoka	5
2.5 Bazni odtok.....	6
2.5.1 Izločanje baznega odtoka	7
2.5.1.1 Grafične metode izločanja baznega odtoka.....	7
2.5.1.2 Tri-točkovna metoda izločanja baznega odtoka.....	9
2.6 Neodvisnost zaporednih konic visokovodnih valov.....	10
3. METODA SCS-CN.....	11
3.1 Razvoj metode skozi zgodovino	12
3.2 Enačba SCS-CN	13
3.3 Prednosti in pomanjkljivosti metode SCS-CN	15
3.4 Parameter CN.....	16
3.4.1 Določanje parametra CN na podlagi meritev	19
3.4.2 Določanje parametra CN z asimptotičnim pristopom	20
3.5 Program HEC-HMS.....	25
4 REZULTATI.....	26

4.1 Porečje Mačkovega grabna	26
4.1.1 Osnovni podatki.....	26
4.1.2 Podnebje	28
4.1.3 Hidrografske in hidrološke lastnosti	29
4.1.4 Topografija	29
4.1.5 Geologija	30
4.1.6 Pedologija	32
4.1.7 Pokrovnost tal in raba prostora.....	34
4.2 Meritve in merska oprema.....	35
4.3 Teoretična določitev parametra CN po metodi SCS-CN.....	38
4.4 Določanje parametra CN na podlagi meritev padavin in pretokov	39
4.4.1 Izločanje baznega odtoka s tri-točkovno metodo	40
4.4.2 Izračun parametra CN iz meritev	41
4.5 Določanje parametra CN z asimptotično metodo	44
4.6 Določanje parametra CN s hidrološkim modelom v programu HEC-HMS	45
4.6.1 Umerjanje modela	45
4.6.1.1 Padavinski dogodek 20.8. 2014/21.8.2014.....	46
4.6.1.2 Padavinski dogodek 3.11.2013/3.11.2013.....	46
4.6.1.3 Padavinski dogodek 22.3.2014/23.3.2014.....	47
4.6.2 Validacija modela	48
4.6.2.1 Padavinski dogodek 24.8.2013/24.8.2013.....	48
4.6.2.2 Padavinski dogodek 4.1.2014/6.1.2014	49
5 ANALIZA IN PRIMERJAVA REZULTATOV.....	51
5.1 Primerjava vrednosti parametra CN po različnih metodah	51
5.2 Sezonska odvisnost parametra CN	52
5.3 Odvisnost med merjenim in ocenjenim odtokom.....	56
6 ZAKLJUČKI	59
VIRI	61

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: SCS klasifikacija zemljin in infiltracijske izgube v odvisnosti od vrste zemljine (Brilly in Šraj, 2006).....	16
Preglednica 2: Koeficienti CN za urbanizirane površine (USACE, 2000).....	17
Preglednica 3: Koeficienti CN za obdelana kmetijska zemljišča (USACE, 2000).....	18
Preglednica 4: Koeficienti CN za ostala kmetijska zemljišča (USACE, 2000).....	19
Preglednica 5: Osnovne lastnosti eksperimentalnega porečja Mačkov graben (Rusjan, 2015)	27
Preglednica 6 : Opis posameznih geoloških enot porečij Kuzlovca, Mačkovega grabna in Gradaščice (Rusjan, 2015)	31
Preglednica 7: Opis posameznih pedoloških enot porečij Kuzlovca, Mačkovega grabna in Gradaščice (Rusjan, 2015)	33
Preglednica 8: Opis posameznih šifrantov iz karte pokrovnosti in rabe prostora (Rusjan, 2015)	34
Preglednica 9: Parameter CN za posamezne rabe tal na porečju mačkovega grabna	38
Preglednica 10: 47 padavinskih dogodkov na Mačkovem grabnu, razporejenih po količini padavin	42
Preglednica 11: Primerjava parametrov CN določenih z različnimi metodami	51
Preglednica 12: Letni časi in pripadajoči meseci	53
Preglednica 13: Padavinski dogodki v pomladnih mesecih	54
Preglednica 14: Padavinski dogodki v poletnih mesecih	54
Preglednica 15: Padavinski dogodki v jesenskih mesecih	54
Preglednica 16: Padavinski dogodki v zimskih mesecih	55

KAZALO SLIK

Slika 1: Histogram padavin	3
Slika 2: Posamezni deli padavinskega odtoka (Brilly in Šraj, 2005).....	4
Slika 3: Lastnosti hidrograma odtoka (Brilly in Šraj, 2005)	5
Slika 4: Deleži posameznih odtokov na hidrogramu (Brilly in Šraj, 2005)	6
Slika 5: Iskanje določitve prevojne točke (Pugelj, 2012).....	8
Slika 6: Retardacijske krivulje (Povzeto po Brilly in Šraj, 2005).....	9
Slika 7: Tri-točkovna ali konkavna metoda izločanja baznega odtoka (Pugelj, 2012)	9
Slika 8: Odvisni zaporedni konici visokovodnega vala (Pugelj, 2012).....	10
Slika 9: Padajoči tip krivulje (povzeto po Hawkins, 1993).....	22
Slika 10: Standardni tip krivulje (povzeto po Hawkins, 1993)	23
Slika 11: Naraščajoči tip krivulje (povzeto po Hawkins, 1993).....	24
Slika 12: Lokacija porečja Gradaščice na karti Slovenije (Rusjan, 2015).....	26
Slika 13: Eksperimentalno porečje hudournika Mačkov graben na modelu terena iz Google Zemlja (Rusjan, 2015).....	27
Slika 14: Hudourniška pregrada v hudourniškem območju Mačkovega grabna (foto: Heco, 2015)	28
Slika 15 in 16: Struga hudourniškega potoka Mačkov graben (foto: Heco, 2015).....	29
Slika 17: Digitalni model višin (DMV) eksperimentalnega porečja Mačkov graben (Rusjan, 2015)	30
Slika 18: Geološka karta porečij Kuzlovca, Mačkovega grabna in Gradaščice (Rusjan, 2015)	31
Slika 19: Pedološka karta porečij Kuzlovca, Mačkovega grabna in Gradaščice (Rusjan, 2015)	32
Slika 20 : Pokrovnost in raba prostora porečja Mačkovega grabna (Rusjan, 2015).....	34
Slika 21: Lokacija merilnih mest na eksperimentalnih porečjih Kuzlovec in Mačkov graben (Bezák et al., 2013).....	35
Slika 22: Disdrometer OTT Parsivel v Ljubljani (Bezák et al., 2013).....	37
Slika 23: Disdrometer Thies Clima in avtomatični dežemer na Črnem Vrhu nad Polhovim Gradcem (Bezák et al., 2013)	37
Slika 24: Hidrogram za padavinski dogodek od 11.5.2013, 1:40 do 12.5.2013, 6:00.....	40
Slika 25: Vrednosti CN za padavinske dogodke, večje od 20 mm in večje od 30 mm	43
Slika 26: Primerjava empirične in asimptotične krivulje ter prikaz določenih vrednosti CN v odvisnosti od višine padavin	44
Slika 27: Umerjanje modela za padavinski dogodek 20.8. 2014/21.8.2014	46
Slika 28: Umerjanje modela za padavinski dogodek 3.11.2013/3.11.2013.....	47

Slika 29: Umerjanje modela za padavinski dogodek 22.3.2014/23.3.2014	48
Slika 30: Validacija modela za padavinski dogodek 24.8.2013/24.8.2013	49
Slika 31: Validacija modela za padavinski dogodek 4.1.2014/6.1.2014	50
Slika 32: Povprečna vrednost CN glede na letni čas	53
Slika 33: Povprečna vrednost parametra CN po mesecih	55
Slika 34: Odvisnost med merjenim in ocenjenim odtokom pri parametru CN po metodi SCS	56
Slika 35: Odvisnost med merjenim in ocenjenim odtokom pri povprečnem parametru CN pridobljenim iz meritev padavin in pretokov.....	57
Slika 36: Odvisnost med merjenim in ocenjenim odtokom pri parametru CN po metodi z asimptoto	57
Slika 37: Odvisnost med merjenim in ocenjenim odtokom pri parametru CN po umeritvi modela v programu HEC-HMS.....	58

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

Parameter CN (angl. *Curve number coefficient*) se v hidrologiji uporablja za oceno odtoka, ki ga povzroči določena količina padavin. Parameter CN lahko ocenimo na podlagi rabe tal in lastnosti zemljine. Določanje površinskega odtoka iz podatkov o padavinah je osnova vseh hidroloških študij, napovedovanja poplav in urejanja vodotokov ipd. Pri določanju površinskega odtoka je pomembno, da poznamo lastnosti porečja in vpliv, ki ga bodo te lastnosti imele na odtok.

Metoda SCS-CN je ena izmed najpogosteje uporabljenih metod za oceno površinskega odtoka na podlagi podatkov o padavinah. Priljubljena je zaradi njene enostavnosti ter enostavnega razumevanja in uporabe. Metoda pri določitvi odtoka zajame vpliv lastnosti porečja, kot so tip in predhodna vlažnost zemljine, raba tal in odtočni potencial. Metoda SCS-CN je bila na začetku v uporabi za manjša kmetijska porečja, kasneje pa se je njena uporaba razširila na urbana in gozdnata območja (Mishra et al., 2003).

Z določanjem parametra CN po metodi SCS-CN za manjša porečja se je ukvarjalo že veliko raziskovalcev (Banasik in Woodward, 2010; Tedela et al., 2012; Nalbantis et al., 2012; Sahu et al., 2012; Sumarauw in Ohgushi, 2012). Z raziskavami so se pokazale tudi prednosti in slabosti metode. Kljub vsemu so raziskovalci prišli do zaključka, da je z metodo SCS-CN mogoče zadovoljivo oceniti površinski odtok (Ponce in Hawkins, 1996).

Parameter CN se ne razlikuje samo med območji z različno rabo tal, ampak se spreminja tudi časovno, v odvisnosti od letnega časa. Z namenom bolj natančne določitve CN za posamezna porečja, so bile izvedene raziskave vpliva mesečnih vrednosti CN na površinske odtoke določenega porečja. Gundalia in Dholakia (2014) sta določila parameter CN za različne mesece monsunske sezone za porečje reke Ozat. Tako je bil površinski odtok, ki se pričakuje v času monsuna določen natančneje, kot bi bil v primeru, če bi določali parameter CN za celotno leto.

Slovenija je vodnata in gozdnata država z gosto prepletenimi rečnimi strugami. 8.000 km hudournikov odvodnjava skoraj 400 hudourniških območij. Gosta hidrografska mreža tekočih površinskih voda (26.989 km strug vodotokov, povprečna gostota 1,33km/km²) je nastala zaradi visokih letnih padavin in slabo prepustne podlage (Mikoš, 2007). Posledično prihaja tudi do poplavljanja vodotokov, kar je v preteklosti že imelo katastrofalne posledice. Od leta 1926 je bilo v Sloveniji zaradi poplav že 74 smrtnih žrtev (Katedra za splošno hidrotehniko, 2015). Zato je ključnega pomena, da poznamo porečja, njihove lastnosti ter vpliv na odtok, ki ga bodo ustvarile padavine. Natančna ocena odtoka, ki ga bodo povzročile padavine na

določenem porečju je ključna pri urejanju voda, varstvu pred poplavami ter prostorskem planiranju. Čeprav je metoda CN dobro poznana in razširjena ter koeficient CN v široki uporabi v hidrološki praksi, v Sloveniji do sedaj še ni bilo opravljeno veliko raziskav z namenom natančne določitve parametra CN za določeno porečje in vplivu le-tega na rezultate.

1.1 Cilj diplomskega dela

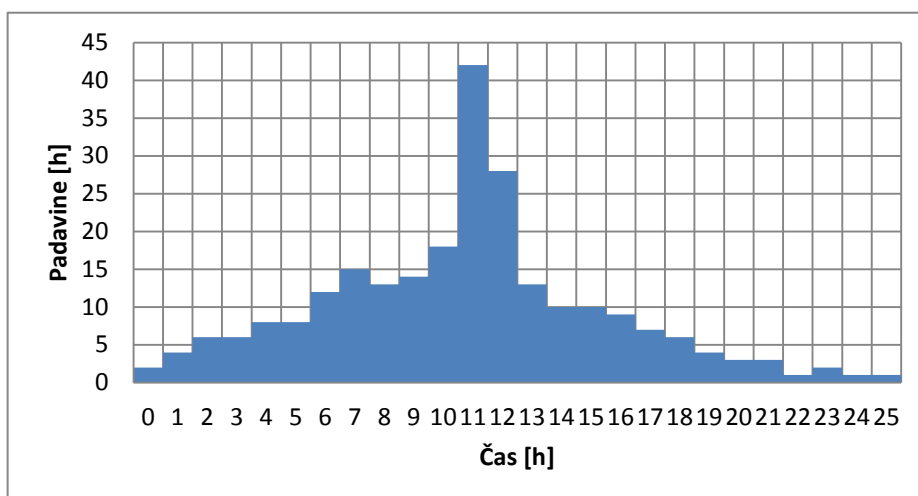
Koeficient CN je hidrološki parameter, ki zajema vpliv pedologije, rabe tal in predhodne vlažnosti zemljine in s katerim opišemo potencial površinskega odtoka za določeno porečje. V diplomski nalogi smo predstavili pomen parametra CN v hidrologiji in različne metode določanja parametra CN. Cilj diplomskega dela je določitev parametra CN za porečje Mačkovega grabna z uporabo štirih različnih metod: (a) pogosto uporabljene empirične SCS metode na podlagi rabe tal in tipa zemljine, (b) iz meritev pretokov in padavin za vsak obravnavani padavinski dogodek posebej, (c) z metodo asimptotičnega pristopa ter (d) s hidrološkim modelom porečja Mačkovega grabna, ki smo ga s pomočjo merjenih padavin in pretokov umerili in validirali, ter tako določili še modelno vrednost parametra CN. Dobljene rezultate oziroma vrednosti CN po različnih metodah, smo med seboj primerjali in analizirali.

2 PADAVINE IN ODTOK

2.1 Padavine

Izraz padavine zajema vso vodo, ki pade na površino Zemlje: dež, sneg, toča, rosenje, itd. Padavine nastanejo s kondenzacijo vodnih hlapov, ki se tvori ob dvigovanju in ohlajanju vlažnih toplih mas. Oblika padavin je odvisna od količine vlage v zraku, temperature in gibanja zračnih mas, organskih delcev v zraku, ipd. Padavine so sestavni del hidrološkega cikla in glavni vir sveže vode na Zemlji. Na višino padavin vplivajo različni dejavniki, kot so geografska širina, bližina morja, relief, gozdovi in velikost mest. Po obliki gibanja zračnih mas, ki povzročajo padavine, le te delimo na konvektivne (kratke, lokalne in močne padavine), orografske (lokalno dviganje zračnih mas ob pobočju planin) in ciklonske (območje nizkega zračnega pritiska, dolgotrajne in zmerne padavine). Intenzivnost padavin se spreminja časovno in prostorsko. Padavinske podatke zbiramo z ombrometri, totalizatorji in ombrografi, ki nam podajo časovno porazdelitev padavin. Pridobljeni padavinski podatki so le podlaga za nadaljnje hidrološke analize (Brilly in Šraj, 2014).

Količino padavin v odvisnosti od časa grafično prikažemo s histogramom padavin. Histogram padavin je osnovni podatek za izračun površinskega odtoka in je lahko določen na podlagi izmerjenega padavinskega dogodka ali pa je sintetičen, določen na podlagi podrobne statistične analize podatkov o padavinah za daljše obdobje. Izmerjeni padavinski podatki se najpogosteje uporabljajo pri napovedih in ocenah ter umerjanju modelov, medtem, ko so sintetične padavine v uporabi pri planiranju in projektiranju (Brilly in Šraj, 2005).



Slika 1: Histogram padavin

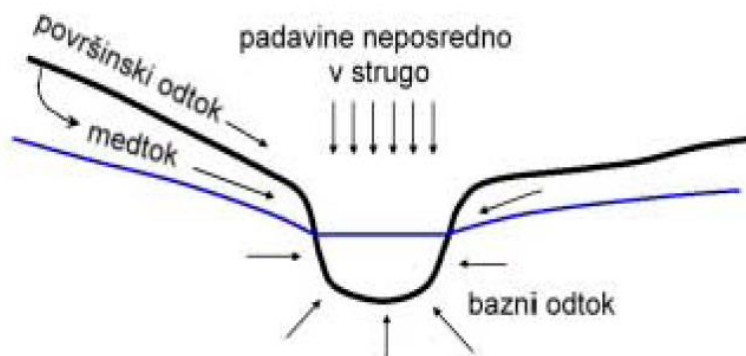
2.2 Padavinske izgube

Padavinske izgube predstavljajo del padavin, ki so prestrežene, infiltrirane ali akumulirane na površini in ne prispevajo k površinskemu odtoku. Padavine, ki prispevajo k površinskemu odtoku imenujemo ефективne oziroma neto padavine. Padavinske izgube predstavljajo površinsko akumulacijo vode na površinah, s katerih voda ne more prosto površinsko odteči. Na neprepustnih in vodnih površinah so padavinske izgube zanemarljive (Brilly in Šraj, 2005).

Ena izmed bolj znanih in uporabljenih metod za izračun padavinskih izgub je SCS metoda, ki je podrobneje opisana v nadaljevanju naloge.

2.3 Površinski odtok

Odtok površinskih voda je pomemben del hidrološkega kroga in ima veliko vlogo v hidrološkem modeliranju. Površinski odtok so padavine, ki prispejo na zemeljsko površino in odtečejo površinsko in podpovršinsko v mrežo vodotokov. Pojavi se, ko je intenziteta padavin večja od infiltracijske sposobnosti tal. Zaradi njegove kompleksnosti je površinski odtok zelo težko analizirati (Brilly in Šraj, 2014).

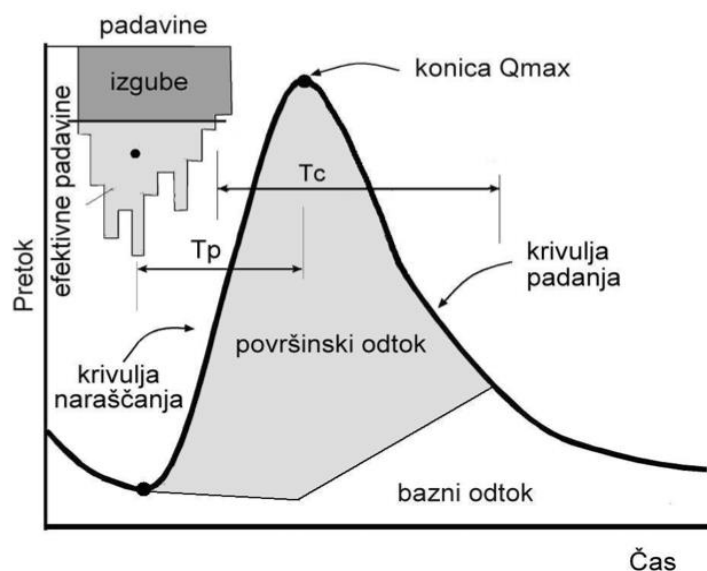


Slika 2: Posamezni deli padavinskega odtoka (Brilly in Šraj, 2005)

Razmerje med odteklelo in padlo vodo oziroma med ефективnimi (neto) in padlimi (bruto) padavinami imenujemo koeficient odtoka. Koeficient odtoka je odvisen predvsem od infiltracije padavin, pomemben vpliv pa imajo tudi lastnosti porečja, intenzivnost in trajanje padavin ter vlažnost zemljišča (Brilly in Šraj, 2005).

2.4 Hidrogram odtoka

Časovne spremembe pretoka v vodotoku prikažemo z diagramom, ki se imenuje hidrogram (slika 3). Oblika hidrograma je posledica fizikalno-geografskih pogojev in padavin (Brilly in Šraj, 2005).

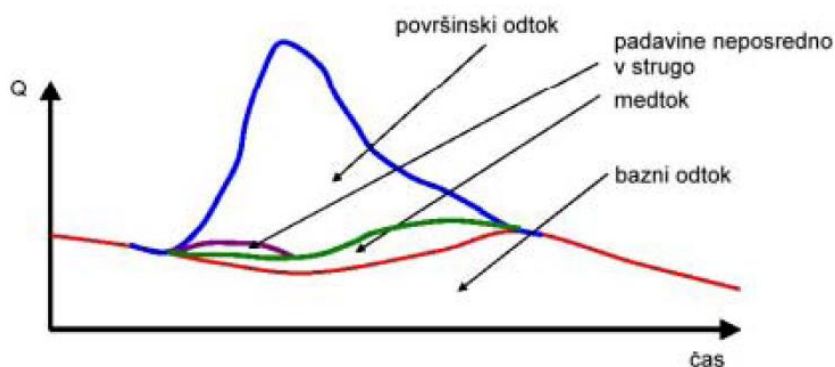


Slika 3: Lastnosti hidrograma odtoka (Brilly in Šraj, 2005)

Potek hidrograma nam pove veliko o lastnostih porečja. Osnovni deli hidrograma, ki opišejo spreminjanje pretoka s časom so naraščajoči del hidrograma, vrh hidrograma oziroma čas v katerem je dosežen maksimalen pretok ter padajoči del hidrograma. Velik vpliv na obliko hidrograma imajo geološki pogoji. Na zelo prepustnih površinah, kot so kras in aluvialne ravnine se površinski odtok praktično ne pojavi, poveča se samo bazni odtok. Nasprotna situacija se pojavi na slabše prepustnih površinah, kjer se padavine v celoti pretvorijo v površinski odtok (Brilly in Šraj, 2014).

Vpliv oblike porečja se odraža predvsem v času koncentracije. Čas koncentracije T_c (slika 3) predstavlja čas, ki je potreben, da do iztočnega profila priteče voda iz najbolj oddaljene točke porečja. Krajši čas koncentracije T_c se pojavi predvsem pri porečjih z relativno izrazitim naklonom površja. Pri dolgotrajnih padavinah se pojavi maksimalen odtok takrat, ko je trajanje padavin enako času koncentracije porečja. Čas zakasnitve T_p (slika 3) pa je čas med težiščem histograma efektivnih padavin in težiščem hidrograma (Brilly in Šraj, 2005).

Hidrogram sestavljajo površinski odtok, bazni odtok, medtok ter del padavin, ki pade neposredno v strugo (slika 4). Medtok je tok, ki se infiltrira v zgornji sloj tal in po makroporah odteka proti vodotoku. Bazni odtok pa je izcejanje podzemnih voda v smeri struge vodotoka. Oblika razmejitve med posameznimi deli odtoka je odvisna od geoloških lastnosti povodja. V posameznih primerih lahko bazni odtok poneha zaradi vdora vode v vodonosnik pri visokih gladinah vode v strugi. Z meritvami in opazovanji je pojav baznega toka mogoče opredeliti, a so drage in zamudne, zato v praksi bazni odtok določamo z različnimi grafičnimi metodami ali digitalnimi filtri (Brilly in Šraj, 2005).



