

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
VODARSTVA IN
KOMUNALNEGA
INŽENIRSTVA

Kandidat:

MIHA KOVAČEC

**HIDROLOŠKI MODEL GLINŠČICE Z MODELOM
SWAT**

Diplomska naloga št.: 184/VKI

**HYDROLOGIC MODEL OF GLINŠČICA WATERSHED
WITH SWAT PROGRAM**

Graduation thesis No.: 184/VKI

Mentorica:
doc. dr. Mojca Šraj

Predsednik komisije:
doc. dr. Dušan Žagar

Somentor:
prof. dr. Mitja Brilly

Ljubljana, 7. 5. 2012

POPRAVKI

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Miha Kovačec izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Hidrološki model Glinščice z modelom SWAT«.

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

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

Ljubljana, dne 16. 3. 2012

Miha Kovačec

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	556:556.5(043.2)
Avtor:	Miha Kovačec
Mentor:	doc. dr. Mojca Šraj
Somentor:	prof. dr. Mitja Brilly
Naslov:	Hidrološki model Glinščice z modelom SWAT
Obseg in oprema:	104 str., 17 pregl., 52 sl., 48 en.
Ključne besede:	površinski odtok, padavine, modeliranje površinskega odtoka, model, porečje Glinščice, SWAT, MapWindow

Izvleček:

Namen diplomske naloge je predstavitev programa SWAT in njegovih s hidrologijo povezanih komponent ter analiza možnosti uporabe modulov programa, ki se nanašajo na fizikalne pojave gibanja vode pri oblikovanju površinskega odtoka. V praktičnem delu naloge je predstavljena uporaba programa na porečju Glinščice.

V nalogi je predstavljen program SWAT, delujoč v programskem okolju MapWindow. V prvem delu naloge, so opisane teoretične osnove, ter pri izračunih uporabljene empirične enačbe in metode. Predstavljeno je prispevno območje ljubljanske Glinščice in priprava potrebnih vhodnih podatkov za model. Opisana je praktična uporaba programa, način delovanja in postopek izdelave modela padavinskega odtoka za izbrano prispevno območje. Nadalje je na kratko predstavljen program SWAT-CUP4 namenjen umerjanju in analizam občutljivosti. Sledijo rezultati umerjanja, analiza občutljivosti in validacije.

Padavinske izgube so bile izračunane po metodah SCS ter Greena in Ampta. Model je bil umerjen na osnovi izmerjenih padavinskih dogodkov in pretokov treh mesecev. Postopek umerjanja modela je bil izveden s programom SWAT-CUP4. Vsako umerjanje, je bilo izvedeno z vsaj 4 iteracijami, znotraj katerih so opravljene simulacije različnih kombinacij parametrov. Rezultati so statistično ovrednoteni s kazalcema ujemanja P vrednostjo in R vrednostjo ter Nash-Sutcliffe koeficientom in koeficientom determinacije.

BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 556:556.5(043.2)
Author: Miha Kovačec
Supervisor: doc. dr. Mojca Šraj
Cosupervisor: prof. dr. Mitja Brilly
Title: Hydrologic model of Glinscica watershed with SWAT program
Notes: 104 p., 17 tab., 52 fig., 48 eq.
Key words: surface runoff, rainfall, rainfall - runoff modeling, model, Glinscica watershed, SWAT, MapWindow

Abstract:

The purpose of the graduation thesis is to present SWAT program, its hydrological components and feasibility of using program modules relating the physical processes of water movement and surface runoff. The practical part describes the application of the program on Glinščica watershed.

The graduation thesis consists of the presentation of the program SWAT, based on the MapWindow platform. The theoretical basics of the program and the empirical equations and methods employed for calculations are listed in the first part. It also includes a detailed description of the Glinščica watershed and the input data preparation required by a model. Further, the application, functioning and procedure of modelling rainfall - runoff for the Glinščica watershed are presented. There is also a short presentation of the SWAT-CUP4 program, intended for calibration and sensitivity analysis, followed by the calibration results, sensitivity analysis and validation results.

Surface runoff was computed using SCS Curve Number and Green and Ampt loss method procedure. The model was calibrated on the basis of the measured hydrographs and runoff volumes on Glinščica watershed for rainfall events and water flow rate in three month period. The calibration procedure has been carried out by the SWAT-CUP4 program. Each calibration of the SWAT run consists of at least four iterations, in which the simulations of different parameter combinations have been executed. Statistical analyses are presented with the R-factor and P-factor, which shows the goodness of fit and Nash-Sutcliffe coefficient and coefficient of determination.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. Mojci Šraj za njen čas in strokovno pomoč pri nastajanju diplomske naloge.

Infrastrukturnemu centru za pedologijo in varstvo okolja ter mag. Tomažu Prusu univ. dipl. ing. gozd., se zahvaljujem za posredovane podatke. Hvala tudi Andreju Vidmarju za pomoč pri uvajanju v GIS-e.

Družini se zahvaljujem za spodbudo v času študija.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Cilji diplomske naloge	2
2	MODELIRANJE POVRŠINSKEGA ODTOKA Z MODELOM SWAT	3
2.1	Razvoj modela.....	3
2.2	Opis in delovanje modela	4
2.3	Klimatski in hidrološki dejavniki	7
2.4	Waterbase projekt in MWSWAT program	11
2.5	Padavine	13
2.5.1	Vremenski generator	13
2.5.2	Količina padavin	14
2.5.3	Sneg.....	15
2.6	Padavinske izgube	16
2.6.1	Metoda SCS.....	16
2.6.1.1	SCS CN	17
2.6.1.2	Hidrološka klasifikacija zemljin.....	20
2.6.1.3	Predhodni vlažnostni pogoji zemljine	21
2.6.1.4	Parameter zadrževanja.....	21
2.6.2	Metoda Greena in Ampta	22
2.6.3	Evapotranspiracija.....	23
2.6.3.1	Potencialna evapotranspiracija.....	23
2.6.3.2	Metoda Penman - Monteith.....	24
2.6.3.3	Metoda Priestley - Taylor.....	24
2.6.3.4	Hargreavesova enačba.....	25
2.7	Površinski odtok.....	25
2.7.1	HRU	25
2.7.2	Konica odtoka	26