Slika 4: Deleži posameznih odtokov na hidrogramu (Brilly in Šraj, 2005)

2.5 Bazni odtok

V literaturi ima bazni odtok več definicij, vendar je v osnovi to voda, ki doteka v strugo iz podtalnice tudi po daljših časovnih obdobjih brez padavin. V praksi je meja med površinskim in baznim odtokom zelo težko določljiva. Bazni odtok lahko vpliva na manjše poplavne dogodke, medtem, ko ima pri obsežnih poplavih zanemarljiv vpliv.

Bazni odtok je predvsem posledica izcejanja podzemnih voda, iztoka iz jezer in taljenja ledenikov (Mikoš et al., 2002). Bazni odtok je definiran tudi, kot pomemben del pretoka, ki izvira iz zalog podzemne vode ali drugih zakasnelih virov (jezera, taljenje ledenikov, ipd.). Skozi večino sušne sezone k pretoku vodotoka tako prispeva predvsem bazni odtok (Smakhtin, 2001).

Bazni odtok je funkcija, ki je določena z več spremenljivkami in lastnostmi prispevnega območja. Delež baznega odtoka pri pretoku vodotoka je odvisen od različnih regionalnih hidroloških pogojev, kot so prispevna površina, topografija, geologija, globina in prepustnost tal, količina padavin, evapotranspiracija, vzorec sezonskih padavin, tok podzemnih voda znotraj prispevnih površin, količina vlage v tleh, ipd. (Lacey, 1996).

2.5.1 Izločanje baznega odtoka

V hidrologiji obstajajo različne metode izločanja baznega odtoka. V grobem jih lahko razdelimo na dve skupini, in sicer z analizo hidrograma pretoka ali podatkov o pretoku ter z dejanskim merjenjem baznega odtoka, npr.: s kemičnim sledenjem, z električno prevodnostjo, meritvami višine podtalnice, ipd. (Kovačič, 2012). V diplomski nalogi se bomo osredotočili zgolj na prvi pristop.

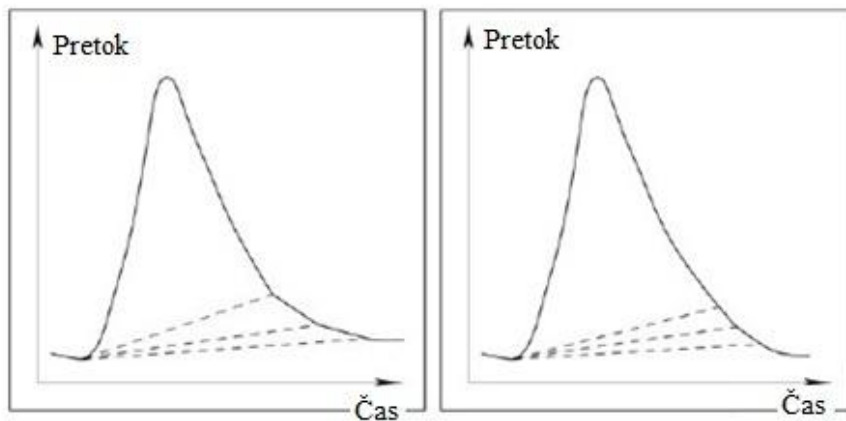
Pri določanju baznega odtoka so najbolj pogosto uporabljene grafične metode. Z grafičnimi metodami na hidrogramu poiščemo presečišče površinskega odtoka z baznim odtokom in nato z uporabo različnih metod določimo funkcijo baznega odtoka.

2.5.1.1 Grafične metode izločanja baznega odtoka

Grafične metode izločanja baznega odtoka na hidrogramu so primerne za uporabo, kadar obravnavamo individualne padavinske dogodke. Najpogosteje se uporabljajo za določitev območja baznega odtoka na poplavnem hidrogramu. Grafične metode ne upoštevajo fizičnih parametrov prispevnega območja, zato je težko razumeti kaj komponenta baznega odtoka točno predstavlja. Izbira točno določene grafične metode je odvisna od lastnosti hidrograma (Pugelj, 2012).

Razmejitvena črta na hidrogramu loči volumen površinskega odtoka od volumna baznega odtoka in predstavlja glavni problem pri grafičnih metodah določanja baznega odtoka. Razmejitvena črta poveže prevojni točki na naraščajočem in padajočem delu hidrograma. Prevojna točka je točka, kjer krivulja spremeni smer oziroma preide iz konveksne v konkavno (Pugelj, 2012).

Začetek razmejitvene črte predstavlja prevojna točka na naraščajočem delu hidrograma. Prikazuje trenutek, ko pretok v strugi začne naraščati. Konec razmejitvene črte pa predstavlja prevojna točka na padajočem delu hidrograma in prikazuje čas, ko površinski odtok preneha. Ta točka je težko določljiva, v veliko primerih ima padajoči del hidrograma lahko tudi več prevojnih točk (slika 5), zato je lahko izbira prevojne točke zelo subjektivna. Možno je tudi, da padajoči del hidrograma prevojne točke sploh ne vsebuje (Pandi, 2010).



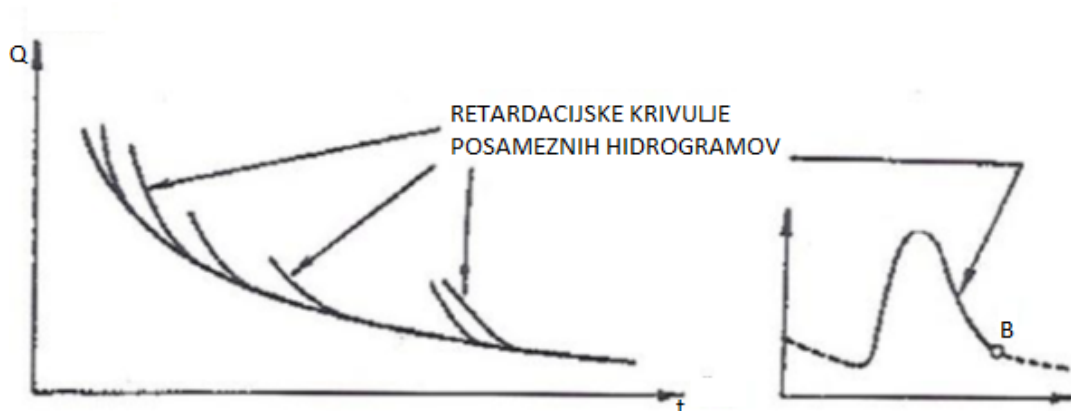
Slika 5: Iskanje določitve prevojnne točke (Pugelj, 2012)

Prevojno točko na padajočem delu hidrograma oziroma trenutek, ko preneha površinski odtok lahko določimo tudi s pomočjo retardacijskih krivulj. Retardacijske krivulje baznega odtoka se na nekem vodotoku med seboj prekrivajo in imajo večinoma podobno obliko kot eksponentne funkcije (slika 6). Zaradi heterogenosti in oblike geoloških skladov se lahko eksponentni koeficient postopoma zmanjšuje. Načeloma se vrednost eksponentnega koeficienta spreminja zaradi manjše prepustnosti in efektivne poroznosti globljih slojev. Koeficient določimo tako, da na logaritmično mrežo nanašamo retardacijsko krivuljo. Točka, ki jo privzamemo kot točko B, v kateri retardacijska krivulja preide v premico, predstavlja trenutek, ko preneha površinski odtok. Na osnovi nagiba premice določimo retardacijski koeficient α v enačbi 1 (Brilly in Šraj, 2005):

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}, \quad (1)$$

kjer je:

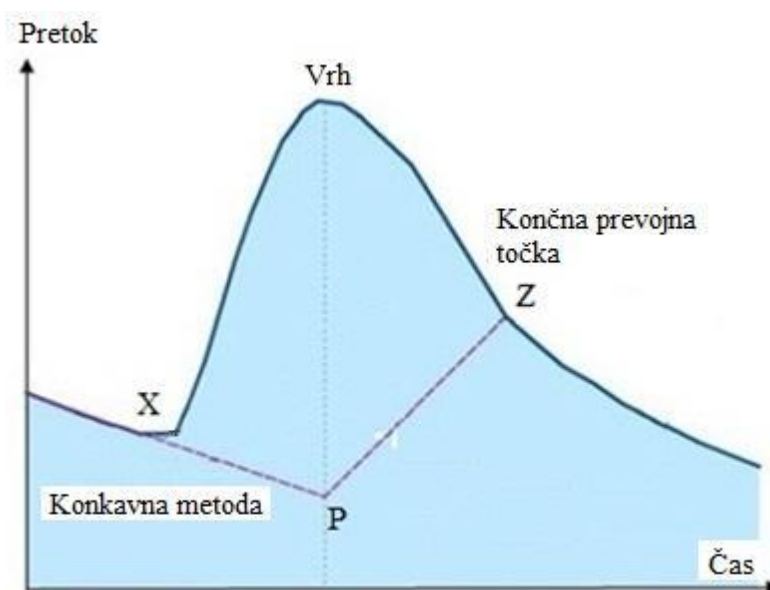
- Q_t pretok po nekem času [m^3/s],
- Q_0 pretok na prevojni točki [m^3/s],
- α retardacijski koeficient.



Slika 6: Retardacijske krivulje (Povzeto po Brilly in Šraj, 2005)

2.5.1.2 Tri-točkovna metoda izločanja baznega odtoka

Tri-točkovna metoda je grafična metoda izločanja baznega odtoka, pri kateri je razmejitvena črta, ki ločuje bazni odtok od površinskega odtoka, določena na podlagi treh točk, katere določimo na hidrogramu. Na levi del krivulje pred točko X (slika 7), ki predstavlja začetek naraščanja hidrograma, narišemo tangento in jo povežemo s točko P, ki leži na ordinati konice hidrograma. Točko P povežemo s točko Z (slika 7), ki je prevojna točka na upadajočem delu hidrograma (Pugelj, 2012). Točka Z predstavlja konec površinskega dela odtoka in jo najlažje poiščemo, če pretoke zrišemo v logaritemskem merilu. Točka Z leži tam, kjer krivulja tako izrisanega hidrograma preide v premico.



Slika 7: Tri-točkovna ali konkavna metoda izločanja baznega odtoka (Pugelj, 2012)

2.6 Neodvisnost zaporednih konic visokovodnih valov

V praksi imamo pogosto opravka s sestavljenimi valovi, ko si konice sledijo zaporedoma in tvorijo en val. Ali lahko zaporedni konici hidrograma ločimo in ju obravnavamo kot dva neodvisna visokovodna vala ali ju moramo obravnavati skupaj, je pogosto dilema hidrologov. Neodvisnost zaporednih konic lahko določimo npr. z oceno časa N , ki ga izračunamo po enačbi 2 (Brodie in Hostetler, 2005):

$$N = 0,862 * A^{0,2}, \quad (2)$$

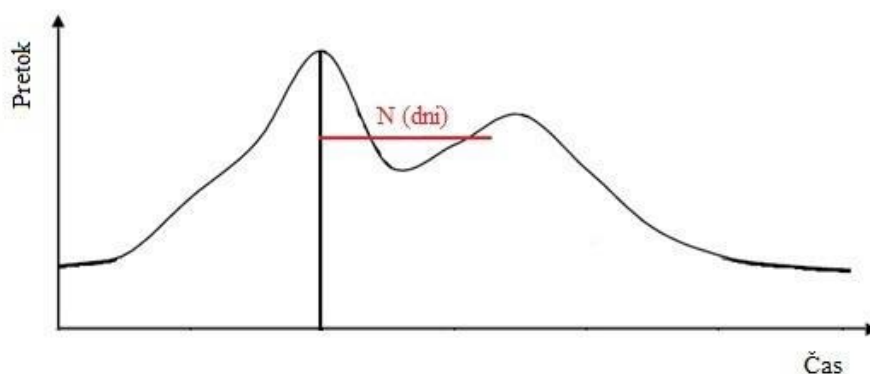
kjer je:

N čas od nastopa maksimalnega pretoka do konca površinskega odtoka [h, dni],

A površina prispevnega območja [km²].

Vrednost eksponentne funkcije (0,2) je odvisna od značilnosti prispevnega območja (naklon, vegetacija in geologija) (Brodie in Hostetler, 2005).

Čas N nanese na hidrogram od konice hidrograma v pozitivni smeri x (slika 8). N predstavlja čas prenehanja površinskega odtoka (Brodie in Hostetler, 2005). Zaporedni konici hidrograma lahko torej privzamemo kot neodvisni, če je čas N krajši od naslednjega naraščajočega (oziroma prejšnjega padajočega) dela hidrograma (Pugelj, 2012).



Slika 8: Odvisni zaporedni konici visokovodnega vala (Pugelj, 2012)

3. METODA SCS-CN

Metodo SCS–CN je razvila Agencija ameriškega ministrstva za kmetijstvo (ang. *The Soil Conservation Service - SCS*). Metoda je bila prvič objavljena leta 1954 v knjigi *National Engineering Handbook, Section 4 - Hydrology (NEH – 4)*. Velik vpliv na razvoj metode je imelo sprejetje Zakona o varstvu in zaščiti rečnih področij pred poplavami avgusta leta 1954, v ZDA. S časom je bila metoda večkrat popravljena in dopolnjena (1956, 1964, 1965, 1969, 1972, 1985 in 1993) (Ponce in Hawkins, 1996).

SCS-CN metoda je ena izmed najbolj razširjenih metod za določanje volumna površinskega odtoka, katerega povzročijo padavine. Metoda je bila pogosto uporabljena po svetu, predvsem v ZDA in temelji na številnih terenskih eksperimentih. Vključena je v mnoge hidrološke modele, ki simulirajo padavinski odtok (Wang et al., 2012).

Metoda CN je v široki uporabi in je splošno sprejeta kot konceptualni model, podprt z empiričnimi podatki za oceno neposrednega površinskega odtoka za padavinske dogodke, brez upoštevanja prostorskih sprememb ter nihanj v stopnji infiltracije in drugih izgub. Metoda se uporablja pri urejanju voda in prostora, pri varstvu pred poplavami, in je uporabljena v večini programov za hidrološko modeliranje, kateri so danes v uporabi. V kolikor bi želeli metodo CN nadomestiti z novo in izboljšano metodo, bi morali zagotoviti in dokazati njeno večjo zanesljivost in natančnost. Nobena izmed obstoječih enačb za določanje infiltracije, kot so Hortonova, Philipova ter Greenova in Amptova formula, ni zanesljivejša od metode CN (Ponce in Hawkins, 1996). Skupna pomanjkljivost prej omenjenih metod je neomejena maksimalna vlažnost zemljine. Nobena izmed naštetih formul tudi ne zajema vseh lastnosti porečja in hidroloških procesov, ki se pojavijo (Ponce in Hawkins, 1996).

Pretvarjanje padavin v površinski odtok je osnova hidrološkega modeliranja. Ta proces ponazorimo z enačbo (Ponce in Hawkins, 1996):

$$Q = P - I , \tag{3}$$

kjer je:

- Q površinski odtok,
- P padavine,
- I hidrološke (padavinske) izgube.

Padavinske izgube razdelimo v pet skupin:

- prestrežene padavine,
- površinsko zadrževanje,
- infiltrirane padavine,
- evaporacija,
- transpiracija.

Na kratkotrajne padavinske dogodke ima največji vpliv infiltracija, dolgoročno gledano pa izhlapevanje in transpiracija (Ponce in Hawkins, 1996). Prestrežene padavine so odvisne predvsem od naravnih danosti oz. pokrovnosti površja. V zadnjih desetletjih znanstveniki ugotavljajo, da imajo lahko velik vpliv na površinski odtok (Šraj et al., 2008). Padavine, ki se zadržujejo na površju pa so pri določanju površinskega odtoka ponavadi sekundarnega pomena. Metoda CN je omejena na modeliranje padavinskih izgub in ni primerna za modeliranje hidrološkega odziva porečja za daljše časovno obdobje, ker ne upošteva vpliva evaporacije in transpiracije (Ponce in Hawkins, 1996).

3.1 Razvoj metode skozi zgodovino

Začetki metodologije CN segajo v 30. in 40. leta 20. stoletja, ko je agencija SCS začela izvajati meritve infiltracije. Namen raziskav je bil pridobiti podatke, ki bi pomagali razumeti vpliv lastnosti porečja na padavinski odtok. Sherman (1949) je predlagal določanje neposrednega odtoka iz padavinskega dogodka. Ideja je bila nadgrajena z oceno površinskega odtoka nemerjenih porečij iz podatkov o rabi tal, predhodnih padavinah, trajanju padavin in povprečni letni temperaturi. Ti faktorji so bili združeni v empiričnem koeficientu b , ki predstavlja razmerje med padavinami in površinskim odtokom (Mockus, V., 1949, cit. po Hawkins in Ponce, 1996):

$$Q = P(1 - 10^{-bP}) \quad (4)$$

Andrews (neobjavljeno poročilo, 1954) je iz podatkov, pridobljenih z infiltrometrom, razvil grafično metodo za določanje odtoka na podlagi padavinskih podatkov za različne kombinacije tipov zemljin ter površine in rabe tal. Omenjena postopka sta bila osnova za nadaljnji razvoj metode CN, katera je temeljila na sledečih predpostavkah (Ponce in Hawkins, 1996):

- $0 \leq Q \leq P$,

- ko velja $P \rightarrow \infty$ se dejanska retenzija oziroma zadrževanje F asimptotično približuje konstantni vrednosti S , ki predstavlja maksimalno potencialno zadrževanje, ki je mera za sposobnost porečja odvzeti in zadržati padavine,
- med Q in P ter CN in S velja medsebojna odvisnost,
- ocena parametra CN sloni na hidroloških pogojih, rabi tal, odtočnem potencialu in predhodni vlažnosti zemljine.

3.2 Enačba SCS-CN

Metoda SCS-CN predpostavi razmerje med zadrževanjem in odtokom, podano z enačbo (Ponce in Hawkins, 1996):

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P}, \quad (5)$$

kjer je:

$F = P - Q$	dejansko zadrževanje [mm],
S	maksimalno potencialno zadrževanje (retenzija – mera za sposobnost porečja odvzeti in zadržati padavine [mm],
Q	dejanski površinski odtok, ki je enak akumuliranim efektivnim padavinam v času t [mm],
P	višina padavin v času t , ki je enaka potencialnemu površinskemu odtoku [mm].

Začetne izgube I_a predstavljajo padavine, ki so prestrežene na površini porečja, preden pride do infiltracije vode v zemljino.

Pri metodi CN iz enačbe (5) od vsote padavin odštejemo začetne izgube I_a (Ponce in Hawkins, 1996):

$$\frac{P - I_a - Q}{S} = \frac{Q}{P - I_a} \quad (6)$$

V enačbi (6) izpostavimo Q in ocenimo presežek padavin kot funkcijo celotnih padavin, pokrovnosti tal, rabe tal in vlažnosti tal (Ponce in Hawkins, 1996):

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}, \quad (7)$$

kjer velja $P > I_a$, v nasprotnem primeru je $Q = 0$.

Ob upoštevanju začetnih izgub, se z naraščanjem padavin, dejanska retenzija F asimptotično približuje konstantni vrednosti $S + I_a$.

V želji, da se izognemo neodvisni oceni začetnih izgub, je iz analiz za manjša eksperimentalna porečja SCS razvil empirično zvezo med I_a in S (SCS, 1985):

$$I_a = \lambda S, \quad (8)$$

kjer je λ koeficient začetnih izgub.

Na podlagi eksperimentov je bila določena standardna vrednost koeficienta $\lambda = 0,2$ (SCS, 1985).

Z upoštevanjem $\lambda = 0,2$ v enačbi 7 dobimo:

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}, \quad (9)$$

kjer velja $P > 0,2S$, v nasprotnem primeru je $Q = 0$.

Zaradi lažjega računanja in bolj praktične uporabe, maksimalno potencialno zadrževanje S , ki se giblje v mejah $0 \leq S \leq \infty$, izrazimo s koeficientom CN , katerega teoretične vrednosti so v razponu $0 \leq CN \leq 100$:

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad (10)$$

Če enačbo 10 preoblikujemo in izpostavimo CN dobimo:

$$CN = \frac{25400}{S + 254} \quad (11)$$

Vrednost $CN = 0$ predstavlja teoretično zgornjo mejo maksimalnega potencialnega zadrževanja $S = \infty$.

Enačbo 7 lahko razširimo:

$$Q = P - I_a - S = \frac{S^2}{P - I_a + S} \quad (12)$$

Ko potencialni površinski odtok narašča proti neskončnosti ($P - I_a \rightarrow \infty$), se dejanska retenzija, izključujoč začetne izgube (enačba 8) asimptotično približuje potencialni retenziji S .

V praksi se je izkazalo, da v nekaterih primerih razmerje med padavinami in površinskim odtokom ne sledi enačbi 12 (Ponce in Hawkins, 1996). V takih primerih je zelo težko določiti ustrezen CN . V ta namen so bili oblikovani alternativni opisi razmerja med padavinami in odtokom (Fogel in Duckstein, 1970; Hawkins, 1992):

$$Q = b(P - I_a) \quad (13)$$

Glavna težava pri enačbi 13 je določiti empirični koeficient b , v katerem so zajeti vplivi na površinski odtok. Opazna pomanjkljivost je tudi rast potencialnega odtoka in dejanske retenzije proti neskončnosti, kar posledično pomeni, da gre tudi maksimalna potencialna retenzija proti neskončnosti in nima zgornje meje (Ponce in Hawkins, 1996). Prednost metode CN je v tem, da z izjemo primera, kjer je $CN=0$, za vsako vrednost CN , lahko določimo maksimalno potencialno retenzijo.

3.3 Prednosti in pomanjkljivosti metode SCS-CN

Prednosti metode CN (Ponce in Hawkins, 1996):

- Relativno preprosta metoda za oceno neposrednega površinskega odtoka v odvisnosti od višine padavin, podprta z empiričnimi podatki,
- Metoda sloni samo na parametru CN , ki je odvisen od štirih glavnih lastnosti porečja, ki imajo največji vpliv na površinski odtok:
 1. hidrološke skupine tal, razvrščene po odtočnem potencialu (A, B, C in D),
 2. rabe tal,
 3. hidroloških pogojev (slabi, povprečni, dobri),
 4. predhodne vlažnost zemljine,
- Edina metoda, ki zahteva večinoma dostopne in dobro dokumentirane podatke (zemljina, raba tal, predhodna vlažnost zemljine),
- Čeprav je teoretični razpon koeficienta CN od 0 do 100, se v praksi razpon večinoma giblje od 40 do 98. S tem omejimo edini parameter, ki ga metoda vsebuje, na relativno majhen razpon, kar predstavlja veliko prednost.

Pomanjkljivosti metode CN (Ponce in Hawkins, 1996):

- Metoda je bila najprej v uporabi na manjšem delu ZDA, kasneje pa se je razširila na celotne Združene države Amerike in po svetu. Ob tem je potrebna previdnost ob uporabi v drugih geografskih in podnebnih območjih, ker se lahko koeficienti CN za enako rabo tal medsebojno razlikujejo,
- V nekaterih primerih, ob manjši vrednosti CN in manjši količini padavin, je metoda lahko zelo občutljiva na koeficient CN in predhodno vlažnost,
- Metoda se za najbolj natančno izkaže na kmetijskih območjih, katerim je bila prvotno tudi namenjena, slabše se obnese v urbanih in predvsem gozdnatih območjih;
- Primernejša je za vodotoke z zanemarljivim baznim odtokom,
- Metoda ne upošteva prostorskih sprememb, koeficient CN se najbolje obnese na manjših porečjih, za porečja, ki so večja od 250 km² pa so rezultati metode manj zanesljivi,
- Koeficient začetnih izgub $\lambda = 0,2$ je konstanten, kar se najprej zdi kot prednost, ker število parametrov omejimo na enega, vendar bi lahko λ opredelili tudi kot regionalni parameter, ki zajame regionalne geološke in podnebne vplive ter bi kot tak moral biti odvisen od lokacije porečja.

3.4 Parameter CN

Parameter CN je brezdimenzijski koeficient, ki predstavlja odtočne razmere s posameznih površin in je vhodni parameter metode SCS za izračun padavinskih izgub. S pomočjo parametra CN lahko ocenimo transformacijo padavin v odtok.

CN za porečja ocenimo s pomočjo preglednic, ki jih je na podlagi eksperimentov določila enota ameriških vojaških inženirjev (USACE, 2000). V preglednici 1 so zemljine razvrščene v štiri skupine (A, B, C, D) na podlagi njihove stopnje izgub.

Preglednica 1: SCS klasifikacija zemljin in infiltracijske izgube v odvisnosti od vrste zemljine (Brilly in Šraj, 2006)

Skupina zemljine	Opis	Stopnja izgub (mm/uro)
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

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 1

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 glin.	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

V preglednicah 2, 3 in 4 so koeficienti CN razvrščeni na podlagi rabe tal, načina obdelave, hidroloških pogojev ter odtočnega potenciala zemljine (USACE, 2000).

Preglednica 2: Koeficienti CN za urbanizirane površine (USACE, 2000)

Raba tal	% neprep. površin	Vrednosti CN glede na odtočni potencial			
		A	B	C	D
Odpрте površine (parki, nasadi, golf igrišča, pokopališča itd.					
slabi pogoji (pokritost s travo < 50 %)		68	79	86	89
povprečni pogoji (pokritost s travo 50 - 75 %)		49	69	79	84
dobri pogoji (pokritost s travo > 75 %)		39	61	74	80
Neprepustne površine					
tlakovane površine, strehe, ceste		98	98	98	98
tlakovane ulice in ceste z robniki in		98	98	98	98
tlakovane ulice in ceste z odprtimi kanali		83	89	92	93
makadamske ceste (pesek)		76	85	89	91
neobdelane poti (zemlja)		72	82	87	89
Urbana območja					
komercialna in poslovna območja	85	89	92	94	95
industrijska območja	72	81	88	91	93
Stanovanjske površine					
povprečna velikost parcele do 500 m ²	65	77	85	90	92
povprečna velikost parcele 1000 m ²	38	61	75	83	87
povprečna velikost parcele do 1300 m ²	30	57	72	81	86
povprečna velikost parcele do 2000 m ²	25	54	70	80	85
povprečna velikost parcele do 4000 m ²	20	51	68	79	84
povprečna velikost parcele do 8000 m ²	12	46	65	77	82

Preglednica 3: Koeficienti CN za obdelana kmetijska zemljišča (USACE, 2000)

Raba tal	Hidrol. pogoji	Vrednosti CN glede na odtočni potencial			
		A	B	C	D
Ledina, neobdelan svet					
gola zemljina	-	77	86	91	94
delno poraščena zemljina (ostanki posevkov)	slabi	76	85	90	93
	dobri	74	83	88	90
Poljščine v vrsti					
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
Nizka žita					
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
Gosto sejane stročnice ali kolobarjen travnik					
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

Preglednica 4: Koeficienti CN za ostala kmetijska zemljišča (USACE, 2000)

Raba tal	Hidrol. pogoji	Vrednosti CN glede na odtočni potencial			
		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
Gozd v kombinaciji s travo (plantaže, 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

Za porečja z več vrstami zemljin in različno rabo tal se enoten CN izračuna kot:

$$CN_{skupen} = \frac{\sum A_i * CN_i}{\sum A_i} \quad (14)$$

CN_{skupen} enoten skupen CN za račun odtoka,

CN_i CN posameznega dela podporečja,

A_i površina pripadajočega podporečja

3.4.1 Določanje parametra CN na podlagi meritev

Od začetkov metode CN je bilo opravljenih že veliko eksperimentov na manjših porečjih, katerih cilj je bil določiti parameter CN na podlagi meritev padavin in površinskega odtoka. Namen je bil potrditi vrednosti CN, podane v preglednicah 1-4 in razširiti metodologijo na do tedaj še ne obravnavane rabe tal in tipe zemljine.

Z uporabo merjenih podatkov o padavinah in površinskem odtoku izračunamo maksimalno potencialno retenzijo (Hawkins, 1993):

$$S = 5(P + 2Q - \sqrt{4Q^2 + 5PQ}) \quad (15)$$

Pripadajoč *CN* nato izračunamo po enačbi 9.

Za analizo podatkov o padavinah in površinskem odtoku obstaja več načinov. Rallison in Cronsbery (1979) ter Springer (1980) so v 80. letih prejšnjega stoletja pisali o standardni metodi, ki obravnava dnevne padavine in odtoke za določitev letne poplave. Prednost te metode je, da razpolaga z velikim razponom višine padavin in odtokov. Slabosti pa so, da velikokrat nimamo na voljo dnevnih vrednosti meritev, da povratna doba padavin in odtoka ni nujno vedno enaka in da imamo na koncu le eno vrednost podatkov na leto. Zaradi pomanjkanja daljših nizov letnih visokovodnih konic, še posebej v sušnih območjih, so raziskovalci v analize začeli vključevati tudi dogodke s povratno dobo, krajšo od enega leta. Tako je na voljo več vhodnih podatkov, nastane pa tudi razlika v dobljeni vrednosti parametra *CN*, v primerjavi s parametrom *CN*, pridobljenim iz letnih konic (Ponce in Hawkins, 1996).

Parameter *CN* lahko ocenimo tudi z metodo enakih povratnih dob (ang. *Frequency matching method*). Metoda povezuje padavine in površinski odtok na podlagi enake povratne dobe (Ponce in Hawkins, 1996) in je opisana v nadaljevanju .

Parameter *CN* za določeno porečje je lahko določen z različnimi načini obdelave merjenih podatkov o padavinah in odtokih. Vrednost parametra *CN* variira v odvisnosti od izbrane metode obdelave merjenih podatkov. Za določanje parametra *CN* lahko uporabimo samo meritve največjega padavinskega dogodka v letu ali pa kar vse padavinske dogodke , ki povzročijo površinski odtok. Podatke o odtokih lahko nato povežemo s podatki o padavinah, ki so te odtoke povzročile ali pa jih porazdelimo v pare z enako povratno dobo (Stewart et al., 2012).

3.4.2 Določanje parametra *CN* z asimptotičnim pristopom

Metoda določanja parametra *CN* z asimptotičnim pristopom temelji na ujemanju povratnih dob (ang. *Frequency matching*). Ujemanje je način uporabe in interpretacije enačbe 9, ki povezuje padavine in površinski odtok na podlagi enake povratne dobe. Najpogostejša uporaba te metode je računanje površinskega odtoka z izbrano povratno dobo iz padavin z enako povratno dobo. Za vse povratne dobe privzamemo, da je koeficient *CN* konstanten. Pri obdelavi merjenih podatkov o padavinah in površinskem odtoku, moramo izbrati podatke o padavinah in površinskem odtoku z ujemajočo povratno dobo. To interpretacijo, ki jo imenujemo podatkovno ujemanje, je prvi izpostavil Hjelmfelt (1980). Ta pristop ne zahteva, da se površinski odtok ujema s padavinskim dogodkom, ki je ta odtok povzročil, ampak zgolj, da se izberejo podatki o padavinah in površinskem odtoku z ujemajočo povratno dobo.

Metodo CN lahko definiramo kot transformacijo med porazdelitvijo višine padavin in višine površinskega odtoka (Hawkins, 1993).

Metoda podatkovnega ujemanja se uporablja za obdelavo merjenih podatkov o padavinah in površinskem odtoku. Podatki o višini padavin in površinskem odtoku se razporedijo ločeno in kasneje razvrstijo tako, da tvorijo pare ($P - Q$) z enako povratno dobo.

Prvi korak pri določanju koeficienta CN z asimptoto je, da se izmerjeni podatki o padavinah in površinskem odtoku razporedijo ločeno v padajočem vrstnem redu. Ker imajo vsi elementi, ki sestavljajo pare podatkov enako povratno dobo, ta pristop omogoča pojavnostno ujemanje padavin in površinskega odtoka. Drugi korak je, da se z uporabo enačb 11 in 15 izračunajo koeficienti CN za določene pare. Tukaj se pogosto vzpostavi sekundarno razmerje med višino padavin in koeficientom CN. Če je to razmerje očitno, v nadaljevanju lahko določimo vrsto asimptote (Hawkins, 1993)

Enačba 1 se reši s pomočjo enačbe 15 za maksimalno potencialno retenzijo S . Za vsak par podatkov ($P - Q$), za katerega velja $0 < Q < P$, lahko izračunamo S in z uporabo enačbe 11 tudi koeficient CN. Pridobljene vrednosti so izračunane na podlagi meritev in skoraj zagotovo ne bodo konstantne pri različnih padavinskih dogodkih. V enačbi 15 se odšteje koren, da se ohrani enakost $P = Q$ pri $S = 0$.

Ko se koeficient CN izračuna na podlagi merjenih padavin, kot je opisano v prejšnjem odstavku, se skoraj vedno vzpostavi sekundarno razmerje med koeficientom CN in višino padavin. V večini primerov se ob povečevanju količine padavin, izračunani koeficienti CN približujejo konstantni vrednosti. Znotraj tega razmerja so bili v različnih porečjih opaženi različni odzivi in posledično drugačno obnašanje krivulje, ki povezuje CN in padavine (Hawkins, 1993). Vsi trije tipi so podrobneje razloženi v nadaljevanju.

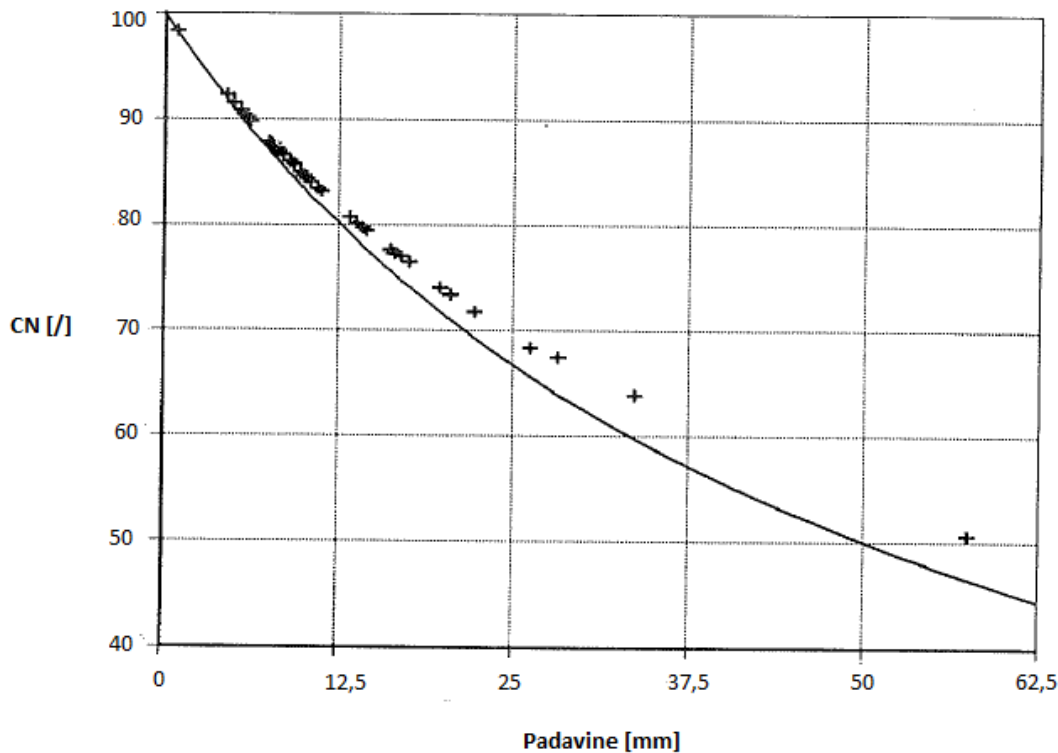
3.4.2.1 Padajoči tip krivulje

Prva različica je padajoči tip krivulje (ang. *Complacent behaviour*), kjer pri naraščajočih padavinah, opazovan koeficient CN pada in se ne približuje konstantni vrednosti. Primer tega tipa krivulje je podan na sliki 9, ki prikazuje koeficient CN kot funkcijo višine padavin. Na sliki 9 polna črta predstavlja prag površinskega odtoka v odvisnosti od padavin oziroma, kjer je $P=0,2*S$ in je podana z enačbo (Hawkins, 1993):

$$CN_0 = \frac{2540}{\frac{P}{2} + 25,4} \quad (16)$$

Iz podatkov, ki dajo takšen tip krivulje, koeficienti CN ne morejo biti zanesljivo določeni, saj se ne približujejo konstantni vrednosti. V takšnih primerih se koeficient CN pravilneje izračuna z linearno obliko enačbe 17 kot pa z enačbo 9 (Hawkins, 1993):

$$Q = C * P \quad (17)$$



Slika 9: Padajoči tip krivulje (povzeto po Hawkins, 1993)

Čeprav na prvi pogled deluje preprosta, je to pravzaprav oblika, ki povzroča največ negotovosti. Za njeno razumevanje moramo poznati standardno obliko asimptote. Če na podlagi podatkov pridobljenih iz meritev, dobimo padajočo obliko krivulje, je še vedno mogoče uporabiti enačbo 4, ob predpostavki (izven izmerjenih podatkov), da dani podatki pripadajo standardni krivulji, ki ima padajočo obliko le ob nižji količini padavin in bo porečje ob naraščajočih padavinah izkazovalo standardno obliko krivulje. V teh primerih lahko izračunamo koeficient CN_{∞} , ki pa bo precej nižji od koeficientov CN , pridobljenih na podlagi meritev (Hawkins, 1993).

Padajoča oblika krivulje pa je bila opažena tudi kot predhodnik naraščajoče oblike krivulje in nikakor ne moremo vedeti, katera oblika krivulje se bo pojavila ob naraščajoči količini padavin. Torej na podlagi meritev, ki izkazujejo padajočo obliko krivulje, z ekstrapolacijo podatkov ne moremo predpostaviti konstante koeficientov CN v standardnem vzorcu. V

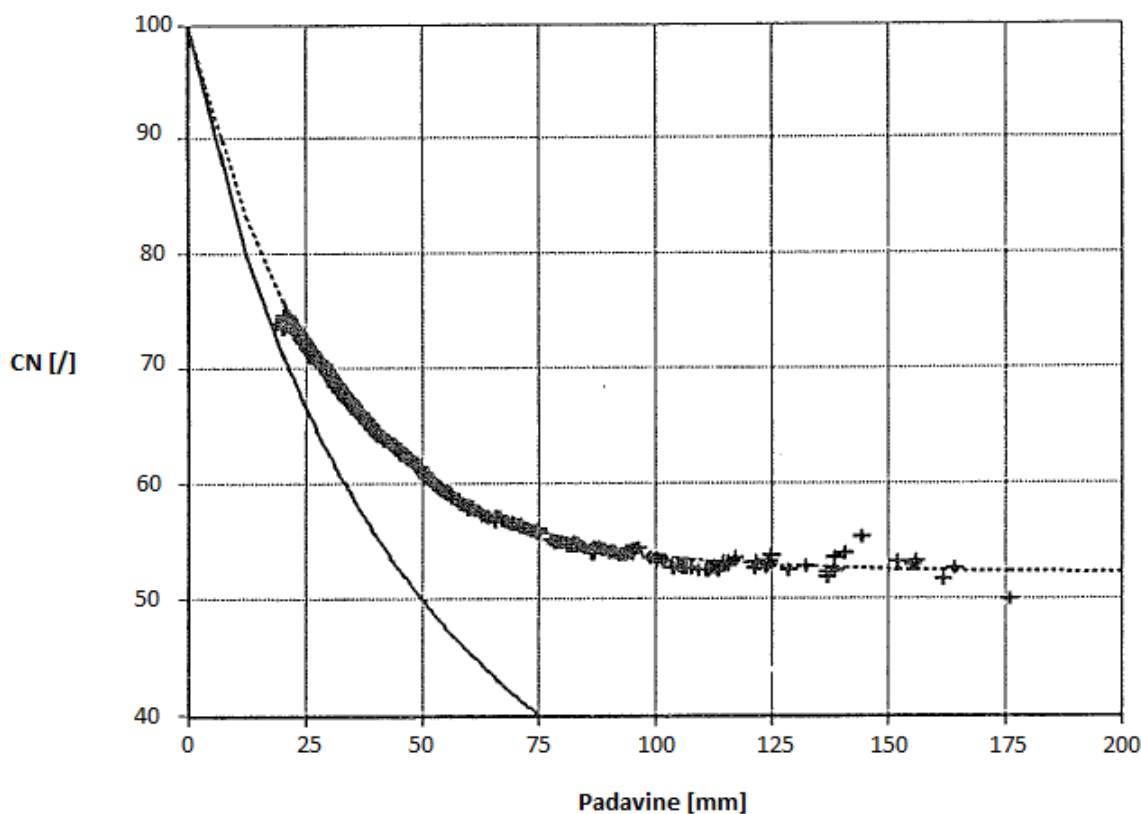
takšnih primerih verodostojnega koeficienta CN žal ne moremo določiti. Padajoča oblika krivulje nakazuje, da se porečje, vsaj znotraj podatkov pridobljenih z meritvami, ne obnaša v skladu z enačbo (9).

3.4.2.2 Standardni tip krivulje

Druga različica je standardni tip krivulje (ang. *Standard behaviour*), ki se tudi najpogosteje pojavlja. Pri naraščajočih padavinah, podobno kot pri padajočem tipu krivulje, opazovan koeficient CN pada, toda v tem primeru se približuje konstantni vrednosti. Ta konstantna vrednost definira koeficient CN ki je neodvisen od količine padavin. Primer standardnega tipa krivulje je podan na sliki 10.

Enačba (18) vsebuje $P - CN$ podatkovne pare, kjer se CN_{∞} približuje konstantni vrednosti pri $P \rightarrow \infty$ in je k_1 enak ujemajoči konstanti (ang. *Fitting constant*). Spremenljivka CN_{∞} je koeficient CN , ki opisuje podatke pri večjih padavinskih dogodkih.

$$CN(P) = CN_{\infty} + (100 - CN_{\infty})\exp(-k_1P) \quad (18)$$



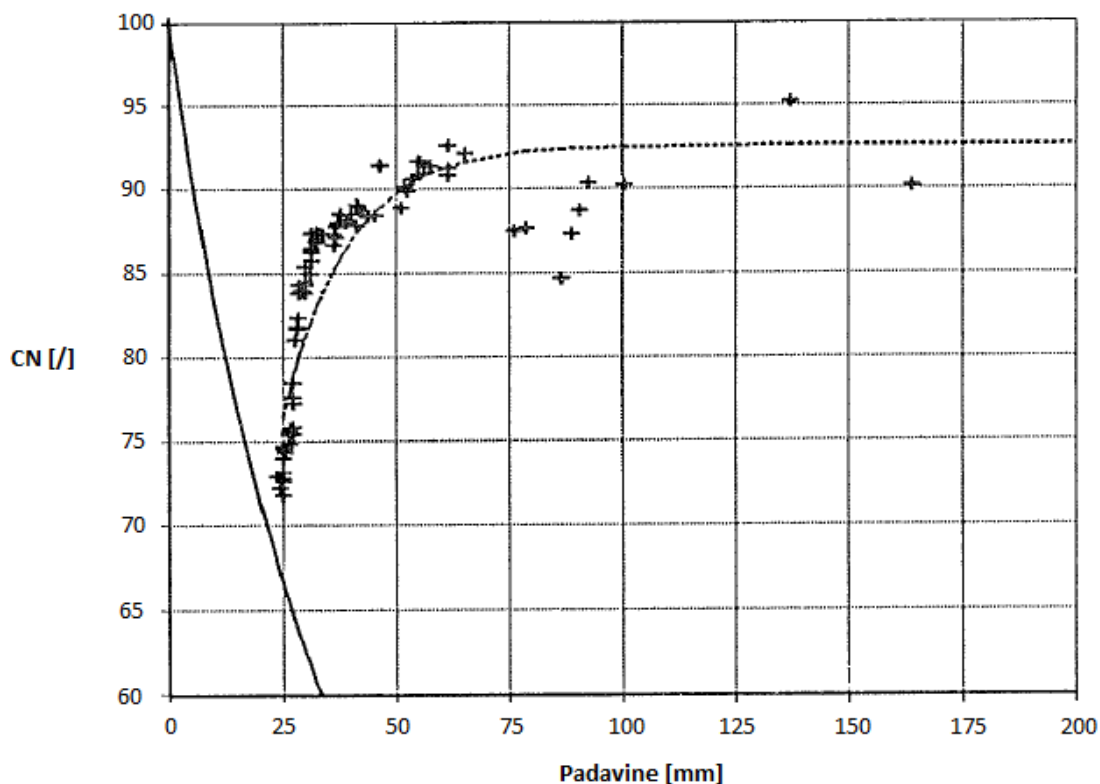
Slika 10: Standardni tip krivulje (povzeto po Hawkins, 1993)

3.4.2.3 Naraščajoči tip krivulje

Tretja različica (slika 11) je naraščajoči tip krivulje (ang. *Violent behaviour*), za katerega je pri naraščajočih padavinah značilno, da opazovan koeficient CN nenadoma naraste in se asimptotično približuje navidezno konstantni vrednosti. Pri nižjih padavinah pa jo pogosto spremlja padajoči tip krivulje. To nakazuje, da se ta oblika krivulje pojavi pri neki kritični višini padavin (Hawkins, 1993).

Enačba (19) vsebuje P - CN podatkovne pare, kjer je CN_{∞} konstantna vrednost pri $P \rightarrow \infty$ in je k_2 enak ujemajoči konstanti.

$$CN(P) = CN_{\infty}(1 - \exp(-k_2 P)) \quad (19)$$



Slika 11: Naraščajoči tip krivulje (povzeto po Hawkins, 1993)

Asimptotična konstantna vrednost se uporablja za določanje koeficienta CN na porečju z uporabo merjenih podatkov. V primerih, ko se vrednost koeficienta CN ne približuje konstanti, kot je v primeru padajoče krivulje, koeficienta CN ne moremo določiti. Asimptotični pristop se torej lahko uporablja za objektivno določanje asimptotičnega koeficienta pri standardnem in naraščajočem tipu krivulje.