2.7.2.1	Čas koncentracije	26
2.7.2.2	Koeficient odtoka	30
2.7.2.3	Intenziteta padavin	31
2.7.2.4	Modificirana racionalna formula.....	32
2.7.3	Zakasnitev površinskega dela odtoka.....	32
2.7.4	Izgube pri prenosu (angl. <i>transmission losses</i>)	33
3	OPIS OBRAVNAVANEGA OBMOČJA.....	37
3.1	Uvod.....	37
3.2	Topografija.....	38
3.3	Raba tal.....	39
3.4	Pedologija.....	41
3.4.1	Atributni podatki PKE.....	43
3.5	Podnebje in hidrologija	46
3.5.1	Vodni viri in hidrologija.....	46
4	IZDELAVA MODELA POVRŠINSKEGA ODTOKA S PROGRAMOM MWSWAT.....	48
4.1	Razmejitev porečja.....	48
4.2	Določitev hidrološke odzivne enote HRU.....	51
4.2.1	Vnos rabe tal.....	53
4.2.2	Vnos pedoloških tipov.....	55
4.3	Vnos vremenskih podatkov in zagon SWAT-a.....	59
4.3.1	Vremenski podatki	59
4.4	Zagon modela.....	63
5	PRIMERJAVA SIMULACIJ Z RAZLIČNO IZBIRO METOD IN NATANČNOSTJO VHODNIH PODATKOV	65
5.1	Obnašanje modela pri različni razmejitvi porečja in številu hidroloških odzivnih enot	65
5.2	Primerjava simulacij pretoka, glede na uporabljeno metoda izračuna padavinskih izgub	68
5.3	Primerjava simulacij pretoka, glede na interval vnosa padavin	69
5.4	Vpliv izbire metode prenosa valov po strugi.....	70

5.5	Vpliv izbire parametrov modela SWAT	71
6	SWAT - CUP4	73
6.1	SUF2 (angl. <i>Sequential Uncertainty Fitting</i>).....	74
6.1.1	SUF2 kot optimizacijski algoritem	76
6.1.2	Optimizacija	78
6.1.3	Analiza občutljivosti	79
6.1.3.1	Globalna analiza občutljivosti.....	79
6.1.3.2	»One-at-a-time« analiza občutljivosti	80
7	UMERJANJE MODELA, ANALIZA OBČUTLJIVOSTI IN REZULTATI	81
7.1	Uporaba spremenljivega koeficienta skladiščenja.....	81
7.1.1	Zagon 1.....	81
7.1.1.1	Analiza občutljivosti:	87
7.1.2	Zagon 2.....	87
7.1.2.1	Analiza občutljivosti:	89
7.2	Uporaba Muskingumove metode	91
7.2.1	Zagon 3.....	91
8	VALIDACIJA MODELA.....	94
9	ZAKLJUČKI.....	97
VIRI.....		99

KAZALO SLIK

Slika 1: Primer razdelitve porečja jezera Fork Lake na podporečja.....	4
Slika 2: Shematski prikaz hidrološkega kroga	5
Slika 3: Ukazna zanka podporečja	6
Slika 4: Gibanje vode simulirano v programu SWAT	8
Slika 5: Parameter CN za določitev odtoka v odvisnosti od padavin.....	17
Slika 6: Primerjava med porazdelitvijo vlažnosti po modelu Green in Ampt-a in običajno opazovano porazdelitvijo.....	22
Slika 7: Osnovne lastnosti hidrograma odtoka.....	27
Slika 8: Vpliv koeficienta časovnega zamika (surlag) in časa koncentracije t_{conc} na delež izpuščenega površinskega odtoka	33
Slika 9: Togo urejen vodotok, pri Koseškem bajerju.....	38
Slika 10: Topografija območja.....	39
Slika 11: Pokrovnost tal	40
Slika 12: Pašnik na območju Podutika	41
Slika 13: Digitalna pedološka karta 1:25 000	42
Slika 14: PKE in njihova velikost na prispevnem območju Glinščice.....	44
Slika 15: Šifrant padavinskega območij (Šraj, 2000) in linije hidrografskih razvodnic na osnovi reliefnih značilnosti.....	46
Slika 16: Vnos pripravljene linijske datoteke vodotoka in točkovne datoteke, ki predstavlja iztok.....	49
Slika 17: Primerjava med razvodnico iz šifranta in razvodnico narejeno z funkcijo »Automatic Watershed delination« v programu MapWindow	50
Slika 18: Pogovorno okno »Automatic watershed delination« za vnos digitalnega modela višin, razmejitev območja, določitev mreže vodotokov in iztoka.....	51
Slika 19: Razdelitev porečja na posamezne HRU.....	52
Slika 21: Datoteka z značilnostmi površja tal (crop. dat).....	53
Slika 22: Rastrski zapis rabe tal na območju.....	55
Slika 23: FAO klasifikacija talnih tipov v podatkovni bazi Access.....	57
Slika 24: Rastrski zapis talnih tipov (PKE) na območju.....	58
Slika 25: Vnos dnevni padavin s .txt datoteko z začetkom 1. 11. 2003	60
Slika 26: Vnos 30 minutnih padavin s .txt datoteko.....	61
Slika 27: Pogovorno okno za izbiro in vnos vremenskih podatkov	62
Slika 28: Padavine, v simuliranem obdobju od 1. 11. 2003 do 31. 1. 2004 (ARSO, 2009).....	62
Slika 29: Pogovorno okno za dostop do vremenskih podatkov, izbiro metod za simulacijo, frekvenco zapisa, dostopa do SWAT urejevalnika (angl. Editor) in zagon modela SWAT	63
Slika 30: SWAT urejevalnik	64

Slika 31: Primerjava dveh neumerjenih simulacij z različnim številom HRU.....	67
Slika 32: Primerjava dveh neumerjenih simulacij z uporabo različnih metod padavinskih izgub.....	68
Slika 33: Primerjava dveh neumerjenih simulacij z izračunom padavinskih izgub po metodi SCS CN (dnevne padavine) ter Green in Ampt (30 minutne padavine).....	70
Slika 34: Konceptualna ilustracija razmerja med negotovostjo parametra in negotovostjo napovedi..	76
Slika 35: Globalna analiza občutljivosti.....	79
Slika 36: »One-at-a-time« analiza občutljivosti (Abbaspour, 2011).....	80
Slika 37: Razponi vrednosti parametrov po 1. iteraciji.....	82
Slika 38: Merjen pretok, najboljši simuliran pretok in 95PPU po 1. iteraciji.....	82
Slika 39: Razponi vrednosti parametrov po 2. iteraciji.....	84
Slika 40: Merjen pretok, najboljši simuliran pretok in 95PPU po 2. iteraciji.....	84
Slika 41: Razponi vrednosti parametrov po 3. iteraciji.....	85
Slika 42: Merjen pretok, najboljši simuliran pretok in 95PPU po 3. iteraciji.....	86
Slika 43: Globalna občutljivost parametrov po 3. iteraciji.....	87
Slika 44: Merjen pretok, najboljši simuliran pretok in 95PPU po 4. iteraciji.....	88
Slika 45: Statistični podatki ujemanja merjenega in simuliranega pretoka in kazalcev P vrednost in R vrednost, za 4. iteracijo.....	88
Slika 46: »One-at-a-time« analiza občutljivosti.....	89
Slika 48: Proces umerjanja modela, z uporabo Muskingumove metode skladiščenja in prenosa vode	92
Slika 49: Statistični podatki ujemanja merjenega in simuliranega pretoka in kazalcev P vrednost in R vrednost, za 6. iteracijo.....	92
Slika50: Funkcija ročnega vnosa parametrov (»Manual Calibration«) s programom SWAT urejevalnik (»Editor«).....	94
Slika 51: Ponovni zagon simulacije po spremembi parametrov.....	94
Slika 52: Primerjava povprečnega dnevnega pretoka in simuliranega pretoka v obdobju umerjanja in validacije.....	95

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: CN vrednosti za ostale kmetijske površine	18
Preglednica 2: CN vrednosti za urbana območja	19
Preglednica 3: Ime PKE, zastopanost PSE v % in inkluzije (ICPVO, 2011).....	43
Preglednica 4: Povprečne lastnosti PKE (ICPVO, 2012).....	45
Preglednica 5: Padavinske postaje	47
Preglednica 6: Korelacija med Corine klasifikacijo rabe tal in klasifikacijo rabe tal v SWAT-u.....	54
Preglednica 7: Potrebni vhodni podatki o talnih tipih.....	56
Preglednica 8: Korelacija med PKE in FAO klasifikacijo (Prus, 2012)	58
Preglednica 9: Prikaz dveh različnih nastavitvev pri razmejitvi porečja	66
Preglednica 10: Prikaz dveh simulacij, opravljenih z različnima metodama padavinskih izgub.....	68
Preglednica 11: Prikaz dveh simulacij, opravljenih z različnim intervalom vnosa padavin	69
Preglednica 12: Pri umerjanju uporabljeni parametri (Arnold in sod., 2011).....	71
Preglednica 13: Statistični podatki ujemanja po 1. iteraciji 1. zagona.....	83
Preglednica 14: Statistični podatki ujemanja po 2. iteraciji 1. zagona.....	85
Preglednica 15: Statistični podatki ujemanja po 3. iteraciji 1. zagona.....	86
Preglednica 16: Statistični podatki ujemanja po 4. iteraciji 2. zagona.....	89
Preglednica 17: Statistični podatki ujemanja po 6. iteraciji 3. zagona.....	93

1 UVOD

Računalniški modeli in programi kot je SWAT (angl. *Soil and Water Assessment Tool*), se uporabljajo za napovedovanje dogodkov, njihovih posledic na življenjsko okolje, živali, rastline in človeka. Dogodki so posledica posegov v okolje ali drugačnih naravnih ali povzročenih sprememb. Model poenostavi predstavo o realnem kompleksnem sistemu kot celoti oz. njegovi posamezni komponenti in jo prenese v uporabno in razumljivo obliko (DHD modeliranje, 2011). Model lahko služi kot nadomestek konkretnega sistema ali opreme.

Poznamo več vrst fizičnih modelov: statični, imitacijski ali dinamični. Izgradnja fizičnega modela je praviloma draga, časovno zamudna zaradi izvajanja meritev pri poskusih, terja natančno delo in veliko materialnih stroškov, rezultati pa so zanesljivi samo v točkah, v katerih smo izvedli meritve.

Matematični modeli, so skoraj že v celoti nadomestili dražje fizične modele. Če matematični model izpeljemo iz osnovnih fizikalnih zakonov govorimo o konceptualnem modelu, ki je zasnovan na znanih naravnih zakonitostih in njegovi parametri imajo naravno (fizikalno in kemijsko) interpretacijo. Tako lahko spremembe v sistemu prikažemo s spremembo parametrov modela.

Če za model uporabimo samo izsledke opazovanj v naravi ali laboratoriju, govorimo o empiričnem modelu. Lastnosti sistema so neznane, ker je model zasnovan na izrazih, ki nimajo jasne naravne razlage (Brilly in Šraj, 2006). To je po navadi enačba, ki se najbolj prilaga izmerjenim vrednostim. Njihova prednost je relativna preprostost oz. majhno število parametrov, težava pa se lahko pojavi pri modeliranju območij pojava, ki niso bila opazovana (DHD modeliranje, 2011).

Glede na značilnost pojava oz. rezultatov modela, le-te delimo na deterministične in stohastične. Model je determinističen, če ne vsebuje slučajnih spremenljivk, torej za enak vhod vedno dobimo enak izhod iz sistema. Če model vsebuje slučajne spremenljivke je stohastičen.

Z razvojem hitrejših računalniških opreme in dostopnostjo digitalnih modelov reliefa z večjo ločljivostjo, je mogoče poplavni val izračunati zelo podrobno. Natančnost modelov poplavne ogroženosti in rezultati umerjanja, pa so kljub vsemu že vedno najbolj odvisni od razpoložljivosti hidrografskih baz podatkov, ki so še vedno omejene.

1.1 Cilji diplomske naloge

Glavni cilji diplomske naloge so: (1) predstavitev programa SWAT in njegovih s hidrologijo povezanih komponent, (2) analiza možnosti uporabe modulov programa, ki se nanašajo na fizikalne pojave gibanja vode pri oblikovanju površinskega odtoka, (3) priprava potrebnih vhodnih podatkov za model porečja Glinščice, (4) izdelava modela površinskega za izbrano porečje z uporabo programa SWAT, oz. komercialne, prosto dostopne izpeljanke le-tega MWSWAT, (angl. *MapWindow Soil and Water Assessment Tool*), (5) njegovo umerjanje, verifikacija in ovrednotenje rezultatov ter (6) ovrednotenje smotrnosti uporabe programa za hidrološko modeliranje. Izbrano območje je bilo že predmet večih hidroloških raziskav (Rusjan, 2003; Škrbec, 2005; Štajdohar, 2005; Dirnbek, 2009; Pestotnik, 2011).

Za izdelavo modela z MWSWAT programom, so bili uporabljeni podatki o terenu z digitalnim modelom višin ločljivosti 5 m, podatki o rabi tal in talnih tipih obravnavanega območja, dnevni merjenih padavinah in padavinah merjenih v 30-minutnem časovnem intervalu, podatki o temperaturi, sončnem sevanju ter relativni vlažnosti z merskih postaj Ljubljana-Bežigrad in Pržanec.