3.5 Program HEC-HMS

Računalniški program HEC-HMS je v začetku leta 1992 razvil Hidrološki inženirski center (HEC) ameriške vojske in je v osnovi namenjen modeliranju padavinskega odtoka s povodij (USACE, 2008). Program je bil razvit kot nadomestilo za HEC-1, ki so ga predstavili že leta 1968 in je veljal za osnovni program namenjen hidrološkemu modeliranju. Rezultati hidrološkega modeliranja so nam v veliko pomoč pri napovedovanju poplav in vodnih zalog, ugotavljanju odtoka s povodij, modeliranju pregrad in prepustov, izdelovanju študij vpliva bodoče urbanizacije, ipd (Brilly in Šraj, 2005).

Programska oprema ponuja popolnoma integrirano delovno okolje, vključno z zbirko podatkov, računskim orodjem in orodjem za prikazovanjem rezultatov ter vključuje različne hidrološke metode za izračun infiltracije padavin, hidrograma enote in propagacije valov (Brilly in Šraj, 2005; Kestnar, 2014).

Projekt v programu HEC-HMS je sestavljen iz treh osnovnih modelov (USACE, 2008):

- modela porečja,
- meteorološkega modela in
- kontrolnega modela.

Pri modelu porečja se vriše shemo povodja. Eden izmed hidroloških elementov, ki so na voljo v programu je podporečje. Pri elementu podporečja določimo padavinske izgube, transformacijo padavin v odtok in bazni odtok.

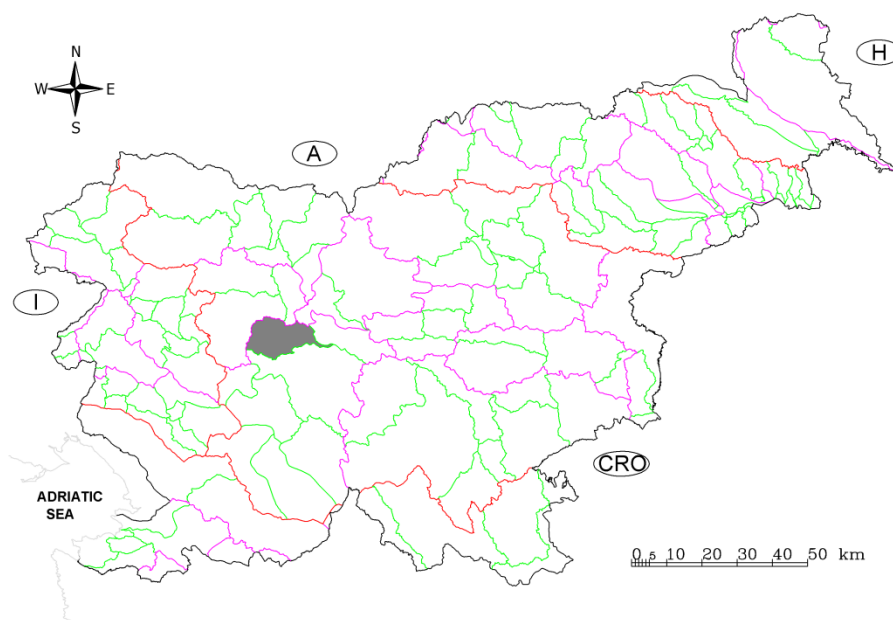
V meteorološki model je potrebno za vsako podporečje določiti padavine, na podlagi katerih bo program izračunal odtok. Kontrolni model določa računski interval ter začetek in konec simulacije. V hidrološki model vnesemo podatke o merjenih padavinah in pretokih. Določimo njihov začetek in konec ter časovni interval. Rezultati izračuna se izpišejo v grafični in tabelarni obliki, shranjujejo pa se v HEC-DSS datotekah, kar nam omogoča povezavo z drugo programsko opremo.

4 REZULTATI

4.1 Porečje Mačkovega grabna

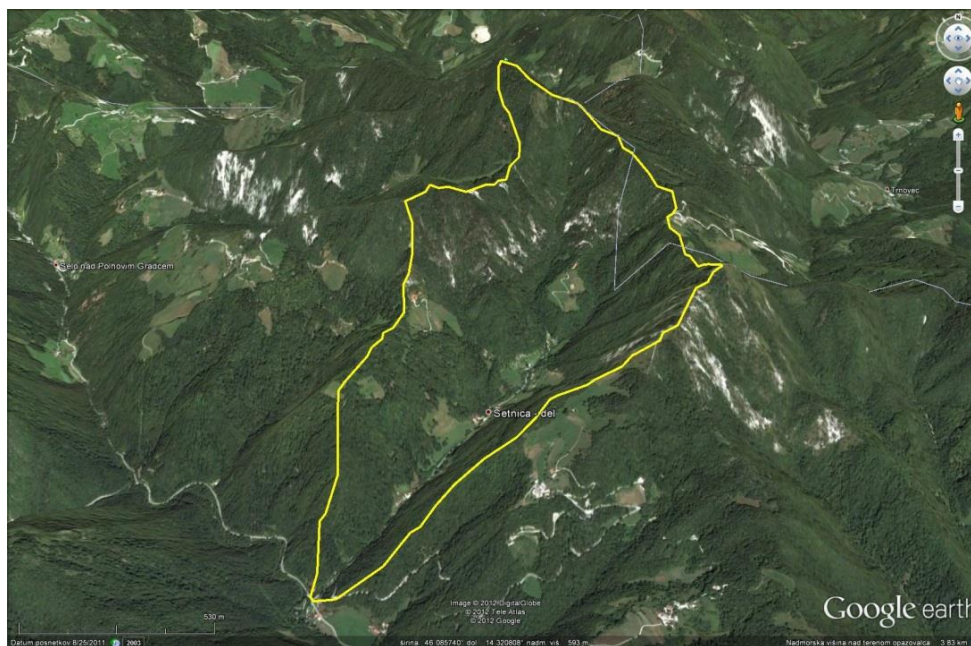
4.1.1 Osnovni podatki

Mačkov graben je hudournik, ki izvira v Polhograjskem hribovju. Eksperimentalno porečje Mačkov graben, s prispevno površino 2,33 km², je del vodnega telesa reke Gradaščice, katere porečje obsega 158,8 km² (slika 12). Hudournik se izliva v Veliko Božno, katera se pri Polhovem Gradcu združi z Malo vodo, od koder teče pod imenom Gradaščica. Gradaščica teče v osrednji Sloveniji, kjer se v Ljubljani izliva v reko Ljubljanico, ki je del porečja Save. Gradaščica se pri Bokalškem jezui loči na Mestno Gradaščico ter Mali Graben. Del porečja Gradaščice sestavlja Polhograjsko hribovje. Hribovito porečje se odraža v hudourniškem značaju vodotokov, za katerega je značilen hiter nastop konice pretoka in relativno hitro zmanjševanje pretokov. Na porečju Mačkovega grabna so prisotni antropogeni vplivi, kar se odraža predvsem v zaplavnih hudourniških pregradah, katere zmanjšujejo poplavno ogroženost (Bezjak et al., 2013).



Slika 12: Lokacija porečja Gradaščice na karti Slovenije (Rusjan, 2015)

Slika 13 prikazuje eksperimentalno porečje hudournika Mačkov graben na modelu terena. V preglednici 5 pa so prikazane najpomembnejše topografske, hidrografske, hidrološke, geološke in pedološke značilnosti hudourniškega območja Mačkovega grabna.



Slika 13: Eksperimentalno porečje hudournika Mačkov graben na modelu terena iz Google Zemlja (Rusjan, 2015)

Preglednica 5: Osnovne lastnosti eksperimentalnega porečja Mačkov graben (Rusjan, 2015)

Prispevna površina	2,33 km ²
Nadmorska višina (min, max, srednja)	384 m; 1015 m; 649 m
Naklon porečja (max, povprečje)	58,5° (163,5%); 30,5° (59%)
Lega	SW
Letna količina padavin	1600-1800 mm
Dolžina glavne struge	1780 m
Naklon struge (povprečje)	9,3 %
Pokrovnost in raba prostora (CLC)	Mešani gozd (84,8%), trajni travnik (9,4%), kmetijsko zemljišče v zaraščanju (1,4%)
Geologija	Laporni apnenec, dolomit, peščen skrilavec, oolitni apnenec; neplastovit dolomit; svetlo siv kristalast dolomit; Grödenski skladi-rdeč peščenjak, alevrolit, prehodi v skrilavec in konglomerat
Pedologija	Rendzina na apnencu in dolomitu



Slika 14: Hudourniška pregrada v hudourniškem območju Mačkovega grabna (foto: Heco, 2015)

4.1.2 Podnebje

Za Polhograjsko hribovje in porečje Gradaščice je značilno zmerno celinsko podnebje, katero obsega večji del Slovenije. Povprečna temperatura najhladnejšega meseca je med 0 in -3°C , najtoplejšega pa med 15 in 20°C . Poleg absolutne nadmorske višine ima na temperature v Polhograjskem hribovju prevladujoč vpliv reliefna lega. Na prisojnih območjih med 600 in 800 m nadmorske višine se pojavi termalni pas, kjer je zaradi temperaturne inverzije pozimi pogosto topleje kot v dolinah. Povprečna letna količina padavin na porečju Gradaščice je med 1600 in 1800 mm. Največja letna količina padavin (2750 mm) je bila zabeležena leta 1965 na opazovalni postaji na Črnem vrhu nad Polhovim Gradcem (Rusjan, 2015). Večje količine padavin padejo v jesenskem (značilnost mediteranskega podnebja) in v poletnem času (vpliv kontinentalnega podnebja) (Rusjan, 2015).

4.1.3 Hidrografske in hidrološke lastnosti

Prispevno območje hudournika Mačkov graben je 2,33 km², povprečni naklon glavne struge je 9.3 %, njena dolžina pa znaša 1780 m (preglednica 5). Za porečje Gradaščice je značilen dežno-snežni pretočni režim s spomladanskim viškom v marcu ali aprilu in jesenskim v novembru, kjer je jesenski višek večinoma izrazitejši. Največji pretoki se običajno pojavijo med jesenskim deževjem in zgodaj spomladi kot posledica taljenja snega. Visoke pretoke lahko opazimo tudi med poletnimi nevihtami, ki so značilne za Polhograjsko hribovje. Najnižji pretoki se običajno pojavijo v mesecu juliju (Rusjan, 2015).

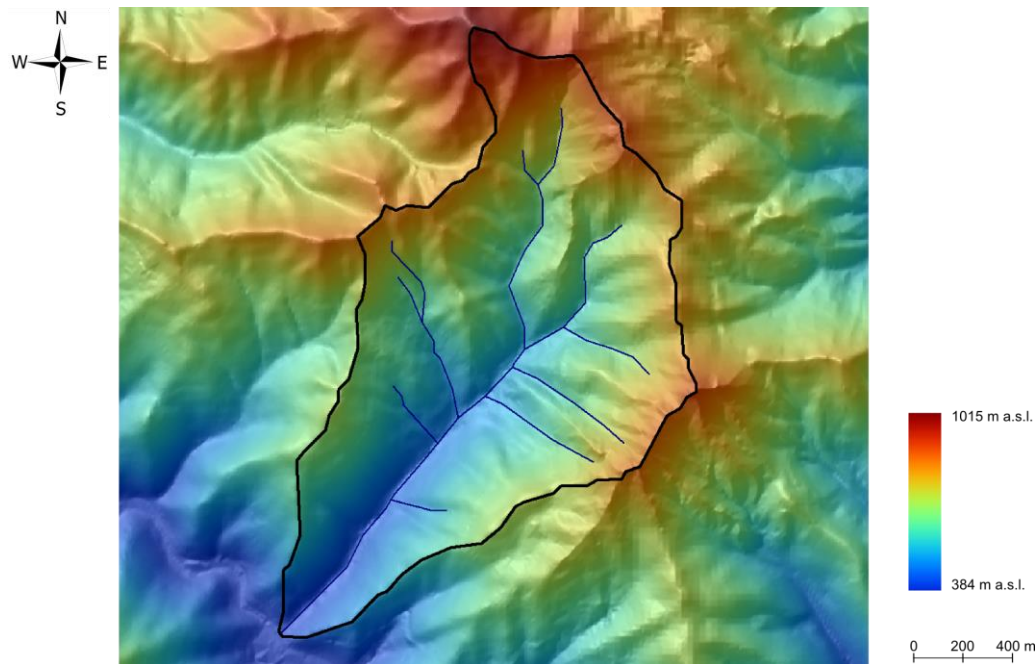


Slika 15 in 16: Struga hudourniškega potoka Mačkov graben (foto: Heco, 2015)

4.1.4 Topografija

Porečje Gradaščice obsega topografsko heterogena območja. Na severnem delu porečja se dviga Polhograjsko hribovje z vrhovi, kot so Tošč (1021 m n.v.) , Pasja ravan (1029 m n.v.), Špik (851 m n.v.), Grmada (898 m n.v.) in Gabrovec (841 m n.v.), jugovzhodni del porečja pa obsega ljubljansko kotlino (Rusjan, 2015). Hudourniško območje Mačkovega grabna tvori razgiban teren s strmimi pobočji in ozkimi dolinami. Razgiban teren z ozkimi dolinami in strmimi pobočji v povirnem delu je v glavnem oblikovala vodna erozija. Na sliki 17 je prikazan

digitalni model višin eksperimentalnega porečja Mačkovega grabna ter struge vodotokov (Rusjan, 2015).

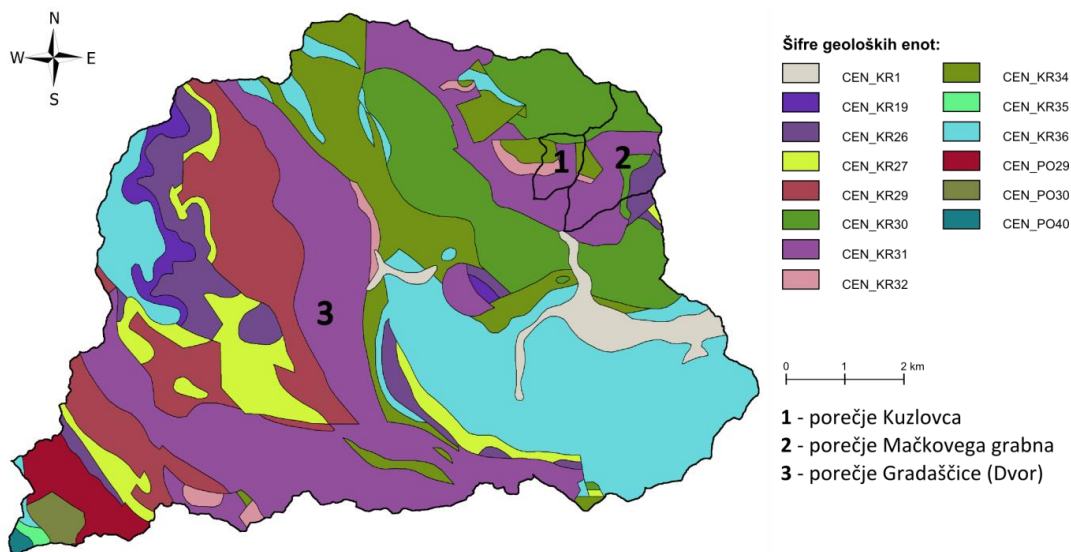


Slika 17: Digitalni model višin (DMV) eksperimentalnega porečja Mačkov graben (Rusjan, 2015)

4.1.5 Geologija

Za Polhograjsko hribovje so značilne hitre spremembe med karbonatno in nekarbonatno osnovo z vmesnimi plastmi mlajših kvartarnih kamnin. Na območju tako najdemo rečne kot kraške morfološke značilnosti. Med nekarbonatnimi kamninami prevladujejo peščenjaki in glinovci paleozojske (permske in karbonske) starosti. Med karbonatnimi kamninami je približno polovica dolomita, kateri prevladuje v osrednjem delu hribovja. Relief območja je zelo razgiban z redkimi ravnimi področji. Najstarejši agregati izhajajo iz permokarbonatov (glinasti melj, alevroliti, peščenjaki in konglomerati) in se nahajajo vzhodno od sotočja vodotokov Božne in Male vode (slika 18). Dolomit, ki je zrnat in porozen izhaja iz zgodnjega perma. Najbolj razširjene so triasne kamenine (laporni apnenci, dolomiti in peščeni skrilavci). Dna dolin so prekrite s srednje debelimi plastmi rečnih nanosov (Rusjan, 2015).

Porečje Mačkovega grabna je geološko zelo raznoliko (slika 18 - porečje 2). Večji del območja je iz lapornega apnenca, dolomita, peščenega skrilavca in oolitnega apnenca. Prisotni so tudi svetlo siv kristalast dolomit, neplastovit dolomit, rdeč peščenjak, alevrolit ter prehodi v skrilavce in konglomerate (Rusjan, 2015).



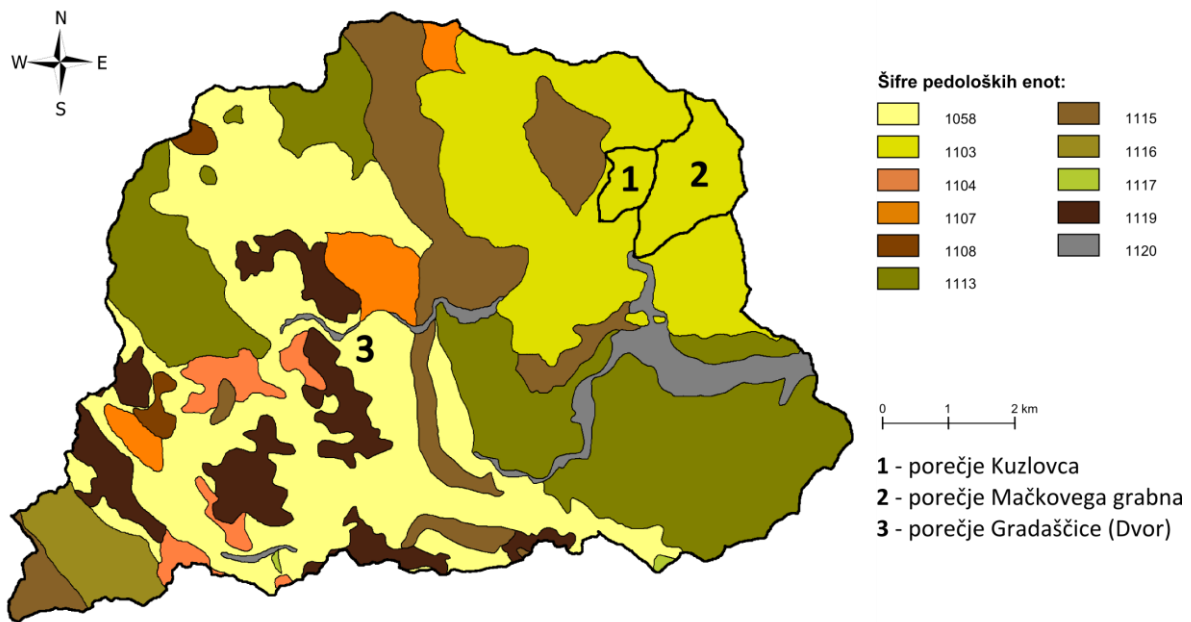
Slika 18: Geološka karta porečij Kuzlovca, Mačkovega grabna in Gradaščice (Rusjan, 2015)

Preglednica 6 : Opis posameznih geoloških enot porečij Kuzlovca, Mačkovega grabna in Gradaščice (Rusjan, 2015)

Šifra	Opis šifre
CEN_KR1	Nanosi rek in potokov
CEN_KR19	Pisan peščenjak, argilit, tufit, apnenec, ponekod z rožencem
CEN_KR26	Svetlo siv kristalast dolomit
CEN_KR27	Piroklastiti, apnenec
CEN_KR29	Dolomit, ploščat apnenec
CEN_KR30	Neplastovit dolomit
CEN_KR31	Laporni apnenec, dolomit, peščen skrilavec, oolitni apnenec
CEN_KR32	Temno siv apnenec in dolomit – žažarske plasti
CEN_KR34	Grödenski skladi – rdeč peščenjak, alevrolit, prehodi v skrilavec in
CEN_KR35	Grödenski skladi – zelenkasto siv peščenjak, alevrolit, prehodi v skrilavec
CEN_KR36	Glinast skrilavec, alevrolit, peščenjak in konglomerat
CEN_PO29	Glavni dolomit
CEN_PO30	Karbonatne in klastične kamenine; boksit
CEN_PO40	Kremenov peščenjak in glinast skrilavec

4.1.6 Pedologija

Porečje Gradaščice do vodomerne postaje Dvor (slika 19) je pedološko izrazito heterogeno, medtem, ko je porečje Mačkovega grabna pedološko homogeno (slika 19 – porečje 2). Sestavljeno je iz rendzine, na apnencu in dolomitu, prhninasta 50% in rendzine, na apnencu in dolomitu, sprsteninasta 50% (Rusjan, 2015).



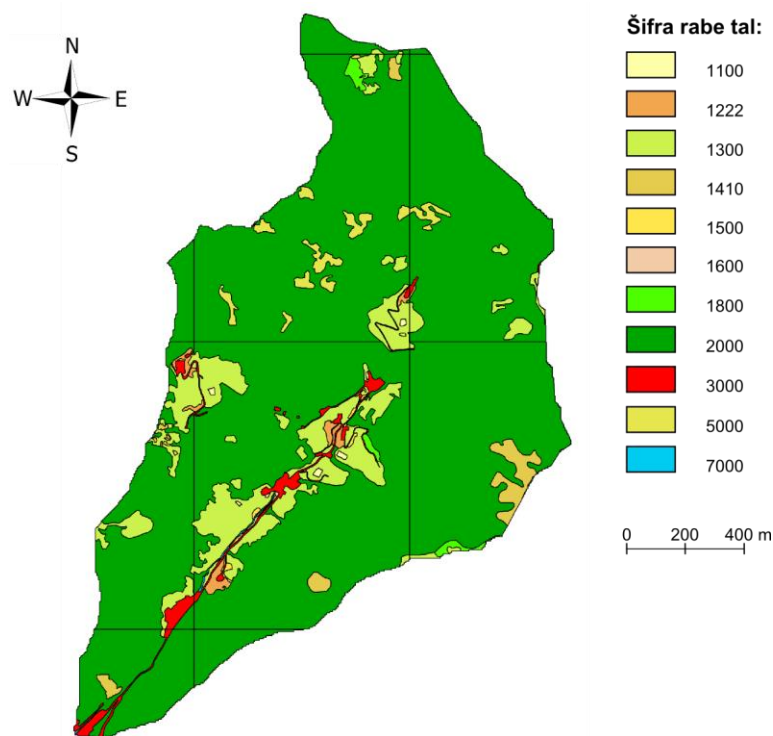
Slika 19: Pedološka karta porečij Kuzlovca, Mačkovega grabna in Gradaščice (Rusjan, 2015)

Preglednica 7: Opis posameznih pedoloških enot porečij Kuzlovca, Mačkovega grabna in Gradaščice (Rusjan, 2015)

Šifra	Opis šifre
1058	Rendzina, na apnencu in dolomitu, sprsteninasta 80%, rendzina, na apnencu in dolomitu, prhninasta 20%
1103	Rendzina, na apnencu in dolomitu, prhninasta 50%, rendzina, na apnencu in dolomitu, sprsteninasta 50%
1104	Rendzina, na apnencu in dolomitu, sprsteninasta 70%, rjava, pokarbonatna tla, na apnencu in dolomitu, tipična 30%
1107	Evtrična rjava tla, na laporju, tipična 80%, evtrična rjava tla, na mehkih karbonatnih kamninah (lapornati apnenci), tipična 20%
1108	Evtrična rjava tla, na vezanih klastičnih pelitskih in psamitskih kamninah, tipična 70%, distrična rjava tla, na vezanih klastičnih kamninah, tipična 20%
1113	Distrična rjava tla, na permo-karbonskih skrilavcih in peščenjakih, tipična 80%, ranker, distričen, erozijski 20%
1115	Distrična rjava tla, na grodenskih peščenjakih, tipična 80%, ranker, distričen, erozijski 20%
1116	Distrična rjava tla, na vezanih klastičnih kamninah, tipična 80%, ranker, distričen, erozijski 20%
1117	Distrična rjava tla, na vezanih klastičnih kamninah, tipična 60%, ranker, distričen, regolitični 40%
1119	Rjava pokarbonatna tla, na apnencu in dolomitu, tipična 80%, rendzina, na apnencu in dolomitu, sprsteninasta 20%
1120	Obrečna tla, evtrična, srednje globoka 50%, obrečna tla, evtrična, zmerno oglašena 30%, obrečna tla, evtrična, globoka 20%

4.1.7 Pokrovnost tal in raba prostora

Na porečju Mačkovega grabna je prevladujoča raba tal gozd (84,8%), pomemben delež zavzema tudi trajni travnik (9,4%), v manjši meri so prisotna tudi kmetijska in pozidana zemljišča (Rusjan, 2015). Raba tal je bila določena z Grafično enoto rabe kmetijstva (GERK).