2 MODELIRANJE POVRŠINSKEGA ODTOKA Z MODELOM SWAT

2.1 Razvoj modela

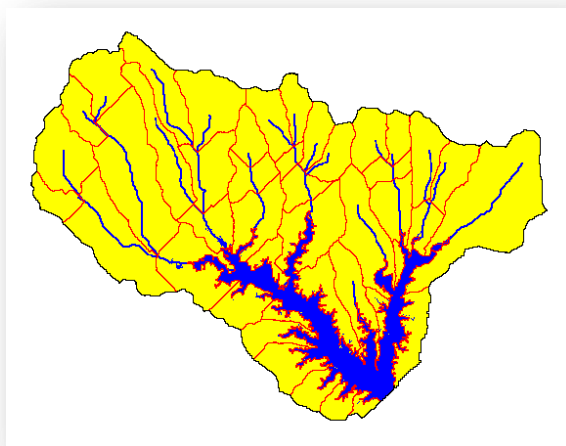
SWAT je akronim za zemlja (angl. *Soil*), voda (angl. *Water*), ocena (angl. *Assessment*) in orodje (angl. *Tool*). Model je v osnovi namenjen upravljalcem z vodami, za napovedovanje in oceno različnih naravnih in človeških vplivov na vodo, donose sedimentov in vnose hranil s kmetijskih površin. Zasnovan je za večje prispevne površin in daljše, neprekinjene simulacije (Borah in sod., 2007). Model ni zasnovan za simulacijo posameznih poplavnih dogodkov. Razvil ga je Dr. Jeff Arnold za USDA ARS (angl. *Agricultural Research Service*).

SWAT vključuje značilnosti več ARS modelov in je naslednik SWRRB modela (angl. *Simulator for water resources in rural basin*). Specifični modeli, ki so pripomogli k razvoju SWAT-a so bili CREAMS (angl. *Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*), GLEAMS (angl. *Groundwater Loadin Effect on Agricultural Management Systems*) (Leonard, 1987) in EPIC (angl. *Erosion-Productivity Impac Calculator*) (Williams, 1984).

V poznih 80-ih je »Bureau of Indian Affairs« potreboval model za oceno dol-vodnega vpliva upravljanja z vodami na območju Indijanskega rezervata v Arizoni in Novi Mehiki. Medtem ko je bilo SWRRB moč uporabiti na porečjih, velikih nekaj 100 km², je biro potreboval orodje za simulacijo odtoka na porečju, ki se razteza na nekaj 1000 km². Za tako ekstenzivno območje, je bilo preučevano območje potrebno razdeliti na nekaj sto podporečij. Poglavlje porečij v SWRRB je dopuščalo razdelitev območja na 10 podporečij in model je izračunal odtok vode in sedimentov iz porečja neposredno skozi iztok porečja (angl. *outlet*). Te omejitve so pripeljale do razvoja modela ROTO (angl. *Routing Outputs to Outlet*), (Arnold in sod., 1995), ki je vzel odtok iz več SWRRB rezultatov in izračunal tok skozi kanale in rezervoarje. ROTO je torej omogočal pristop po odsekih (angl. *reach routing*) in je nadgradil omejitve modela SWRRB, ki je povezoval več rezultatov (angl. *run*) skupaj. Čeprav je bil takšen pristop učinkovit, je potreboval veliko prostora za shranjevanje podatkov. Kot dodatek, so morali biti vsi izračuni z modelom SWRRB narejeni ločeno in šele nato vneseni kot vhodni podatek v model ROTO, ki je izvedel simulacijo toka skozi kanale in rezervoarje. Da bi odpravili to nevšečnost, sta bila oba modela združena v enega, v SWAT. SWAT omogoča simulacije na zelo velikih območjih, obdržal pa je tudi vse prednosti SWRRB modela in njegovo zanesljivost.

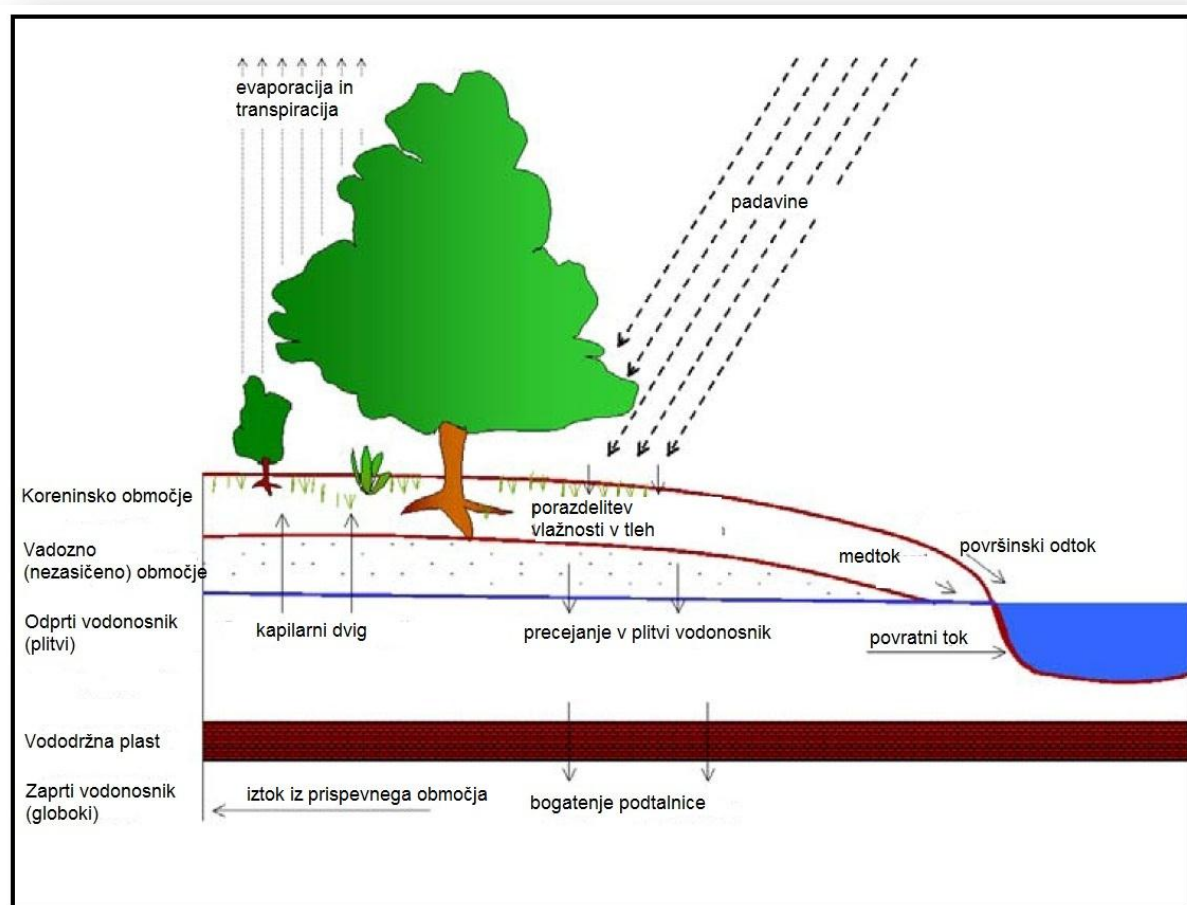
2.2 Opis in delovanje modela

Za potrebe modeliranja je porečje razdeljeno na več podporečij. Uporaba podporečij je koristna predvsem, ko imajo različna območja na porečju različne tipe oz. rabo tal in ima to neposreden vpliv na hidrologijo (slika 1). Z razdelitvijo območja na posamezne enote, lahko uporabnik definira lastnosti vsake posamezne enote in jih tako loči.



Slika 1: Primer razdelitve porečja jezera Fork Lake na podporečja (Neitsch in sod., 2005)

Simulacijo hidroloških procesov v porečju, lahko razdelimo v dve večji fazi (Neitsch in sod., 2005). Prva faza je površinska faza (površinski tok), ki prispeva količino vode, sedimentov, hranil in pesticidov po glavnem kanalu v posameznem podporečju. Druga faza, pa je vodna (angl. *routing*) faza hidrološkega kroga, ki je definirana kot premikanje vode, sedimentov itd. skozi sistem kanalov do iztoka iz porečja (slika 2).



Slika 2: Shematski prikaz hidrološkega kroga (prirejeno po Neitsch in sod., 2005)

Hidrološki krog simuliran v modelu SWAT, temelji na naslednji enačbi vodne bilance:

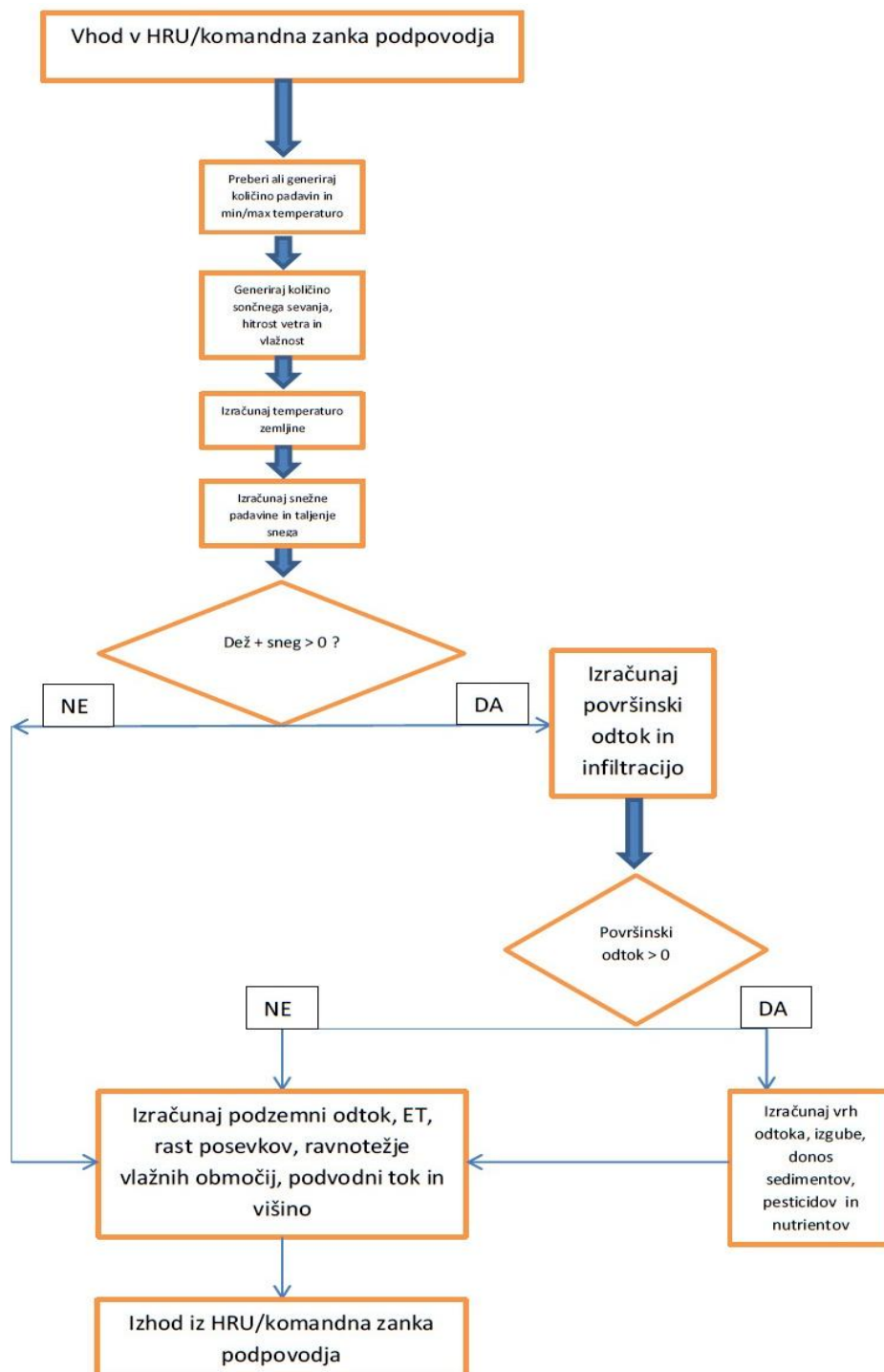
$$SW_t = \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

Kjer je:

- SW_t - končna količina vode v zemljini (mm H₂O),
- t - čas (dnevi),
- R_{day} - količina padavin na dan i (mm H₂O),
- Q_{surf} - površinski odtok na dan i (mm H₂O),
- E_a - količina evapotranspiracije na dan i (mm H₂O),
- w_{seep} - količina vode, ki se iz površja infiltrira v nesaturiran/plitek (vadozni) del zemeljskega površja (mm H₂O),
- Q_{gw} - povratni tok na dan i (mm H₂O).

Razdelitev porečja omogoča modelu, da upošteva razlike v evapotranspiraciji za različne tipe zemljine in posevke. Odtok je za vsako HRU (angl. *Hydrologic Response Unit*) računana posebej, vendar speljan tako, da ohrani količino s celotnega porečja. Takšen princip poveča natančnost in daje boljši fizični opis vodne bilance.

Gibanje vode in izračun površinskega odtoka, je prikazano na sliki 3.