Slika 20 : Pokrovnost in raba prostora porečja Mačkovega grabna (Rusjan, 2015)

Preglednica 8: Opis posameznih šifrantov iz karte pokrovnosti in rabe prostora (Rusjan, 2015)

Šifra	Opis rabe tal	Površina [km ²]	Delež [%]
2000	Gozd	1,966	84,8
1300	Trajni travnik	0,217	9,4
1410	Kmetijsko zemljišče v zaraščanju	0,033	1,4
1500	Drevesa in grmičevje	0,004	0,2
1222	Ekstenzivni travniški sadovnjak	0,014	0,6
3000	Pozidano in sorodno zemljišče	0,039	1,7
1100	Njive	0,002	0,1
5000	Odprto zemljišče s posebnim rastlinskim pokrovom	0,029	1,3
1800	Kmetijsko zemljišče poraslo z gozdnim drevjem	0,011	0,5
7000	Vodne površine	0,003	0,1

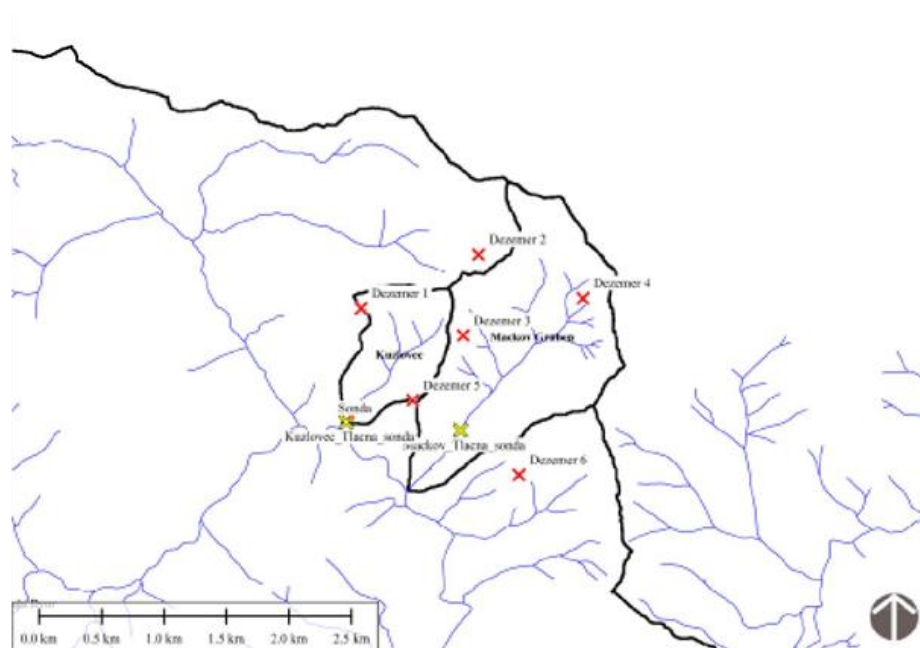
4.2 Meritve in merska oprema

Pri izdelavi diplomske naloge smo uporabili podatke za hudourniško porečje Mačkovega grabna, ki so bili izmerjeni in uporabljeni za potrebe hidrološke primerjave dveh sosednjih eksperimentalnih hudourniških porečij, Kuzlovca in Mačkovega grabna (Bezak et al., 2013).

Za opazovanje hidroloških procesov je bila na porečju Gradaščice postavljena sodobna merska oprema (Bezak et al., 2013):

- 6 avtomatičnih dežemerov (Onset RG2-M), ki so postavljeni v okolici Kuzlovca ter Mačkovega grabna;
- 2 tlačni sonde (Onset HOBO), ki sta locirani na iztoku iz Mačkovega grabna in Kuzlovca, ki sta namenjeni merjenju vodostajev in temperature;
- Sonda za meritve kakovosti vode (Hydrolab MS5), ki se ob ekstremnih dogodkih namesti na porečju Kuzlovca;
- 2 disdrometra (Thies Clima ter OTT Parsivel) sta locirana nekaj kilometrov od obeh eksperimentalnih porečij (Ljubljana ter Črni Vrh nad Polhovim Gradcem) ter merita intenziteto padavin, velikost, porazdelitev in hitrost padavinskih delcev.

Za določitev pretočne krivulje se izvajajo tudi občasne meritve pretokov z merilniki, ki pretok izmerijo na podlagi razredčenja (Flo-tracer) ter na podlagi Dopplerjevega efekta (FlowTracker).



Slika 21: Lokacija merilnih mest na eksperimentalnih porečjih Kuzlovec in Mačkov graben (Bezak et al., 2013)

V diplomski nalogi smo uporabili podatke s tlačne sonde, ki je locirana na iztoku iz Mačkovega grabna ter podatke z dežemera 1 (slika 21).

Za meritve padavin se uporabljajo dežemeri Onset RG2-M, katere pogosto imenujemo tudi prekucniki (ang. *tipping bucket*). Dežemer 1 je bil postavljen poleti 2012. Za zagotovitev ustreznosti meritev je potrebno vsak dežemer umeriti. Kapaciteta spominskega modula (ang. *data logger*) dežemera omogoča zapis 8000 dogodkov. Vsak dogodek oziroma prekuc mehanizma predstavlja 0,2 mm padavin (taka količina je določena s kalibracijo), kar pomeni, da lahko dežemer izmeri 1600 mm padavin (podatki se na spominski modul zapišejo ob padavinskem dogodku), potem pa je potrebno spominski modul sprostiti. Dežemeri Onset RG2-M ne potrebujejo zunanjšega napajanja, spominski modul pa za zapis podatkov uporablja baterijo (Bezák et al., 2013).

Za meritve intenzitete padavin ter porazdelitve padavinskih delcev se uporabljata disdrometra, ki sta locirana v Ljubljani ter Črnem Vrhu nad Polhovim Gradcem. Disdrometer v Ljubljani, na UL FGG je bil postavljen poleti 2013, medtem, ko disdrometer na Črnem Vrhu nad Polhovim Gradcem meritve zagotavlja od poletja 2014. V Ljubljani je postavljen disdrometer proizvajalca OTT Parsivel, na Črnem Vrhu pa disdrometer proizvajalca Thies Clima. Podatki se zapisujejo na spominsko kartico (2 GB), interval merjenja pa je 1 minuta. Osnovni princip delovanja obeh disdrometrov je drugačen kot pri običajnih dežemerih (prekucnikih), saj disdrometer določi količino, hitrost, porazdelitev padavinskih delcev na podlagi algoritma, ki upošteva spremembo napetosti, kot posledico prekinitve žarka (zaradi padavin) med sprejemno in odbojno glavo disdrometra, zato se tudi izmerjene količine padavin razlikujejo od tistih, ki jih izmeri dežemer (Bezák et al., 2013). Podatki z obeh disdrometrov so v realnem času dostopni na spletni strani: <http://ksh.fgg.uni-lj.si/avp/DisCrniVrh/>.



Slika 22: Disdrometer OTT Parsivel v Ljubljani (Bezák et al., 2013)



Slika 23: Disdrometer Thies Clima in avtomatični dežemer na Črnem Vrhu nad Polhovim Gradcem
(Bezák et al., 2013)

Za meritve vodostajev ter temperature zraka in vode na iztoku iz Mačkovega grabna se uporablja sonda proizvajalca Onset HOBO. Ena izmed sond meri vodni tlak, druga pa meri zračni tlak. Na podlagi teh podatkov se lahko določijo vrednosti vodostajev. Zaradi tega razloga sta v porečju postavljeni dve sondi (ena v vodi ter ena v zraku). Izbrani interval merjenja je 10 minut, spominski modul pa omogoča zapis približno 20.000 (64 kB) dogodkov (Bezák et al., 2013).

4.3 Teoretična določitev parametra CN po metodi SCS-CN

Teoretični CN za porečje Mačkovega grabna smo določili s SCS-CN metodo na podlagi tipa zemljine ter rabe in vrste tal (preglednice 1-4).

Različne rabe tal na porečju Mačkovega grabna (preglednica 8) smo združili po sorodnosti oziroma podobni namembnosti:

Preglednica 9: Parameter CN za posamezne rabe tal na porečju mačkovega grabna

Raba tal		Površina [km ²]	Delež [%]	CN
gozd	gozd	1,98	84,8	60
trajni travnik	travnik, košen	0,22	9,4	58
kmetijsko zemljišče v zaraščanju	gozd v kombinaciji s travo (plantaže, sadovnjaki)	0,093	3,9	60
drevesa in grmičevje				
ekstenzivni travniški sadovnjak				
odprto zemljišče s posebnim rastlinskim pokrovom				
kmetijsko zemljišče poraslo z gozdnim drevjem				
pozidano in sorodno zemljišče	neprepustne površine (tlakovane površine, strehe, ceste)	0,042	1.8	98
vodne površine				
njive	poljščine v ravni vrsti	0,0023	0,1	78

Prevladujoča zemljina na porečju Mačkovega grabna je rendzina na apnencu in dolomitu (slika 16). Po klasifikaciji zemljin po SCS (preglednica 1) glede na odtočni potencial smo rendzino na apnencu in dolomitu uvrstili v skupino B, kjer je predvidena stopnja izgub 3,85-7,50 mm/h. Za hidrološke pogoje porečja smo predpostavili, da so povprečni, kar pomeni, da določeni faktorji ohranjajo infiltracijo na konstantni ravni, zaradi česar se površinski odtok ne spreminja. Ker je porečje Mačkovega grabna heterogeno z več vrstami zemljin in različno rabo tal smo enoten CN izračunali po enačbi 14.

Teoretična vrednost CN za porečje Mačkovega grabna na podlagi metode SCS-CN je:

$$CN_{\text{teoretičen}} = 60,7$$

4.4 Določanje parametra CN na podlagi meritev padavin in pretokov

Iz meritev, ki so bile opravljene na porečju Mačkovega grabna smo pridobil podatke za 264 padavinskih dogodkov, v obdobju med 30.4.2013 in 25.11.2014. Na voljo so bili podatki o začetku in koncu padavinskega dogodka, vsoti padavin ter trajanju in povprečni količini padavin. Podatki o vodostajih, pretokih in količini padavin so podani z 10 minutnim intervalom. Za določitev padavinskih dogodkov je bil upoštevan pogoj, da sta dva dogodka ločena, če je med njima več kot 6 ur razlike.

Po metodi SCS smo kot teoretično vrednost CN določil $CN_{\text{teoretičen}} = 60,7$. Z uporabo enačbe za maksimalno potencialno zadrževanje S (enačba 10) smo določili $S = 164,38$ mm, kar nam je omogočilo izračun padavinskih izgub $I_a = 32,88$ mm (enačba 8).

Ob upoštevanju padavinskih izgub $I_a = 32,88$ mm, velja enačba $P > I_a$ za 26 obravnavanih padavinskih dogodkov. Z namenom, da bi zajeli čim večji vzorec in obravnavali čim večje število padavinskih dogodkov, smo se odločili, da obravnavamo padavinske dogodke, za katere velja, da je količina padlih padavin večja od 20 mm. Enako mejo sta v svoji raziskavi izbrala tudi Banasik in Woodward (2010).

Tako smo izločili 52 dogodkov, za katere smo na podlagi meritev izračunali parameter CN. Dva dogodka (19.2.2014, 17:20 – 20.2.2014, 9:20 in 13.2.2014, 21:20 – 14.2.2014, 9:00) za katera podatki o pretokih niso bili na voljo, smo že v začetku izločili. V nadaljevanju naloge smo iz nadaljnjih analiz izločili tudi tri zaporedne dogodke, ki so zgodili med 6.2.2014, 08:00 in 9.2.2014, 17:00. Dogodki so se pojavili v zimskem času in zaradi obilnih snežnih padavin in neustreznosti merske opreme (dežemeri prekucniki) za tovrstne razmere, niso bili primerni za nadaljnjo obravnavo. Khodjeini (1997) trdi, da je metoda CN primerna predvsem za oceno odtoka iz dežnih padavin, in naj se ne bi uporabljala v primeru snežnih padavin, saj je odtok pri zmrznjenih tleh nemogoče oceniti. Tako smo na koncu dobili 47 padavinskih dogodkov in jih razvrstili po količini padavin, v padajočem vrstnem redu (preglednica 10). Vsak padavinski dogodek smo obravnavali posebej.

Na podlagi meritev pretokov smo za vsak dogodek izrisali hidrogram. Ker so hidrogrami z 10-minutnim časovnim korakom vsebovali prevelik »šum«, smo uporabili metodo drsečega povprečja (ang. *moving average*) in izračunali urne vrednosti pretokov. Ker smo za izračun koeficienta CN potreboval podatke o površinskem odtoku je bilo potrebno najprej izločiti bazni odtok.

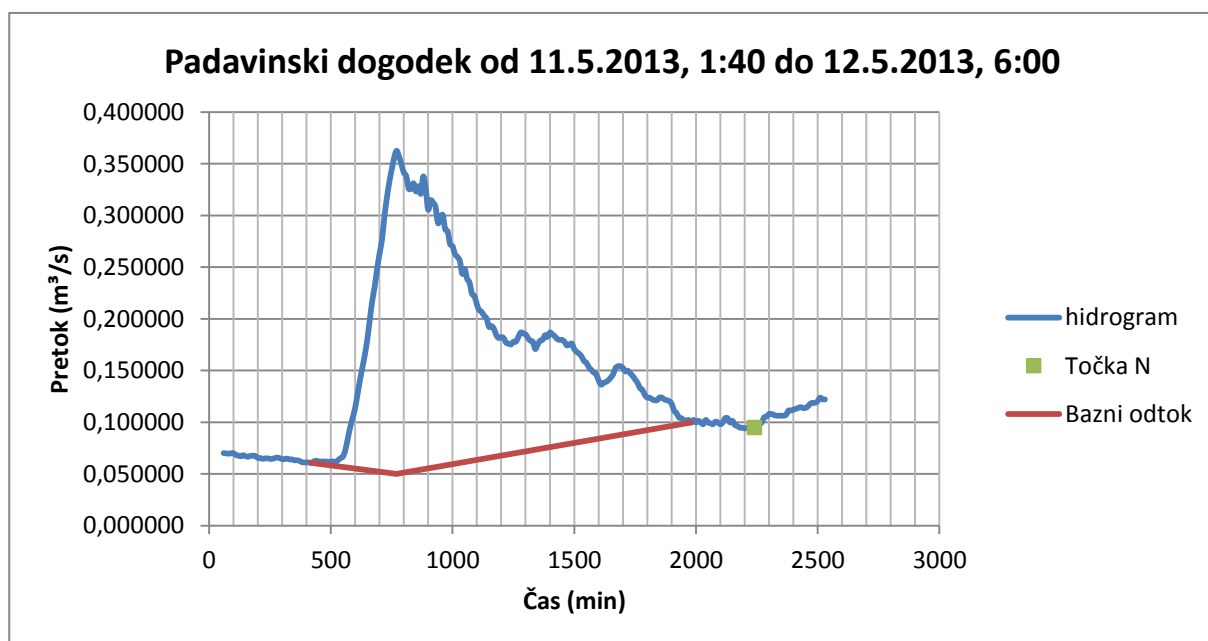
4.4.1 Izločanje baznega odtoka s tri-točkovno metodo

Bazni odtok smo izločili s tri-točkovno metodo, tako, da smo določili razmejitveno črto, ki ločuje bazni odtok od površinskega odtoka. Na levi del krivulje pred začetno točko, ki označuje začetek naraščanja hidrograma, smo narisali tangento, ki povezuje začetno točko s točko, ki seka ordinato vrha hidrograma in je v smeri osi y postavljena nižje od začetne točke. To točko smo nato povezali še s končno točko, ki je prevojna točka na padajočem delu hidrograma.

Čas N, ki predstavlja konec površinskega dela odtoka, nam je služil za določitev neodvisnosti/odvisnosti zaporednih konic hidrograma. Izračunali smo ga po enačbi 2:

$$N = 1,021 \text{ dni} = 1470 \text{ min.}$$

Točko N smo nanesti na vse hidrograme za vsak padavinski dogodek posebej in tako določili, katere zaporedne konice hidrograma obravnavati kot neodvisne pri izločanju baznega odtoka. Primer dogodka je prikazan na sliki 24.



Slika 24: Hidrogram za padavinski dogodek od 11.5.2013, 1:40 do 12.5.2013, 6:00

Slika 24 prikazuje hidrogram in izločeni bazni odtok za padavinski dogodek pod zaporedno številko 13, ki je trajal od 11.5.2013, 1:40 do 12.5.2013, 6:00.

4.4.2 Izračun parametra CN iz meritev

Po izločitvi baznega odtoka smo izračunali površinski odtok:

$$Q_{povr} = Q_{skupni} - Q_{bazni} \quad (20)$$

Nato smo izračunali posamezne volumne površinskega odtoka in jih delili s površino porečja Mačkovega grabna. Tako smo dobili debelino vodne plasti površinskega odtoka za vsak padavinski dogodek posebej:

$$Q = \frac{V}{A}, \quad (21)$$

kjer je:

Q višina vodne plasti površinskega odtoka [mm],

V volumen površinskega odtoka [m³],

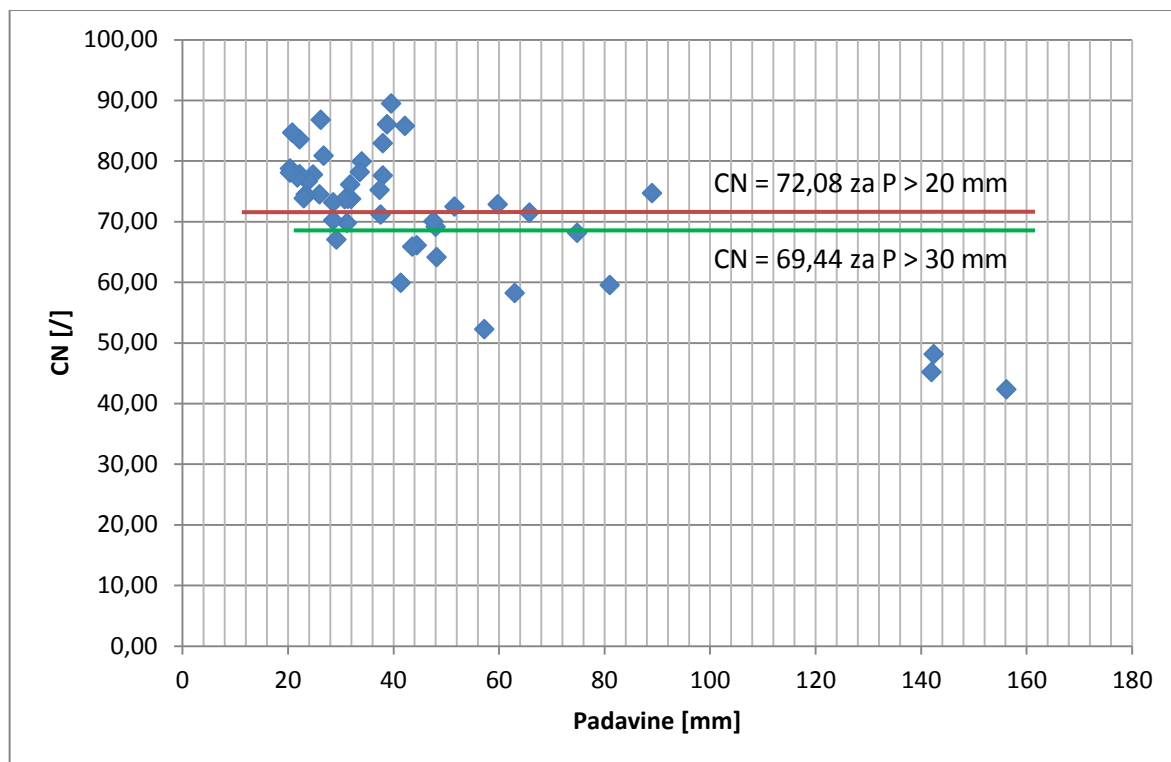
A površina porečja [km²].

Retenzijo oziroma maksimalno zadrževanje smo iz podatkov padavin in odtoka izračunali po enačbi 15. Poznavanje vrednosti S nam je omogočilo izračun vrednosti CN (enačba 11) za vsak padavinski dogodek posebej (preglednica 10).