Slika 3: Ukazna zanka podporečja (prirejeno po Neitsch in sod., 2005)

2.3 Klimatski in hidrološki dejavniki

Podnebje porečju zagotavlja vlago in energijske vnose, ki kontrolirajo vodno ravnotežje in določajo relativno pomembnost različnih komponent hidrološkega kroga.

Podnebne spremenljivke, ki jih zahteva SWAT so dnevne padavine, maksimalna/minimalna dnevna temperatura, sončno sevanje, hitrost vetra in relativna vlažnost.

V model lahko vnesemo dejanske, izmerjene podatke, če so ti na voljo, ali pa manjkajoče podatke model generira sam, tekom simulacij z vremenskim generatorjem.

Vremenski generator: Dnevne vrednosti so generirane iz povprečnih mesečnih vrednosti. Model generira nabor vremenskih podatkov za vsako podporečje. Vrednosti za vsako podporečje posebej, so generirane ločeno in med njimi ni prostorske korelacije.

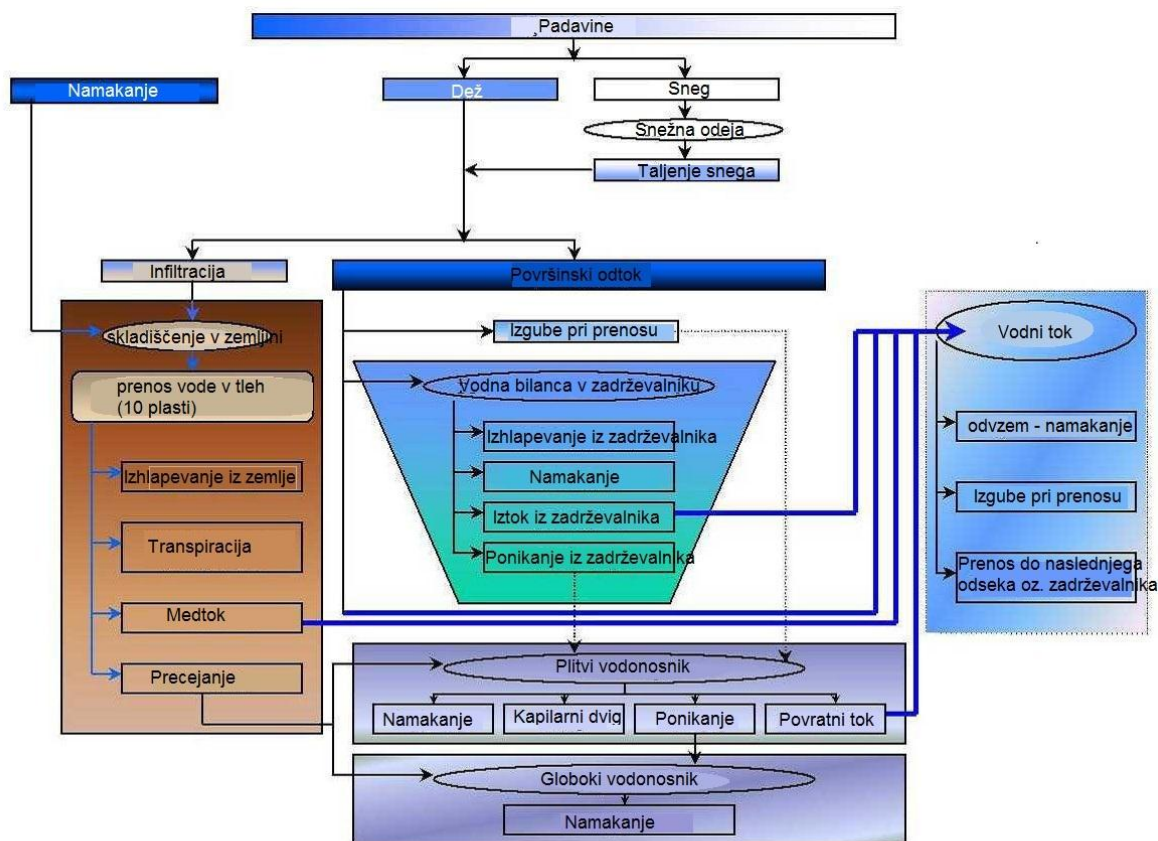
Za potrebe diplomske naloge, smo pridobili vse potrebne vremenske vhodne podatke, zato vremenski generator ni bil uporabljen.

Sneg: SWAT klasificira padavine kot dež ali zmrznjen dež oz. sneg, z upoštevanjem povprečne dnevne temperature. Taljenje snega je odvisno od temperature zraka, temperature snežne odeje, stopnje taljenja in površinske pokritosti s snegom. Če je prisoten sneg, se ta tali, ko maksimalna temperatura preseže 0°C. Ko računamo odtok ali pronicanje, staljen sneg obravnavamo enako kot padavine v obliki dežja, le da je energija dežja (dežnih kapelj) nastavljena na nič in je vrh odtoka ocenjen, kot da je taljenje snega enakomerno in traja 24 ur.

Temperatura tal: Temperatura zemljine vpliva na gibanje vode in na stopnjo zadrževanja vode v tleh. Dnevna povprečna temperatura tal se izračuna na površini tal in v sredini vsake plasti. Temperatura na površini tal je funkcija snežne prevleke, vegetacije na površini in druge pokrovnosti, temperature golega površja in temperature površja prejšnjega dne.

Hidrologija: Ko padavine padajo proti tlom, jih lahko prestrežejo in zadržijo krošnje dreves in vegetacija, ali pa padejo na površino tal. Voda na površini tal se bo infiltrirala v talni profil, ali pa bo odtekla kot površinski odtok. Odtok se giblje relativno hitro proti vodotoku (strugi) in prispeva h kratkotrajni spremembi vodnega telesa. Infiltrirana voda se lahko zadrži v tleh in kasneje evapotranspirira, ali pa se počasi giblje po podzemnih poteh do površinskega vodnega sistema.

Gibanje vode in njene poti, katere so simulirane v SWAT-u prikazuje slika 4.



Slika 4: Gibanje vode simulirano v programu SWAT (prirejeno po Neitsch in sod., 2005)

Skladiščenje v krošnjah: Padavine, ki jih prestreže vegetacija, se tam zadržijo in po navadi jih večji del izhlapi. Ko računamo površinski odtok z uporabo CN metode, je zbiranje/skladiščenje vode v krošnjah upoštevano. Če pa modeliramo površinski odtok ter infiltracijo z metodo Greena in Ampta, pa je potrebno skladiščenje v krošnjah upoštevati posebej.

Infiltracija: Infiltracija se nanaša na vnos vode s površine v profil tal. Voda se infiltrira v tla skozi pore in manjše odprtine, ki se nahajajo na zemeljskem površju in vodijo pod površje, v nižje sloje tal (USDA, 2001). Če se infiltracija nadaljuje, postane zemljina zelo mokra in to povzroči, da se stopnja infiltracije s časom zmanjšuje, dokler ne postane enakomerna. Začetna stopnja infiltracije je odvisna od vsebnosti vlage v zemlji, pred stikom vode s površino tal. Končna stopnja infiltracije je ekvivalentna zasičeni hidravlični prevodnosti tal. Ker metoda CN za izračun površinskega odtoka uporablja dnevni časovni interval, je z njo nemogoče določiti infiltracijo. Količina vode, ki vstopi v profil tal, je določena kot razlika med količino padavin in količino površinskega odtoka. Green in Ampt-ova metoda za določanje infiltracije neposredno modelira količino infiltracije, vendar potrebuje podatke o padavinah za manjše časovne intervale. Pri računu infiltracije z Green in Amptovo metodo, smo v diplomski nalogi uporabili 30-minutne podatke o padavinah.

Evapotranspiracija: Evapotranspiracija je zelo pomemben dejavnik v hidrološkem krogu in nam predstavlja pomemben element pri računu vodne bilance (ARSO, 2009). Evapotranspiracija je skupen termin za vse procese, pri katerih voda v tekoči ali trdni obliki postane atmosferska vodna para. Evapotranspiracija vključuje evaporacijo oz. izhlapevanje vode iz jezer, rek, golih tal in rastlin. Slednja se imenuje transpiracija, termin za izhlapevanje iz ledu in snežne površine pa je sublimacija. Model izračuna izhlapevanje iz zemljine in rastlin ločeno (Ritchie 1972). Potencialno izhlapevanje iz zemljine je ocenjeno kot funkcija potencialne evapotranspiracije in indeksa listne površine (relativno razmerje med enostransko površino listov in površino HRU). Dejansko izhlapevanje iz zemljine pa je določeno z uporabo eksponentne funkcije globine tal in vsebnosti vode. Transpiracija rastlin je simulirana z linearno funkcijo potencialne evapotranspiracije in indeksa listne površine.

Potencialna evapotranspiracija: Stopnja evapotranspiracije, ki bi se pojavila na večjem, neprekinjenem območju, ki je popolnoma in enotno zaraščeno z rastočo vegetacijo in ima neomejen dostop do vode v tleh. Na to stopnjo naj ne bi vplivali mikro-klimatski procesi kot so advekcija in termika. Model ponuja tri metode za oceno potencialne evapotranspiracije in sicer metode Penmann-Monteith, Priestley-Taylor in Hargreaves-ovo metodo.

Podzemni tok ali medtok: Prispevek vodnega toka, ki izvira pod površjem, vendar nad cono, kjer je zemljina popolnoma zasičena z vodo. Podzemni tok v profilu tal (0-2 m), je izračunan simultano s prerazporeditvijo vode. Model kinematičnega skladiščenja je predviden za oceno vmesnega odtoka v vsakem sloju zemljine. Model upošteva razlike v prevodnosti, naklonu in vsebnosti vode v tleh.

Površinski odtok: Del padavin, ki teče po zemeljskem površju in sicer po območjih, ki so pod naklonom. SWAT simulira površinski odtok, z upoštevanjem dnevnih količin padavin, ali padavin v manjših časovnih intervalih.

Volumen površinskega odtoka: Določen je z uporabo modificirane SCS CN metode ali Green in Ampt-ove infiltracijske. Obe metodi sta namenjeni izračunu infiltrirane vode. Pri CN metodi, se vrednost CN ne-linearno spreminja v odvisnosti od količine vlage v zemljini. CN pade, ko se vlaga v zemljini približa točki venenja in naraste do blizu 100, ko je zemljina skoraj zasičena. Green in Ampt-ova infiltracijska metoda za delovanje potrebuje natančne podatke o padavinah (polurne oz. manj kot dnevne) in izračuna infiltracijo kot funkcijo fronte vlaženja ter potencialne in efektivne hidravlične prevodnosti. Voda, ki se ne infiltrira, postane površinski odtok. SWAT vključuje v račun površinskega odtoka, tudi del odtoka ki nastane takrat, ko je zemlja zamrznjena in sicer tako, da v prvem sloju tal upošteva temperaturo manj kot 0 °C. Model poveča odtok iz zamrznjenih tal, kljub temu pa dovoljuje infiltracijo v suha zamrznjena tla.

Konica odtoka/maksimalni odtok: Določimo ga z uporabo modificirane racionalne metode. Modificirana racionalna metoda temelji na ideji, da če se naliv z intenziteto i začne v trenutku in se nadaljuje nedoločen čas, se bo nivo odtoka zviševal do časa koncentracije t_c oz. dokler ne bo celotno podporečje prispevalo deleža k odtoku. V modificirani racionalni formuli, je konica odtoka funkcija deleža padavin, ki padejo na podporečje v času koncentracije t_c , volumna dnevnega površinskega odtoka in časa koncentracije podporečja. Padavine, ki na podporečje padejo v času koncentracije, so ocenjene s stohastično tehniko, kot funkcija celotnih dnevnih padavin. Čas koncentracije je ocenjen z Manningovo formulo, upoštevajoč tako tok v strugi, kot tok po površini tal.

Pritoki: V podporečju sta definirana dva tipa vodnih poti (kanalov, strug): glavna vodna pot in pritoki. Pritoki so po definiciji manjši oz. kanali/struge nižjega reda, ki se razprostirajo v podporečju in tečejo proti glavni vodni poti. Vsak pritok v podporečju drenira samo delež podporečja in podtalnica ne prispeva k njegovemu toku. Ves tok v pritoku se izteka v glavno vodno pot. SWAT uporablja lastnosti pritokov za določitev časa koncentracije v podporečju.

Izgube (angl. *transmission losses*): So izgube (vode) pri površinskem toku, ki nastanejo zaradi izpiranja/pronicanja skozi samo strugo (angl. *streambed*). Takšen tip izgub, se pojavi predvsem pri presihajočih vodotokih, kjer se prispevek podtalnice pojavi samo nekajkrat na leto, ali pa sploh ne. SWAT za oceno transmisijskih izgub uporablja Lane-ovo metodo (USDA SCS, 1983). Vodne izgube iz korita, so funkcija širine in dolžine korita, ter trajanja toka. Volumen odtoka in konica sta prilagojena, ko se pojavijo izgube v pritokih.