Preglednica 10: 47 padavinskih dogodkov na Mačkovem grabnu, razporejenih po količini padavin

Dogodek	Začetek dogodka	Konec dogodka	Pi [mm]	ti [min]	CNi	Qi [mm]	Si [mm]
1	5.11.2014 16:00	8.11.2014 21:20	156,2	4660	42,31	17,44	346,37
2	21.10.2014 21:00	22.10.2014 6:40	142,4	600	48,13	21,25	273,79
3	4.8.2014 20:00	5.8.2014 5:20	142,0	580	45,16	16,59	308,47
4	4.1.2014 9:20	6.1.2014 7:20	89,0	2780	74,67	32,61	86,18
5	12.9.2014 16:00	14.9.2014 1:00	81,0	1580	59,49	9,82	172,98
6	22.11.2013 2:40	24.11.2013 4:40	74,8	3020	68,09	15,30	119,02
7	24.12.2013 22:00	27.12.2013 11:00	65,8	3680	71,42	14,05	101,65
8	9.9.2013 5:20	10.9.2013 4:20	63,0	1400	58,18	3,35	182,61
9	17.11.2014 12:40	18.11.2014 15:00	59,8	1600	72,82	12,30	94,80
10	10.2.2014 14:00	12.2.2014 1:20	57,2	2140	52,23	0,47	232,33
11	4.11.2013 1:20	5.11.2013 16:00	51,6	2340	72,45	8,08	96,61
12	24.5.2013 3:20	26.5.2013 2:40	48,2	2860	64,09	2,41	142,29
13	11.5.2013 1:40	12.5.2013 6:00	48,0	1720	69,12	4,61	113,50
14	11.5.2014 19:40	12.5.2014 0:00	47,6	280	70,00	4,95	108,85
15	29.9.2013 6:00	30.9.2013 20:00	44,4	2300	66,08	2,26	130,40
16	24.6.2014 21:00	26.6.2014 1:40	43,6	1740	65,82	1,99	131,90
17	29.12.2013 1:40	1.1.2014 3:00	42,2	1960	85,75	15,00	42,20
18	10.9.2014 19:40	11.9.2014 20:40	41,4	1520	59,85	0,30	170,36
19	8.11.2013 21:20	11.11.2013 0:00	39,6	3060	89,43	17,74	30,03
20	27.4.2014 15:00	28.4.2014 10:40	38,8	1200	86,00	12,97	41,36
21	11.11.2014 20:40	13.11.2014 9:40	38,0	2240	77,55	5,60	73,54
22	19.1.2014 7:20	20.1.2014 16:20	38,0	1200	82,89	9,47	52,44
23	29.6.2014 22:00	30.6.2014 12:20	37,6	880	71,12	2,40	103,14
24	20.8.2014 21:40	21.8.2014 4:00	37,4	400	75,21	4,09	83,71
25	16.1.2014 22:20	18.1.2014 19:00	34,0	2700	79,90	5,29	63,91
26	19.11.2013 13:00	20.11.2013 20:20	33,6	660	78,14	4,16	71,06
27	1.9.2014 0:20	1.9.2014 13:00	32,0	780	73,69	1,84	90,68
28	10.9.2013 16:00	11.9.2013 22:00	31,8	1820	76,10	2,63	79,78
29	3.11.2013 6:40	3.11.2013 17:00	31,4	640	73,72	1,70	90,54
30	23.6.2014 20:40	24.6.2014 12:00	31,2	940	69,74	0,70	110,20
31	5.5.2013 17:40	7.5.2013 5:20	30,8	2160	73,64	1,54	90,94
32	8.7.2014 1:40	9.7.2014 17:00	29,2	1800	67,02	0,14	124,98
33	14.8.2013 4:00	14.8.2013 16:00	28,6	740	70,17	0,43	107,97
34	10.7.2014 0:00	10.7.2014 18:20	28,6	1120	73,11	0,95	93,41
35	23.8.2014 10:00	24.8.2014 17:00	26,8	980	80,83	2,90	60,25
36	22.2.2014 3:40	22.2.2014 21:20	26,2	1080	86,73	5,92	38,88
37	22.3.2014 19:00	23.3.2014 19:00	26,0	1460	74,47	0,77	87,08
38	22.9.2014 16:40	22.9.2014 22:00	24,8	340	77,70	1,26	72,91
39	21.4.2014 1:00	22.4.2014 4:00	23,8	1640	76,60	0,80	77,58
40	24.8.2013 1:40	24.8.2013 4:40	23,4	200	74,45	0,38	87,18
41	20.6.2014 8:00	20.6.2014 22:00	23,0	860	73,82	0,26	90,10
42	17.9.2013 1:00	17.9.2013 13:40	22,2	780	77,79	0,74	72,50
43	14.1.2014 6:40	15.1.2014 6:40	22,2	940	83,54	2,39	50,03
44	14.7.2014 15:20	14.7.2014 17:20	21,8	140	77,24	0,57	74,85
45	17.5.2013 12:00	18.5.2013 1:00	20,8	800	84,63	2,32	46,14
46	25.8.2013 19:20	26.8.2013 14:40	20,4	1180	78,71	0,59	68,71
47	13.8.2014 12:40	14.8.2014 0:00	20,4	700	78,05	0,48	71,43

Na sliki 25 so prikazane vrednosti koeficienta CN v odvisnosti od višine padavin. Prikazani so koeficienti CN za vseh 47 padavinskih dogodkov ter rdeča in zelena črta, ki prikazujeta povprečno vrednost CN za padavinske dogodke večje od 20 in 30 mm.



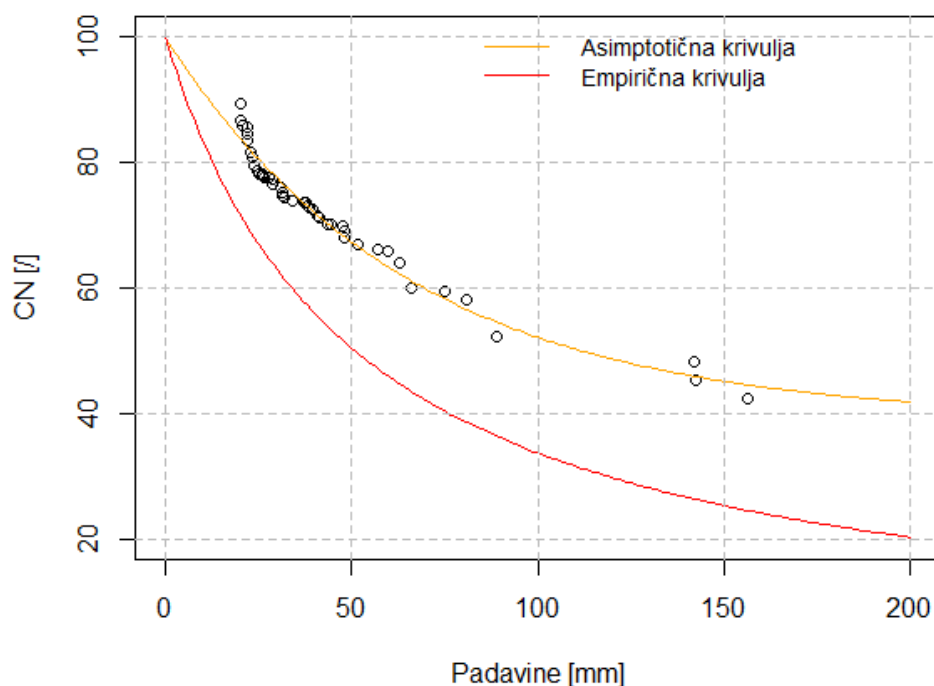
Slika 25: Vrednosti CN za padavinske dogodke, večje od 20 mm in večje od 30 mm

Za padavinske dogodke, večje od 20 mm, je povprečna vrednost CN znašala 71,08. Zaradi primerjave smo izračunali še povprečno vrednost CN za padavinske dogodke večje od 30 mm, katera je znašala 69,44. Najnižja vrednost CN (42,16) je bila izračunana za dogodek od 5.11.2014, 16:00 do 8.11.2014, 21:20, v katerem je padla največja količina padavin 156,2 mm. Najvišja vrednost CN (89,43) pripada padavinskemu dogodku od 8.11.2013, 21:20 do 11.11..2013, 00:00, v katerem je padlo 39.6 mm padavin.

Izkazalo se je, da trem dogodkom z izrazito največjo količino padavin pripadajo najnižji koeficienti CN (preglednica 10).

4.5 Določanje parametra CN z asimptotično metodo

Parameter CN lahko za določeno porečje določimo tudi s pomočjo asimptotičnega pristopa. Merjene podatke o padavinah in površinskem odtoku smo ločeno razvrstili v padajočem vrstnem redu tako, da tvorijo pare ($P - Q$) z enako oziroma ujemajočo se povratno dobo.



Slika 26: Primerjava empirične in asimptotične krivulje ter prikaz določenih vrednosti CN v odvisnosti od višine padavin

Za 47 obravnavanih padavinskih dogodkov smo dobili enačbo asimptotične krivulje (slika 26):

$$CN(P) = 38,99 + 60,9 * \exp(-0,1535 * P).$$

V tem primeru je vrednost $CN_{\infty} = 38,99$ in je občutno nižja od vrednosti CN , določene iz meritev ($CN=72,08$). Koeficient CN , določen z asimptotičnim pristopom je celo nižji od najnižje izračunane vrednosti za obravnavane padavinske dogodke ($CN=42,31$).

Empirična krivulja (slika 26) je bila določena na podlagi enačbe 16 in predstavlja odvisnost koeficienta CN od merjenih padavin.

Potek krivulje nam pove, da je asimptota za porečje Mačkovega grabna nekje med padajočim in standardnim tipom asimptote, vendar se bolj nagiba k padajočem tipu poteka asimptote, kjer pri naraščajočih padavinah, opazovan koeficient CN vztrajno pada in ne kaže nikakršne tendence, da bi dosegel konstantno vrednost. Iz dobljene padajoče krivulje tako nismo mogli povsem zanesljivo določiti koeficienta CN , saj se krivulja ne približuje konstantni vrednosti. Eden izmed razlogov bi lahko bilo omejeno število podatkov, ki smo jih obravnavali v nalogi (približno 50) in relativno majhno število ekstremnih padavinskih dogodkov, ki določajo povezavo med koeficientom CN in izmerjeno količino padavin P .

Določanje parametra CN za porečje Mačkovega grabna z asimptotičnim pristopom torej ni povsem zanesljivo, zato smo s programom HEC-HMS izdelali še hidrološki model porečja Mačkovega grabna, s katerim smo vrednost koeficienta CN določili še na četrti način.

4.6 Določanje parametra CN s hidrološkim modelom v programu HEC-HMS

4.6.1 Umerjanje modela

Vsak hidrološki model porečja, za katerega postavljamo model, je potrebno predhodno umeriti. Hidrološki model umerimo in validiramo na podlagi izmerjenih padavin in pretokov. Parametre modela določimo s primerjavo opazovanega hidrograma odtoka z izračunanim hidrogramom odtoka. Model umerjamo toliko časa, dokler ne dosežemo zadovoljivega ujemanja izračunanega in opazovanega pretoka. Pri procesu umerjanja spreminjamo vrednosti vhodnih parametrov in ugotavljamo občutljivost modela na spremembo posameznih parametrov (Kofol, 2014).

Za umerjanje modela smo izbrali tri padavinske dogodke (slike 27, 28 in 29), za katere smo poskušali izračunani odtok čim bolj približati izmerjenim vrednostim. To smo storili s spreminjanjem koeficienta CN in posledično začetnih izgub ter časa zakasnitve. Pri umerjanju modela smo izbrali padavinske dogodke, ki so se zgodili v različnih letnih časih.

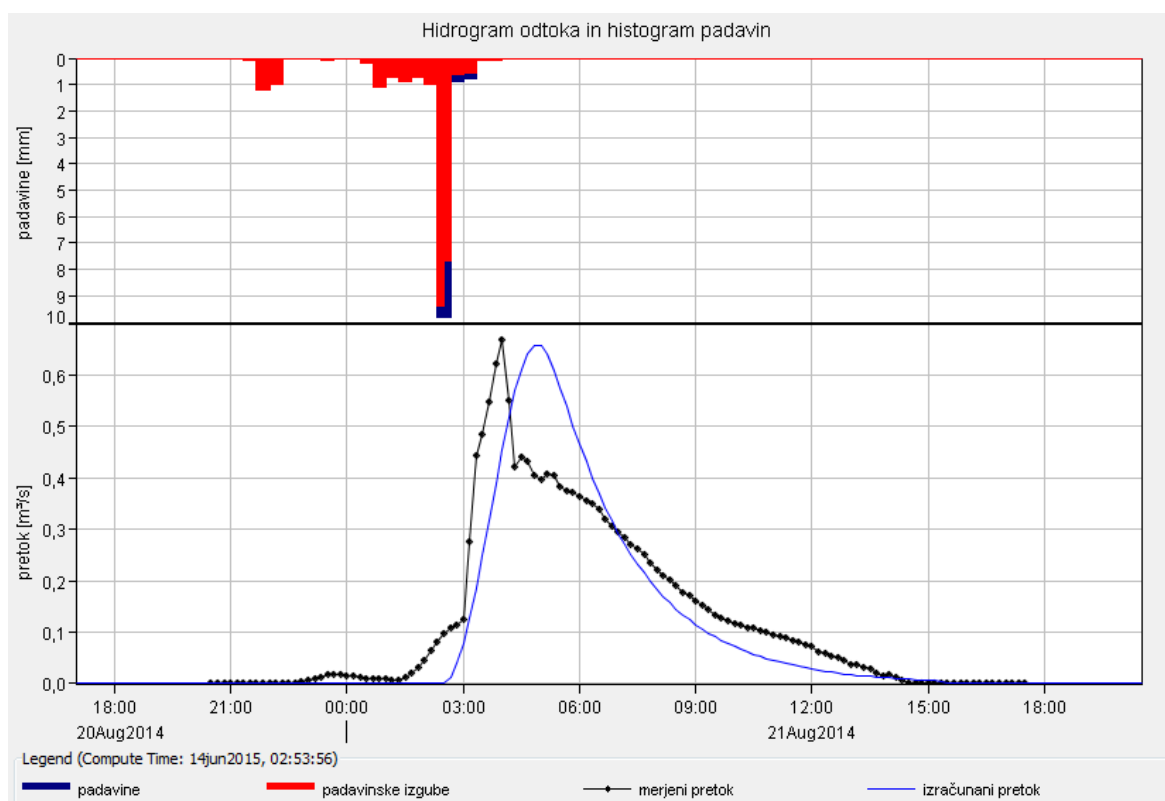
Za izračun padavinskih izgub v hidrološkem modelu smo izbrali metodo SCS CN . Zahtevani vhodni parametri metode so začetne izgube in vrednost koeficienta CN . Za metodo transformacije padavin v odtok smo izbrali sintetični Snyderjev hidrogram enote. Pri vnosu podatkov je bilo potrebno podati čas zakasnitve T_p v urah in koeficient maksimalnega pretoka C_p , ki ima teoretično vrednost med 0,1 in 1,0.

Zadovoljivo ujemanje (na podlagi grafične primerjave med izmerjenimi ter modeliranimi vrednostmi) hidrogramov za tri izbrane padavinske dogodke smo uspeli doseči z naslednjimi vhodnimi parametri:

- $CN = 74,5$
- $I_a = 17,39 \text{ mm}$
- $T_p = 2,3 \text{ h}$
- $C_p = 0,64$

4.6.1.1 Padavinski dogodek 20.8. 2014/21.8.2014

Pri prvem obravnavanem padavinskem dogodku, ki se je začel 20.8.2014 ob 21:40 in končal 21.8.2014 ob 4:00, je v dobrih šestih urah padlo 37,4 mm padavin. Daleč največja intenziteta padavin je bila v noči na 21. avgust, ko je ob 02:40 padlo 19,6 mm padavin. Primerna temu je tudi oblika izračunanega hidrograma, ki nenadoma strmo naraste in ob 05:00 doseže maksimum, torej eno uro kasneje, kot pri merjenih odtokih (slika 27).

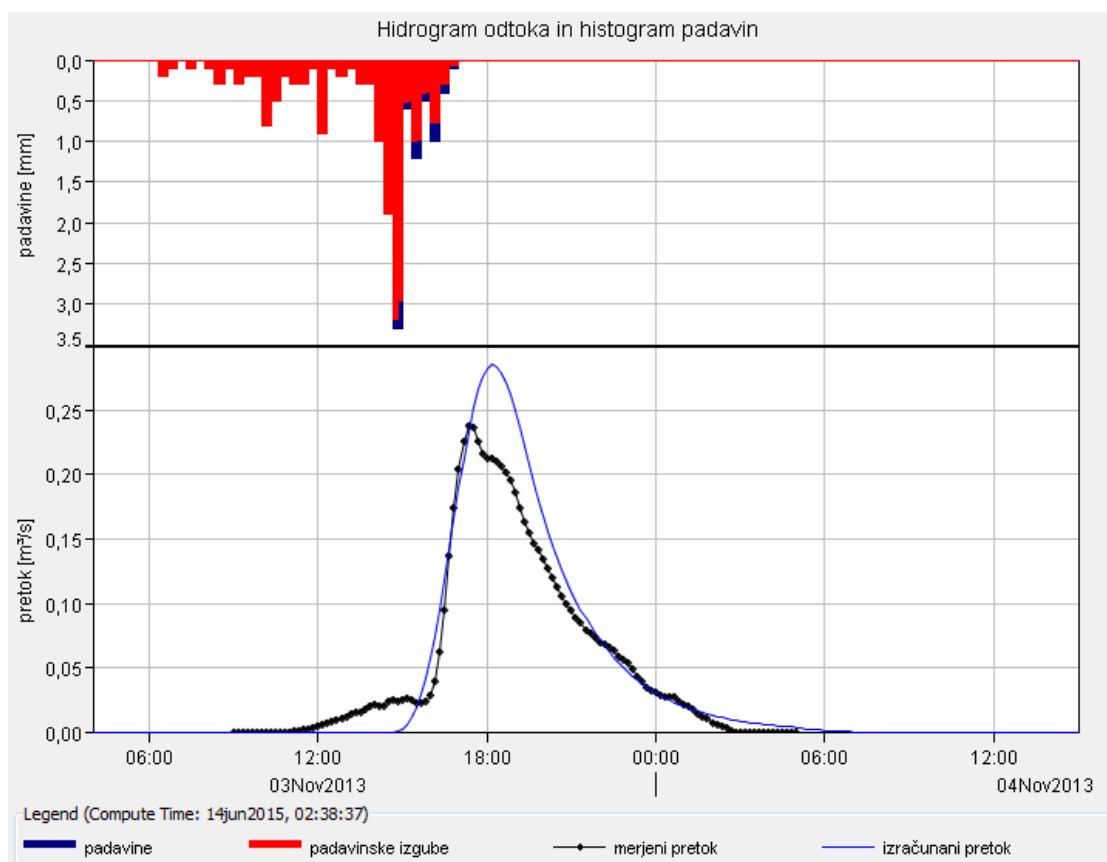


Slika 27: Umerjanje modela za padavinski dogodek 20.8. 2014/21.8.2014

4.6.1.2 Padavinski dogodek 3.11.2013/3.11.2013

Slika 28 prikazuje padavinski dogodek v jesenskem času, v začetku novembra. Padavinski dogodek se je začel 3.11.2013 ob 6:40 in končal 3.11.2014 ob 17:00. Histogram doseže maksimum 3. novembra ob 15:00, ko je količina padavin padavin največja, 6,6 mm. Merjeni

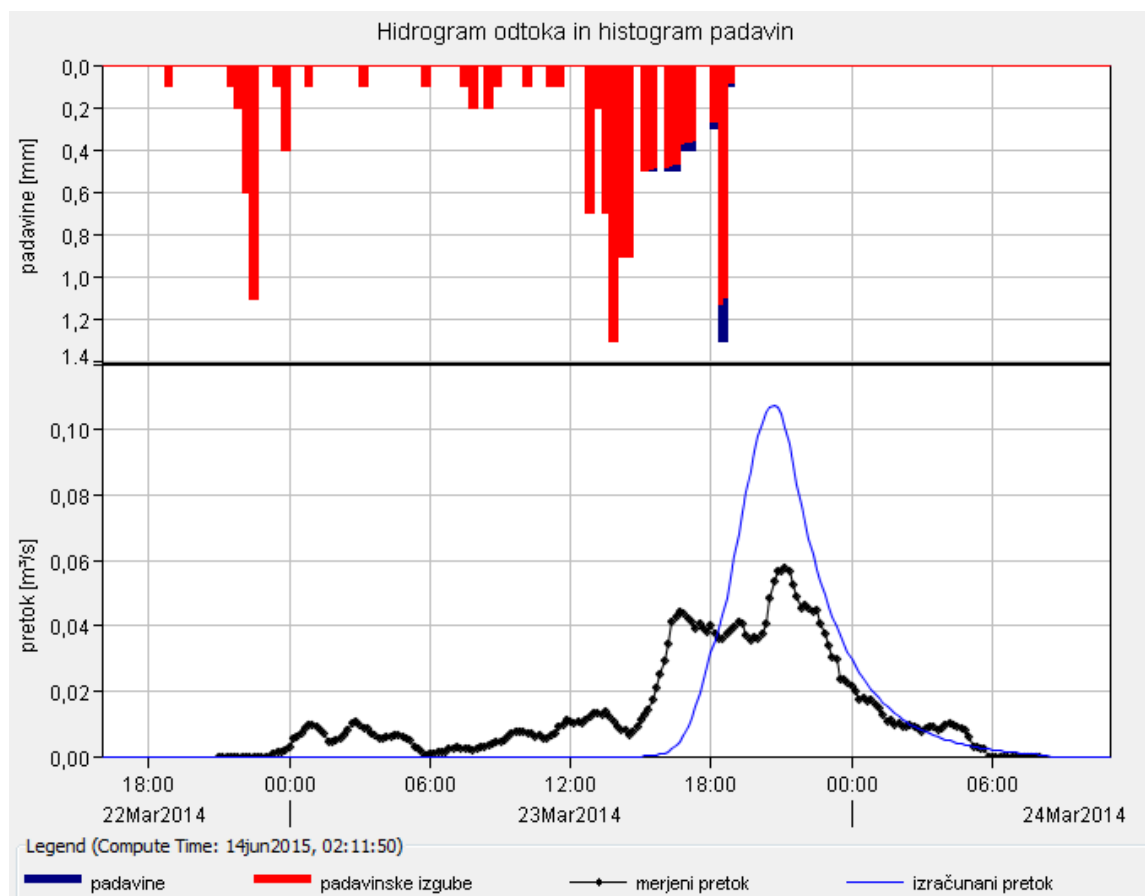
in izračunani odtok začeta naraščati skoraj istočasno, s tem, da z modelom dosežemo nekoliko večji odtok, ki se pojavi malo kasneje kot merjeni, ob 18:00 (slika 28).



Slika 28: Umerjanje modela za padavinski dogodek 3.11.2013/3.11.2013

4.6.1.3 Padavinski dogodek 22.3.2014/23.3.2014

Pri tretjem padavinskem dogodku, ki se je začel 22.3.2014 ob 19:00 in končal 23.3.2014 ob 19:00 je v natanko 24 urah padlo 26 mm padavin. V tem času so se pojavile tri izrazite konice s povečano količino padavin. Izračunani površinski odtok doseže občutno višjo konico kot merjeni odtok (0,058 m³/s), ki je bolj razpotegnjen in traja dalj časa (slika 29). Razlika v obliki hidrogramom nastane, ker program zazna efektivne padavine šele v zaključku padavinskega dogodka.



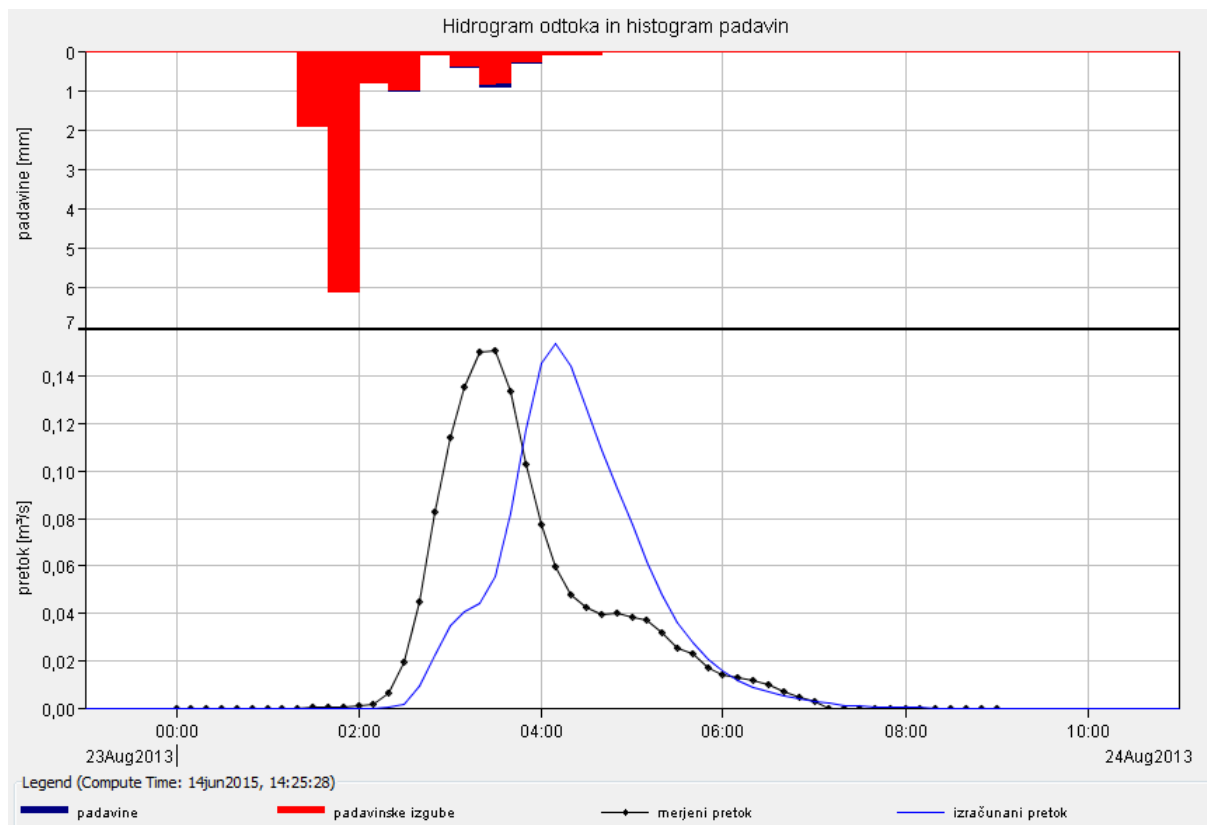
Slika 29: Umerjanje modela za padavinski dogodek 22.3.2014/23.3.2014

4.6.2 Validacija modela

Z umeritvijo hidrološkega modela za izbrane tri padavinske dogodke smo dobili koeficient *CN* izbranega porečja, ki znaša 74,5. Za potrditev rezultata in preverbo točnosti vhodnih parametrov je bilo potrebno model še validirati. Validacijo hidrološkega modela smo izvedli na dveh izbranih padavinskih dogodkih, enem v poletnem času in enem v zimskem.

4.6.2.1 Padavinski dogodek 24.8.2013/24.8.2013

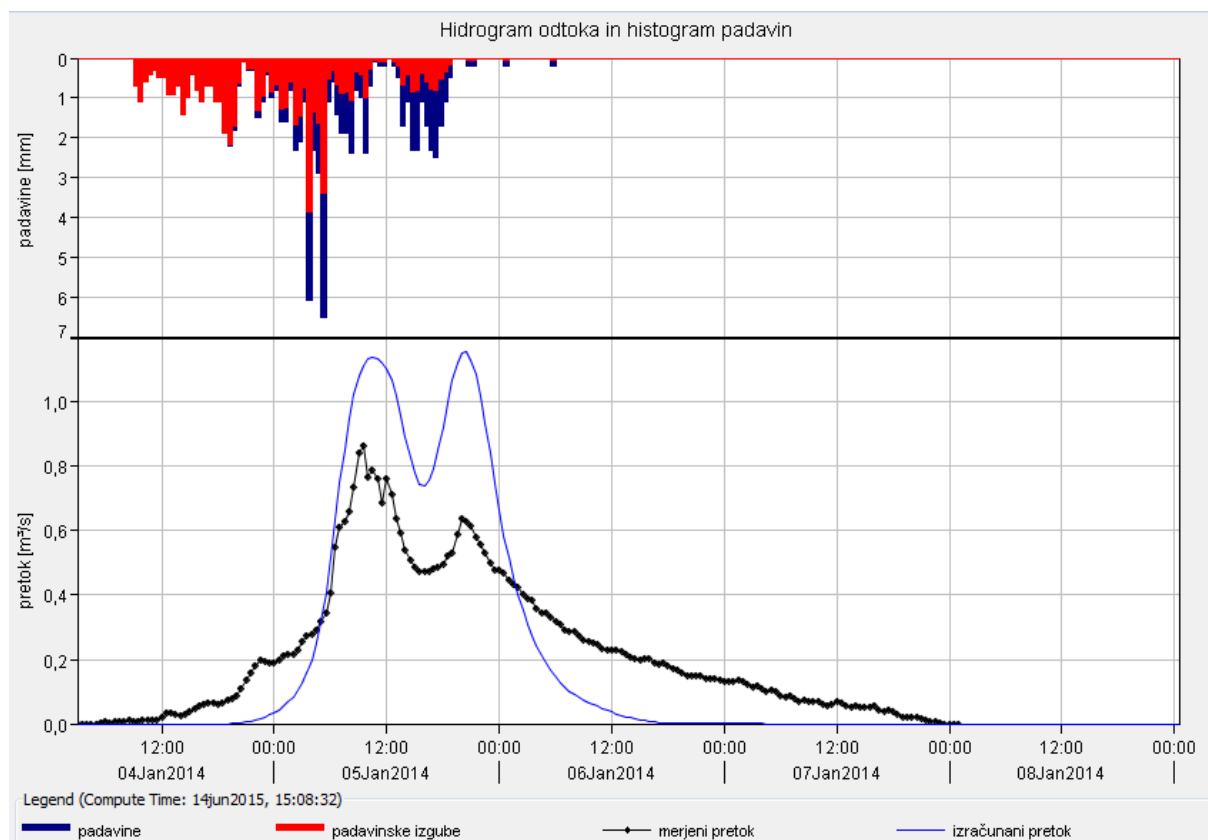
Pri prvem padavinskem dogodku, ki se je začel 24.8.2013 ob 1:40 in končal 24.8.2013 ob 4:40 in s katerim smo validirali model, je padlo 23,4 mm padavin. Gre za kratko poletno nevihto, saj je dogodek trajal le tri ure. Pri merjenem odtoku doseže hidrogram vrh eno uro prej kot pri izračunanem odtoku. Izračunani in merjeni površinski odtok se začneta in zaključita skoraj istočasno (slika 30). Ker gre za nenadno nevihto z veliko intenziteto padavin v relativno kratkem času, hidrograma hitro strmo narasteta in padeta.



Slika 30: Validacija modela za padavinski dogodek 24.8.2013/24.8.2013

4.6.2.2 Padavinski dogodek 4.1.2014/6.1.2014

Drugi padavinski dogodek, ki se je začel 4.1.2014 ob 9:40 in končal 6.1.2014 ob 7:20 in s katerim je bil model validiran, je trajal skoraj dva dneva. V tem času je padlo 89 mm padavin. Izmed vseh 47 obravnavanih padavinskih dogodkov je dogodek od 4.1.2014, 09:40 do 6.1.2014, 07:20, četrti po višini padlih padavin. Hidrograma kažeta dva izrazita vrhova, ki sta medsebojno odvisna in posledica dveh izrazitejših konic padavin. Izračunani odtok začne naraščati kasneje kot merjeni odtok, vendar doseže večji maksimalen odtok (slika 31). Padajoči del izračunanega odtoka je izrazito bolj strm kot pri merjenem odtoku, kar se odrazi pri hitrejšem zaključku izračunanega površinskega odtoka.



Slika 31: Validacija modela za padavinski dogodek 4.1.2014/6.1.2014

Validacijo modela smo izvedli na dveh padavinskih dogodkih, ki sta potrdila vhodne parametre, katere smo določili pri umerjanju modela. Za validacijo hidrološkega modela smo pri obeh dogodkih uporabil koeficient $CN = 74,5$ in začetne izgube $I_a = 17,39$ mm, ki sta omogočila zadovoljivo ujemanje merjenega in izračunanega odtoka.

5 ANALIZA IN PRIMERJAVA REZULTATOV

5.1 Primerjava vrednosti parametra CN po različnih metodah

Parameter CN za porečje Mačkovega grabna smo, kot je opisano v nalogi, določili po štirih metodah:

- z metodo SCS-CN - teoretični CN,
- iz meritev pretokov in padavin za vsak padavinski dogodek posebej CN_i,
- na podlagi padavinskih dogodkov z asimptotičnim pristopom in
- z umerjanjem hidrološkega modela porečja Mačkovega grabna v programu HEC-HMS.

Vrednosti parametra CN določene po različnih metodah so prikazane v preglednici 11.

Preglednica 11: Primerjava parametrov CN določenih z različnimi metodami

Metoda določanja parametra CN	CN [I]
SCS - CN metoda	60,7
Merjeni pretoki in padavine	72,1
Asimptotična metoda	39,0
Modeliranje v HEC - HMS	74,5

Najvišjo vrednost parametra CN (74,5) smo dobili z umerjanjem modela v programu HEC – HMS. Tej vrednosti smo se najbolj približali z določanjem parametra CN za posamezne padavinske dogodke iz meritev pretokov in padavin, kjer je vrednost CN znašala 72,1. Nekoliko nižjo vrednost, 60,7 smo dobili z metodo SCS–CN, kjer se CN določi na podlagi rabe tal in tipa zemljine. Daleč najnižja vrednost parametra CN (39,0) je bila določena z asimptotično metodo.

Parameter CN, določen z asimptotičnim pristopom moramo jemati z veliko rezerve, saj smo v našem primeru dobili tip asimptote, ki konvergira neizrazito in ne omogoča zanesljive določitve parametra CN.

Določitev *CN* po metodi SCS – *CN* odraža predvsem rabo tal na porečju Mačkovega grabna. 84,8 % prispevnega območja namreč pokriva gozd, za katerega ob povprečnih hidroloških pogojih in skupini zemljin B (preglednica 4), velja koeficient *CN* = 60, kar je skoraj identično koeficientu *CN* določenemu za celotno obravnavano porečje po metodi SCS–*CN*.

Določitev vrednosti koeficienta *CN* iz meritev pretokov in padavin za 47 padavinskih dogodkov, večjih od 20 mm znaša 72,1. Za 31 dogodkov, večjih od 30 mm vrednost parametra *CN* znaša 69,4. Ugotovimo lahko, da povprečno vrednost *CN* občutno zmanjšujejo trije dogodki z največjo količino padavin, katerih *CN* ne preseže vrednosti 50.

S hidrološkim modelom v programu HEC – HMS smo dobili najvišjo vrednost parametra *CN* izmed vseh metod. V rezultatih so bile opazne razlike v obliki hidrogramov merjenega in izračunanega odtoka. Razlika je v glavnem nastala zaradi različnih obdobij izbranih padavinskih dogodkov in neupoštevanja predhodne vlažnosti zemljine. Pri določanju *CN* z umerjanjem modela seveda lahko pride do razlik v vrednosti parametra *CN*, odvisno od tega, katere dogodke izberemo za umerjanje in validacijo modela.

5.2 Sezonska odvisnost parametra *CN*

Količina in intenzivnost padavin se skozi celotno leto spreminjata. Posledično tudi parameter *CN* niha med letnimi časi. Razlike v vrednostih *CN* se v glavnem pojavijo zaradi različnih karakteristik padavinskih dogodkov in razlik v stanju površja. Za enako količino padavin omogočajo predhodno namočene zemljine večji odtok in imajo višji *CN* kot suhe zemljine (Gajbhiye, 2013).

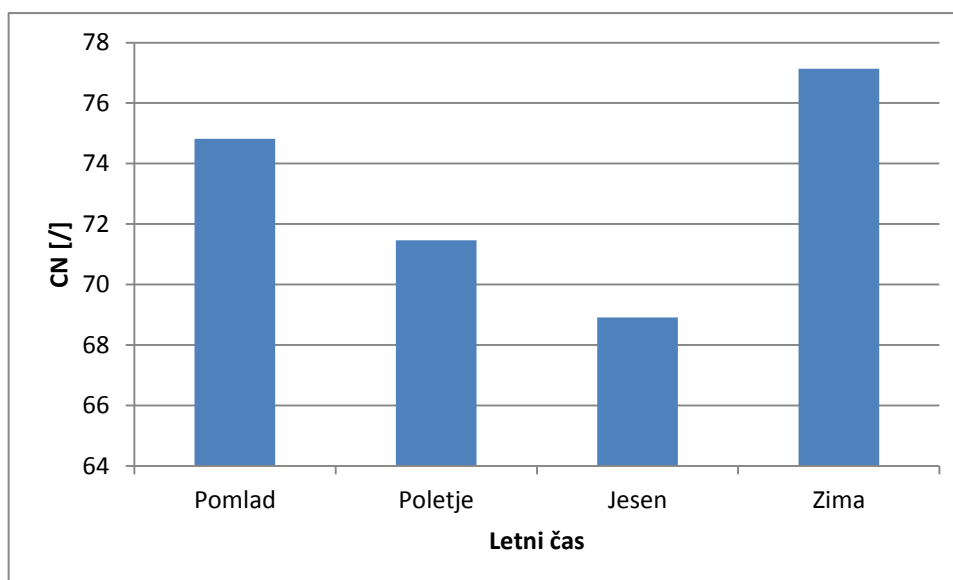
Čeprav je metoda *CN* v široki uporabi in dobro dokumentirana, Jacobs in Srinivasan (2005) trdita, da je upoštevanje razlik v vhodnih parametrih na lokalni ravni in sezonskih variacijah skorajda obvezno. Simulacija odtoka s konstantnimi parametri ima omejeno natančnost, saj se odziv porečja zelo razlikuje v odvisnosti od letnega časa (Paik et al., 2005).

Upoštevanje spremenljivosti vrednosti *CN* med letnimi časi in celo meseci, se odraža v bolj natančni oceni odtoka in večji natančnosti določitve parametra *CN*. Za boljše razumevanje vpliva različnih letnih časov na določanje parametra *CN* na porečju Mačkovega grabna, smo padavinske dogodke razdelili v štiri letne čase oziroma sezone (preglednica 12).

Preglednica 12: Letni časi in pripadajoči meseci

Sezona	Letni čas	Meseci
1	pomlad	marec, april, maj
2	poletje	junij, julij, avgust
3	jesen	september, oktober, november
4	zima	december, januar, februar

Povprečne vrednosti *CN* za posamezne letne čase v letih 2013 in 2014 (slika 32) se med seboj občutno razlikujejo. Najvišja povprečna vrednost *CN* je pozimi in znaša 77,14, medtem, ko je najnižja jeseni in znaša 68,91. Poleti ($CN = 71,46$) in pomladi ($CN = 74,82$) sta vrednosti *CN* nekje vmes med zimsko in jesensko vrednostjo. Povprečni parameter *CN* v zimskem obdobju bi bil še višji, če ne bi bilo padavinskega dogodka od 10.2.2014/12.2.2014, za katerega je vrednost *CN* znašala samo 52,23.



Slika 32: Povprečna vrednost CN glede na letni čas

Za še bolj natančno analizo *CN* vrednosti smo 47 obravnavanih padavinskih dogodkov v letih 2013 in 2014 razdelil po mesecih (preglednice 13, 14, 15 in 16) in izračunali povprečne vrednosti koeficientov *CN* za vsak mesec posebej.

Preglednica 13: Padavinski dogodki v pomladnih mesecih

MESEC	ZAČETEK DOGODKA	KONEC DOGODKA	Pi [mm]	ti [min]	CNi	CN _{povp}	Qi [mm]	Si [mm]
marec	22.3.2014 19:00	23.3.2014 19:00	26	1460	74,47	74,47	0,77	87,08
april	21.4.2014 1:00	22.4.2014 4:00	23,8	1640	76,60		0,80	77,58
	27.4.2014 15:00	28.4.2014 10:40	38,8	1200	86,00		12,97	41,36
	5.5.2013 17:40	7.5.2013 5:20	30,8	2160	73,64	81,30	1,54	90,94
maj	11.5.2013 1:40	12.5.2013 6:00	48	1720	69,12		4,61	113,50
	11.5.2014 19:40	12.5.2014 0:00	47,6	280	70,00		4,95	108,85
	17.5.2013 12:00	18.5.2013 1:00	20,8	800	84,63		2,32	46,14
	24.5.2013 3:20	26.5.2013 2:40	48,2	2860	64,09	72,29	2,41	142,29

Preglednica 14: Padavinski dogodki v poletnih mesecih

MESEC	ZAČETEK DOGODKA	KONEC DOGODKA	Pi [mm]	ti [min]	CNi	CN _{povp}	Qi [mm]	Si [mm]
junij	20.6.2014 8:00	20.6.2014 22:00	23	860	73,82		0,26	90,10
	23.6.2014 20:40	24.6.2014 12:00	31,2	940	69,74		0,70	110,20
	24.6.2014 21:00	26.6.2014 1:40	43,6	1740	65,82		1,99	131,90
	29.6.2014 22:00	30.6.2014 12:20	37,6	880	71,12	70,12	2,40	103,14
julij	8.7.2014 1:40	9.7.2014 17:00	29,2	1800	67,02		0,14	124,98
	10.7.2014 0:00	10.7.2014 18:20	28,6	1120	73,11		0,95	93,41
	14.7.2014 15:20	14.7.2014 17:20	21,8	140	77,24	72,46	0,57	74,85
avgust	4.8.2014 20:00	5.8.2014 5:20	142	580	45,16		16,59	308,47
	13.8.2014 12:40	14.8.2014 0:00	20,4	700	78,05		0,48	71,43
	14.8.2013 4:00	14.8.2013 16:00	28,6	740	70,17		0,43	107,97
	20.8.2014 21:40	21.8.2014 4:00	37,4	400	75,21		4,09	83,71
	23.8.2014 10:00	24.8.2014 17:00	26,8	980	80,83		2,90	60,25
	24.8.2013 1:40	24.8.2013 4:40	23,4	200	74,45		0,38	87,18
	25.8.2013 19:20	26.8.2013 14:40	20,4	1180	78,71	71,80	0,59	68,71

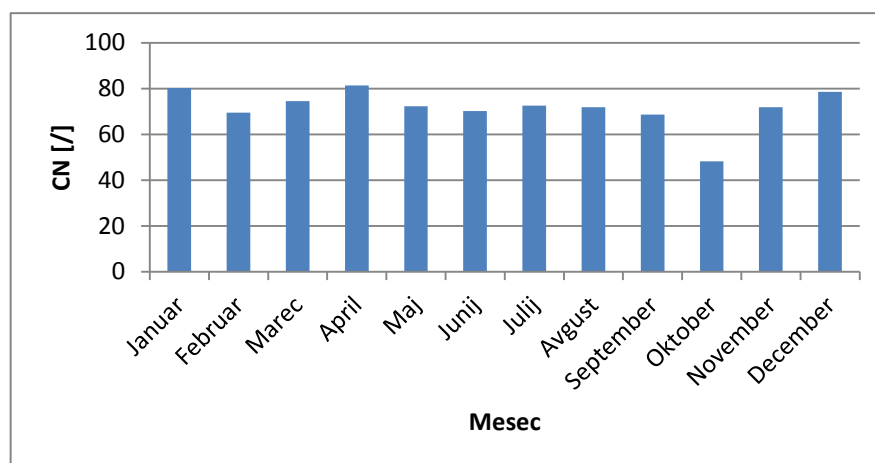
Preglednica 15: Padavinski dogodki v jesenskih mesecih

MESEC	ZAČETEK DOGODKA	KONEC DOGODKA	Pi [mm]	ti [min]	CNi	CN _{povp}	Qi [mm]	Si [mm]
september	1.9.2014 0:20	1.9.2014 13:00	32	780	73,69		1,84	90,68
	9.9.2013 5:20	10.9.2013 4:20	63	1400	58,18		3,35	182,61
	10.9.2013 16:00	11.9.2013 22:00	31,8	1820	76,10		2,63	79,78
	10.9.2014 19:40	11.9.2014 20:40	41,4	1520	59,85		0,30	170,36
	12.9.2014 16:00	14.9.2014 1:00	81	1580	59,49		9,82	172,98
	17.9.2013 1:00	17.9.2013 13:40	22,2	780	77,79		0,74	72,50
	22.9.2014 16:40	22.9.2014 22:00	24,8	340	77,70		1,26	72,91
	29.9.2013 6:00	30.9.2013 20:00	44,4	2300	66,08	68,61	2,26	130,40
	oktober	21.10.2014 21:00	22.10.2014 6:40	142,4	600	48,13	48,13	21,25
november	3.11.2013 6:40	3.11.2013 17:00	31,4	640	73,72		1,70	90,54
	4.11.2013 1:20	5.11.2013 16:00	51,6	2340	72,45		8,08	96,61
	5.11.2014 16:00	8.11.2014 21:20	156,2	4660	42,31		17,44	346,37
	8.11.2013 21:20	11.11.2013 0:00	39,6	3060	89,43		17,74	30,03
	11.11.2014 20:40	13.11.2014 9:40	38	2240	77,55		5,60	73,54
	17.11.2014 12:40	18.11.2014 15:00	59,8	1600	72,82		12,30	94,80
	19.11.2013 13:00	20.11.2013 20:20	33,6	660	78,14		4,16	71,06
	22.11.2013 2:40	24.11.2013 4:40	74,8	3020	68,09	71,81	15,30	119,02

Preglednica 16: Padavinski dogodki v zimskih mesecih

MESEC	ZAČETEK DOGODKA	KONEC DOGODKA	P _i [mm]	t _i [min]	CN _i	CN _{povp}	Q _i [mm]	S _i [mm]
december	24.12.2013 22:00	27.12.2013 11:00	65,8	3680	71,42		14,05	101,65
	29.12.2013 1:40	1.1.2014 3:00	42,2	1960	85,75	78,59	15,00	42,20
januar	4.1.2014 9:20	6.1.2014 7:20	89	2780	74,67		32,61	86,18
	14.1.2014 6:40	15.1.2014 6:40	22,2	940	83,54		2,39	50,03
	16.1.2014 22:20	18.1.2014 19:00	34	2700	79,90		5,29	63,91
	19.1.2014 7:20	20.1.2014 16:20	38	1200	82,89	80,25	9,47	52,44
februar	10.2.2014 14:00	12.2.2014 1:20	57,2	2140	52,23		0,47	232,33
	22.2.2014 3:40	22.2.2014 21:20	26,2	1080	86,73	69,48	5,92	38,88

Slika 33 prikazuje povprečne vrednosti CN po mesecih. Najnižja povprečna vrednost parametra CN je bila dosežena v oktobru (CN = 48,13) in najvišja v aprilu (CN = 81,30).



Slika 33: Povprečna vrednost parametra CN po mesecih

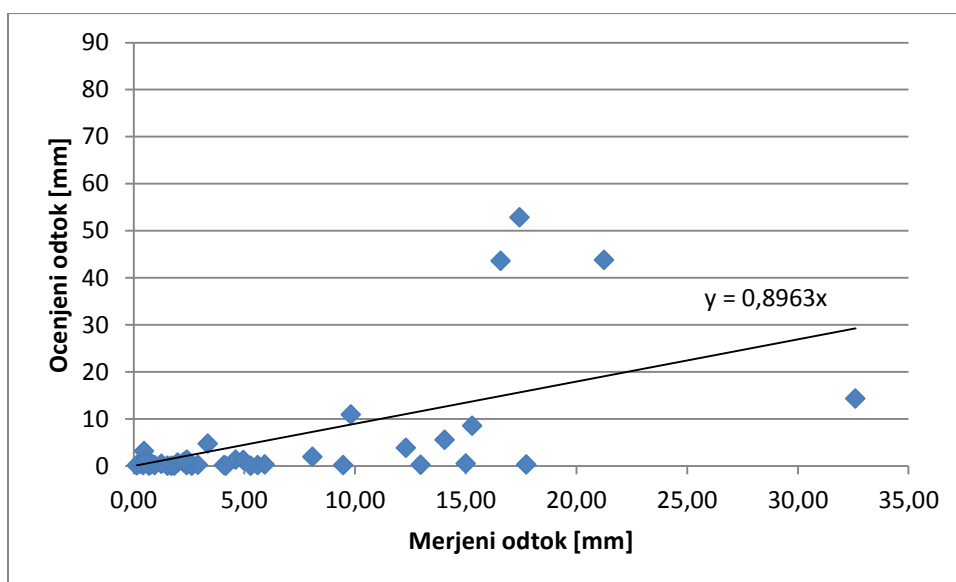
V diplomski nalogi smo obravnavali in analizirali padavinske dogodke, ki so se zgodili v malo več kot enem letu. Za zanesljive zaključke o sezonskem obnašanju je obravnavano obdobje prekratko. Spreminjanje parametra CN skozi letne čase bi bilo potrebno analizirati za več let, da bi lahko podali zanesljivejša zaključka o sezonski odvisnosti parametra CN. V letu 2013 je bilo na padavinski postaji Črni vrh nad Polhovim Gradcem izmerjenih 1549,6 mm padavin. Pri tem ni bil upoštevan mesec maj, za katerega podatki niso na voljo. Največ padavin je leta 2013 padlo v novembru, 283,6 mm, najmanj pa v juliju 32,3 mm. Leta 2013 je bilo na padavinski postaji izmerjenih 77 dni s snežno odejo, kar je občutno več, kot leta 2014. Leta 2014 je bilo na padavinski postaji Črni vrh nad Polhovim Gradcem izmerjeno 2468,3 mm padavin. Največ jih je padlo februarja, 341,7 mm, najmanj pa marca, 53,7 mm. V letu 2014 je bilo na obravnavani padavinski postaji zabeleženo 35 dni s snežno odejo. Največ, 20 dni s snežno odejo je bilo v februarju. Meritve na eksperimentalnem porečju Mačkovega grabna so se začele šele v aprilu 2013, zato zimski meseci leta 2013, ki so bili bogati s snežno odejo, v

diplomski nalogi niso zajeti. Obravnavali smo torej samo padavinske dogodke iz zimskih mesecev v letu 2014, v katerem je padlo relativno malo snega. Poletje 2013 je bilo z 232,7 mm padavin relativno suho, medtem, ko je bilo poletje 2014 z 629,8 mm padavin bolj namočeno.

5.3 Odvisnost med merjenim in ocenjenim odtokom

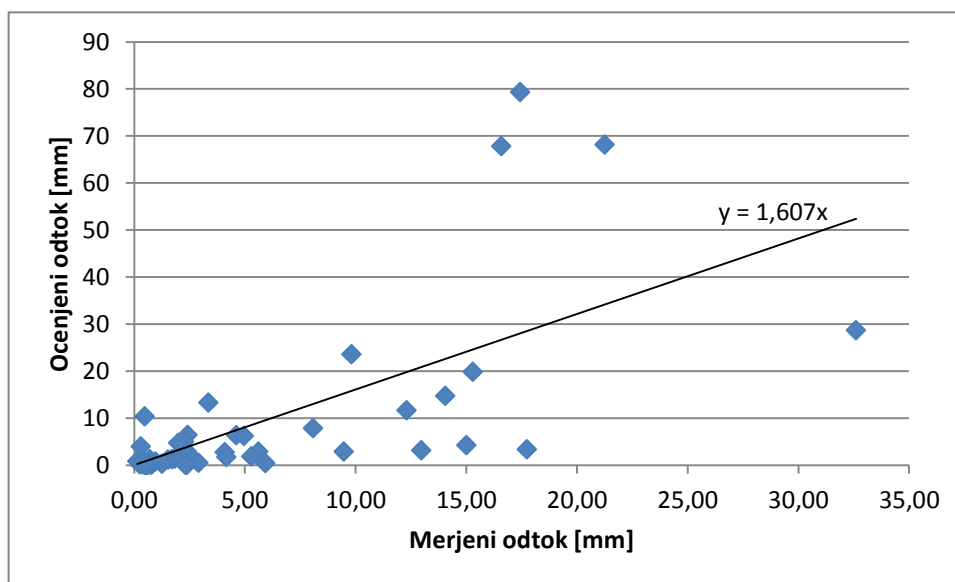
Merjeni površinski odtok smo dobili z izločanjem baznega odtoka na podlagi meritev padavin in pretokov. Na spodnjih slikah 34 do 37 smo primerjali merjeni odtok z ocenjenim odtokom (po vseh štirih metodah) in za vsako metodo posebej določili enačbo linearne regresije.

Na sliki 34 je prikazano razmerje med merjenim in ocenjenim odtokom pri parametru $CN=60,71$, katerega smo dobili z metodo SCS-CN.



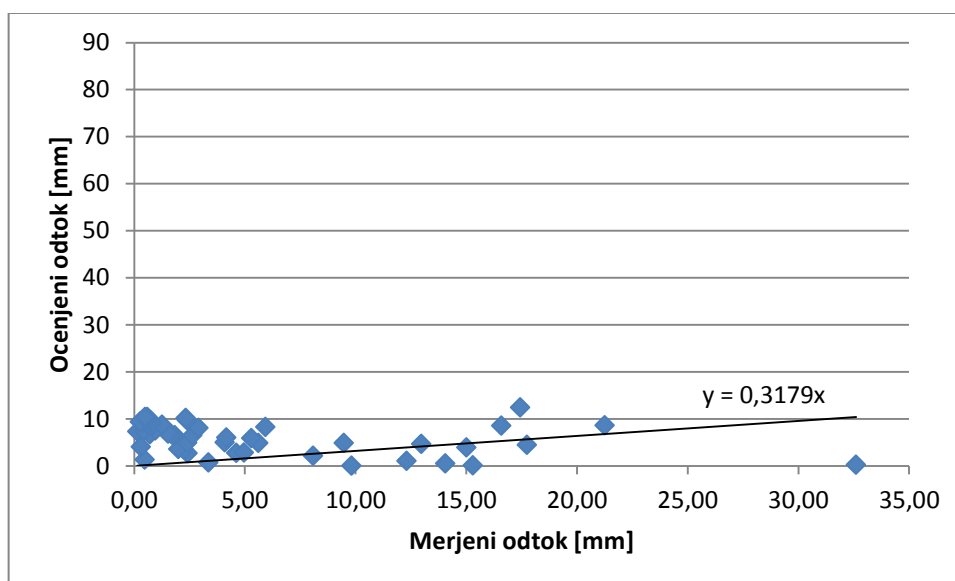
Slika 34: Odvisnost med merjenim in ocenjenim odtokom pri parametru CN po metodi SCS

Iz meritev padavin in pretokov smo za vsak obravnavani padavinski dogodek izračunali svoj parameter CN. Za povprečno vrednost vseh dogodkov smo dobili parameter $CN=72,08$. Na sliki 37 je prikazano razmerje med merjenim in ocenjenim odtokom za povprečno vrednost CN, pridobljeno iz meritev padavin in odtokov.



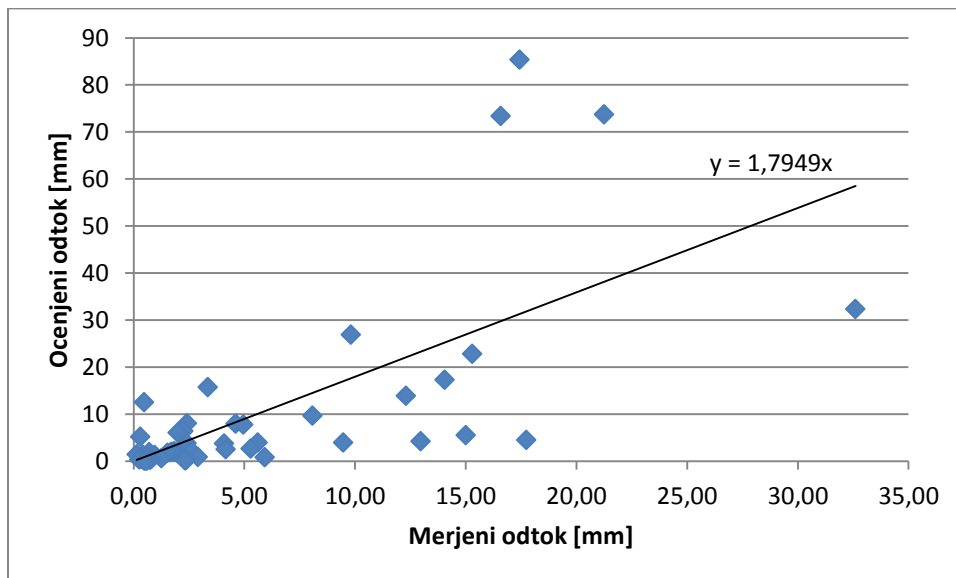
Slika 35: Odvisnost med merjenim in ocenjenim odtokom pri povprečnem parametru CN pridobljenim iz meritev padavin in pretokov

Zaradi majhnega razpona vrednosti ocenjenih pretokov je naklon regresijske premice najmanjši pri metodi z asimptoto (slika 35), na kar vpliva izrazito najnižja vrednost parametra CN izmed vseh obravnavanih metod.



Slika 36: Odvisnost med merjenim in ocenjenim odtokom pri parametru CN po metodi z asimptoto

Pri hidrološkem modelu pride do največjega raztrosa ocenjenih odtokov. Največji ocenjeni odtok znaša 85,35 mm. Posledično dobimo pri tem primeru najbolj strmo regresijsko premico izmed vseh štirih obravnavanih odvisnostih.



Slika 37: Odvisnost med merjenim in ocenjenim odtokom pri parametru CN po umeritvi modela v programu HEC-HMS

6 ZAKLJUČKI

Parameter *CN* se v hidrologiji uporablja za oceno površinskega odtoka kot posledico padavin, na podlagi rabe tal in lastnosti zemljine. Poznavanje lastnosti porečja in njegove sposobnosti ustvariti odtok na podlagi padavin, je ena izmed ključnih raziskovalnih tem v hidrologiji. Pomembno vlogo pri tem igra parameter *CN*, ki ga lahko določimo s pomočjo različnih metod.

V diplomski nalogi smo določili parameter *CN* za manjše porečje Mačkovega grabna po štirih različnih metodah in podrobno predstavili tudi njihovo teoretično ozadje.

Z metodo SCS-CN smo na podlagi rabe tal in tipa zemljine določili t.i. teoretično vrednost *CN* za porečje Mačkovega grabna. Porečje se razteza na relativno majhni površini 2,33 km² in je bilo v preteklosti že dobro raziskano, kar nam je omogočilo pridobitev veliko različnih podatkov o lastnostih porečja. Tako smo z metodo SCS-CN lahko precej natančno določili teoretično vrednost parametra *CN*, ki je znašala 60,7.

Osrednji in najboljšežnejši del naloge je bilo določanje parametra *CN* iz meritev padavin pretokov za obravnavane padavinske dogodke. Z izločanjem baznega odtoka smo določili površinski odtok, kar je omogočilo izračun retenzije porečja in parametra *CN*. Izkazalo se je, da z naraščanjem padavin parameter *CN* načeloma pada, kar ni povsem logično, saj večja količina padavin povzroči zasičenost tal, kar pomeni večji odtok. Trije dogodki z največjo količino padavin so imeli najnižje vrednosti *CN*. Razlog za to bi lahko bil tudi v pretočni krivulji, ki bi lahko podcenjevala velike dogodke, kar pomeni, da bi lahko bile izmerjene vrednosti pretokov podcenjene. Povprečna vrednost tako določenega *CN* je za padavinske dogodke večje od 20 mm znašala 72,1, za padavinske dogodke večje od 30 mm pa 69,4.

Z asimptotično metodo določanja parametra *CN* smo določili vrednost $CN_{\infty} = 39,0$, kar je občutno nižja vrednost od vrednosti *CN*, določene iz meritev. Iz asimptotično določene padajoče krivulje nismo mogli povsem zanesljivo določiti koeficienta *CN*, saj se krivulja ne približuje konstantni vrednosti.

Četrta metoda določanja parametra *CN* je bila preko hidrološkega modela porečja, ki smo ga izdelali v programu HEC-HMS 3.5, umerili in validirali. Umerjena vrednost *CN* je znašala 74,5. Ocenjen parameter *CN* je zelo blizu parametra, določenega za padavinske dogodke na podlagi meritev.

Primerjava rezultatov je pokazala, da je prišlo do največjega odstopanja pri vrednostih parametra *CN* pri metodi z asimptoto, kjer je bila določena vrednost *CN* občutno manjša, kot

pri ostalih treh metodah. Tudi tip krivulje, ki smo ga dobili na podlagi obravnavanih padavinskih dogodkov kaže na nezanesljivo določanje parametra CN z asimptotičnim pristopom.

Vrednost parametra *CN* se je razlikovala tudi med letnimi časi. Najvišjo povprečno vrednost *CN* smo določili za zimske mesece in znaša 77,14, medtem, ko je bila najnižja vrednost parametra *CN* jeseni in je znašala 68,91. Poleti ($CN = 71,46$) in pomladi ($CN = 74,82$) sta vrednosti *CN* nekje vmes med zimsko in jesensko vrednostjo.

Vsaka izmed štirih metod je podala drugačno vrednost parametra *CN*. Prava vrednost parametra *CN* za porečje Mačkovega grabna je najverjetneje nekje med teoretično vrednostjo po metodi SCS-CN in vrednostjo, določeno iz meritev, torej med 60 in 70. V praksi se je izkazalo, da je popolnoma natančno določanje parametra *CN* skoraj nemogoče, ker parameter zajema veliko lastnosti porečja, ki jih je zelo težko natančno opredeliti, poleg tega pa so te lastnosti časovno spremenljive, kar vpliva tudi na vrednost parametra *CN*. Če želimo natančnejše rezultate, je pri določanju *CN* potrebno upoštevati tudi sezonskost.

VIRI

Banasik, K., Woodward, D. 2010. Empirical Determination of Runoff Curve Number for a Small Agricultural watershed in Poland. 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, 27. junij - 1. julij, 2010: 11 str.

Bezak, N., Šraj, M., Rusjan, S., Kogoj, M., Vidmar, A., Sečnik, M., Brilly, M., Mikoš, M. 2013. Hidrološka primerjava dveh sosednjih eksperimentalnih hudourniških porečij: Kuzlovec in Mačkov graben. Acta hydrotecnica 20,32. [ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a45nb.pdf](http://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a45nb.pdf) (Pridobljeno 28. 6. 2015.)

Brilly, M., Šraj, M. 2005. Modeliranje površinskega odtoka in navodila za program HEC-HMS. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 172 str.

Brilly, M., Šraj, M. 2014. Osnove hidrologije. Univerzitetni učbenik. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 309 str.

Brodie, R.S., Hostetler, S. 2005. A Review of Techniques for Analysing Baseflow from Stream Hydrographs. Bureau of Rural Sciences, Canberra: 5 str. ftp://ftp.ecn.purdue.edu/abegis/WQX2011/ldc/IAH05_Baseflow.pdf (Pridobljeno 28. 6. 2015.)

Fogel, M. M., Duckstein, L. 1970. Prediction of convective storm runoff in semiarid regions. Proc., IASH-Unesco Symp. On the results of research on representative and experimental basins, Wellington, New Zealand: 465–478.

Gajbhiye, S., Mishra, S.K., Pandey, A. 2013. Effects of Seasonal/Monthly Variation on Runoff Curve Number for Selected Watersheds of Narmada Basin. International Journal of Environmental Sciences 3,6: 2035–2046.

Gundalia, M., Dholakia, M. 2014. Impact of Monthly Curve Number on Daily Runoff Estimation for Ozat Catchment in India. Open Journal of Modern Hydrology, 4: 144–155.

Hawkins, R.H. 1992. Variety, classification and association in runoff response. Rep., School of Renewable Natural Resour., University of Arizona, Tucson, Arizona: 43 str.

Hawkins, R.H. 1993. Asymptotic determination of curve numbers from data. Journal of Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers 119,2: 334–345.

Hjelmfelt, A.T. 1980. Empirical investigation of curve number techniques. J. Hydraul. Eng. Div., ASCE 106,9: 1471–1477.

Jacobs, J.H., Srinivasan, R. 2005. Effects of Curve Number modification on runoff estimation using WSR-88D rainfall data in Texas watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation* 60,5: 274–278.

Katedra za splošno hidrotehniko. 2015. Disdrometer Črni Vrh nad Polhovim Gradcem in disdrometer UL FGG (Hajdrihova 28, Ljubljana). Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. <http://ksh.fgg.uni-lj.si/avp/DisCrniVrh/> (Pridobljeno 27. 6. 2015.)

Katedra za splošno hidrotehniko. 2015. Podrobne informacije o smrtnih žrtvah v Sloveniji 1926-2015. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. http://ksh.fgg.uni-lj.si/ksh/strok_dej/Zrtve_poplav_SLO.html (Pridobljeno 26. 6. 2015.)

Kestnar, K. 2014. Vpliv gozda na odtoke z dveh eksperimentalnih porečij na Pohorju. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba K. Kestnar): 81 str.

Khodjeini, A., V. 1997. Runoff curve number, and it's variability in the estimation of storm runoff. 8th. International Conference on Rainwater Catchment Systems: 687–693.

Kofol, T. 2014. Modeliranje taljenja snežne odeje s programoma HEC-HMS in SRM. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba T. Kofol): 107 str.

Kovačič, T. 2012. Analiza vpliva lastnosti porečja na indeks baznega odtoka. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba Kovačič, T.): 105 str.

Lacey, G. C. 1996. Relating baseflow to catchment properties. A scaling approach. Report 96/8. Cooperative research centre for catchment hydrology: 51 str.

Mikoš, M. 2007. Problemi in perspektive upravljanja z vodami v Sloveniji z vidika varstva pred poplavami in plazovi: 4 str.

http://mkgp.gov.si/fileadmin/mkgp.gov.si/pageuploads/svo/2seja_Mikos.pdf (Pridobljeno 26. 6. 2015.)

Mikoš, M., Kranjc, A., Matičič, B., Müller, J., Rakovec, J., Roš, M., Brilly, M., 2002. Hidrološko izrazje. *Acta hydrotecnica* 20,32: ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a32_1.pdf (Pridobljeno 26. 6. 2015.)

Mishra, S. K., Singh, V. 2003. Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology. Water Science and Technology Library. Springer Netherlands: 516 str.

Nalbantis, I., Lymeropoulos, S. 2012. Assessment of flood frequency after forest fires in small ungauged basins based on uncertain measurements. Hydrological Sciences Journal 57,1: 52–72.

Paik, K., Kim, J.H., Kim, H.S., Lee, D.R. 2005. A conceptual rainfall-runoff model considering seasonal variation. Hydrological Processes 19: 3837–3850.

Pandi, G. 2010. The analysis of flood waves. Air and water components of the environment conference, "Babes-Bolyai" University Cluj, Napoca Faculty of Geography: 10 str. http://conference.ubbcluj.ro/aerapa/2010/pdf/PGabor_1.pdf (Pridobljeno 31. 5. 2015.)

Ponce, V. M., Hawkins, R.H. 1996. Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity?. Journal of Hydrologic Engineering 1,1: 11–19.

Pugelj, A. 2012. Analiza visokovodnih valov Save v Šentjakobu. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba Pugelj, A.): 98 str.

Rallison, R.E., Cronshey, R.C. 1979. Discussion to Runoff curve numbers with varying soil moisture. Journal of Irrigation and Drainage Division 105,4: 439–441.

Rusjan, S. 2015. Opis porečja Gradaščice in Mačkovega grabna. Osebna komunikacija. (20. 5. 2015.)

Sahu, R.K., Mishra, S.K., Eldho, T.I. 2012. Improved Storm Duration and Antecedent Moisture Condition Coupled SCS-CN Concept-Based Model. Journal of hydrologic Engineering 17,11: 1173-1179.

SCS national engineering handbook. 1985. Section 4: Hydrology. Soil Conservation Service. USDA, Washington, D.C.

Sherman, L.K. 1949. The unit hydrograph method. Physics of the Earth. O.E. Meinzer, ed., Dover Publications, Inc., New York, N.Y.: 514–525.

Smakhtin, V.U. 2001. Low flow hydrology: a review. Journal of Hydrology 240: 147–186.

Springer, E. P., McGurk, B.J., Hawkins, R.H., Coltharp, G.B. 1980. Curve numbers from watershed data. Proc., Irrig. And Drain. Symp. On Watershed Mgmt., New York, N.Y., ASCE 2: 938–950.

Stewart, D., Canfield, E., Hawkins, R. 2012. Curve Number Determination Methods and Uncertainty in Hydrologic Soil Groups from Semiarid Watershed Data. Journal of Hydrologic Engineering, ASCE 17,11: 1173–1179.

Sumarauw, J.S.F., Ohgushi, K. 2012. Analysis on Curve Number, Land Use and Land Cover Changes and the Impact to the PEak Flow in the Jobaru River Basin, Japan. International Journal of Civil & Environmental Engineering, IJCEE-IJENS 12,2: 17–23.

Šraj, M., Brilly, M., Mikoš, M. 2008. Rainfall interception by two deciduous Mediterranean forests of contrasting stature in Slovenia. Agricultural and forest meteorology 148: 121-134.

Tedela, N.H., McCutcheon, S.C., Rasmussen, T.C., Hawkins, R.H., Swank, W.T., Campbell, J.L., Adams, M.B., Jackson, C.R., Tollner, E.W. 2012. Runoff Curve Numbers for 10 Small Forested Watersheds in the Mountains of the Eastern United States. Journal of Hydrologic Engineering, ASCE 17: 1188–1198.

US Army Corps of Engineers. 2000. Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Tehnical Reference Manual: 149 str. [http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual_\(CPD-74B\).pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual_(CPD-74B).pdf)

(Pridobljeno 15. 6. 2015.)

US Army Corps of Engineers. 2008. Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual version 3.3: 278 str. http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Users_Manual_3.3.pdf (Pridobljeno 15. 6. 2015.)

Wang, X., Liu, T., Yang, W. 2012. Development of a robust runoff-prediction model by fusing the Rational Equation and a modified SCS-CN method. Hydrological Sciences Journal 57,6: 1118–1140.