Povratni tok ali bazni odtok: Del pretoka v vodotoku, ki izvira iz podtalnice. SWAT deli podtalnico na dva vodonosna sistema: plitvi, odprti vodonosnik (vodonosnik, ki vsebuje podzemno odprto vodo, tj. prosto vodno gladino in nezasičeno cono), ki prispeva povratni tok vodotokom znotraj razvodnice in globoki, zaprti vodonosnik (vodonosnik, obdan z neprepustno ali slabo prepustno geološko formacijo), ki prispeva povratni tok vodotokom zunaj razvodnice. Voda, ki pronica skozi dno koreninskega območja je razdeljena na dva dela, vsaka od njiju napaja en vodonosnik. Poleg povratnega toka, lahko vodo, ki je shranjena v plitkem vodonosniku, zamenja vlaga v profilu tal, v zelo suhih pogojih, ali pa jo neposredno posrkajo rastline. Vodo v plitvem oz. globokem vodonosniku lahko tudi črpamo.

Prenos poplavnega vala (angl. *flood routing*): Ko voda teče dol-vodno, se je del lahko izgubi z izhlapevanjem in skozi dno korita. Druga potencialna izguba pa je odvzem vode za potrebe kmetijstva oz. za uporabo človeka. K toku vode v vodotoku lahko neposredno prispeva dež, ki pade neposredno v strugo in točkovni izpusti. Prenos vode po koritu se računa z uporabo metode spremenljivega koeficienta skladiščenja (Williams, 1969) ali pa z Muskingum-ovim modelom.

2.4 Waterbase projekt in MWSWAT program

WaterBase (2011) projekt je projekt Univerze združenih narodov (George in Leon, 2007). Cilj projekta je ustvariti generično metodologijo, za pomoč pri odločanju, posebno pri modeliranju vodnih virov.

Orodja za modeliranje so na voljo in imajo dokazan uspeh v številnih državah. Vendar so po navadi uporabniku neprijazna, potrebujejo veliko podatkov in so zelo draga. Na drugi strani pa se ponudba zastojnih GIS in ostalih podatkov na internetu veča in zmogljivosti za obdelavo in shrambo današnjih osebnih računalnikov so postale dovolj velike, kar je modeliranje zelo pocenilo in ga naredilo bolj dostopnega.

Cilj WaterBase projekta je izkoriščanje tega v treh fazah. Prva faza je razvoj orodja za hidrološko modeliranje, ki bo odprtega tipa. Namen orodja je uporaba le-tega kjerkoli na svetu s pomočjo GIS podatkov dostopnih na internetu in podporo z bolj detajlnimi lokalnimi podatki. V drugi fazi institucije, ki uporabljajo orodje, poročajo o uporabi in izražajo potrebe za nadaljnjo uporabo. Tretja faza, bo glede na izražene zahteve razvijala dodatna orodja in tudi zunanja sredstva (George in sod., 2007). Takšno orodje je potrebno predvsem v državah v razvoju, ki se večkrat soočajo z več problemi z vodo naenkrat (onesnažena pitna voda, onesnaženost s hranili,...).

Omenjeni sistem za pomoč pri odločanju za svoje uspešno delovanje potrebuje več komponent (George in sod., 2007):

- GIS sistem, ki je zmožen prikazati geografske podatke (rastrske in vektorske) ima tehnične zmožnosti re-projeckije, združevanja (angl. *clipping*), re-klasifikacije, re-kodiranja, vzorčenja, uvoza, izvoza različnih formatov datotek itd.,
- Orodja za modeliranje, potrebna za zagon simulacije,
- Podporo za vnos vhodnih podatkov in parametrov v model,
- Shranjevanje za več različnih tipov podatkov, uporabnih kot vhodni podatki ali podatkov, ki so generirani kot izhodni podatki,
- Orodja, s katerimi so rezultati ustrezno analizirani in prikazani v človeško berljivi obliki.

WaterBase (2011) je DSS (angl. *decision support system*) prostorskega modeliranja. Njegov cilj je spodbuditi uporabo zastojne odprtokodne programske opreme in podatkov, ki so največkrat dostopni na spletu (angl. *open source*) (dostop do vira produkta je odprt, uporabnik ima zaupanje, da vir ne bo izginil, ali pa nekega dne postal plačljiv, hkrati pa da uporabniku možnost njegove »posvojitve« in nadgradnje). Uporabniki niso omejeni samo na te podatke. Če so dostopni točnejši, lokalni podatki, je

seveda njihova uporaba smotrnejša. Zastojni del je predvsem pomemben v državah v razvoju, zlasti z vidika cene komercialnih GIS orodij.

MapWindow (2011) je bil izbran kot platforma GIS sistema za nadaljnji razvoj. MapWindow je prosto dostopno orodje za okolje Windows in se je zelo razvil, odkar je postal odprtokodni vir. Njegova zgradba je zasnovana na enostavnih razširitvah oz. vmesnikih (angl. *plug-in*). MWSWAT je torej vmesnik v programu MapWindow, kateri nam omogoča uporabo SWAT-a in njegovih funkcij, podobno kot v ostalih GIS sistemih, ki pa so plačljivi (npr. ArcView in ArcSWAT). Na spletnih straneh Waterbase-a so dostopni MWSWAT, SWAT Editor, potrebna programska dokumentacija in teoretična dokumentacija.

SWAT je bil izbran za prvi model iz več razlogov in sicer, ker je zastojni, odprtokodni, aktivno podprt s strani razvijalcev, dobro dokumentiran in testiran po celem svetu.

SWAT vmesnik je bil napisan kot vtičnik za MapWindow. Je precej podoben vmesniku za ArcView, ki je najbolj uporabljen model med uporabniki SWAT-a.

V MapWindow platformo je vključen še en pomemben vmesnik in sicer razmejitev porečja (angl. *Watershed delination*), ki temelji na TauDEM (angl. *Tarboton in Ames*), s katerim se izvede začetna razmejitev porečja oz. definiranje toka in razdelitev na podporečja in posamezne HRU.

2.5 Padavine

Padavine, ki dosežejo zemeljsko površje na določen dan (R_{day}), so lahko prebrane iz vhodne datoteke merjenih padavin, ali pa generirane z modelom. Padavine se podajo v dnevih intervalih, ali manjših intervalih. Priporočljivo je, da se v simulacijo vključijo merjene padavine, kadarkoli so te na voljo. Zmožnost SWAT-a, da generira histograme padavin, je močno izboljšana z uporabo merjenih podatkov o padavinah.

Podatki o dnevnih padavinah so potrebni, kadar se izgube določa z SCS CN metodo, podatki o padavinah manjših časovnih intervalov pa, kadar je v uporabi Green in Ampt-ova metoda.

Ne glede na uporabo merjenih podatkov o padavinah, lahko uporabniki modela pričakujejo določeno napako zaradi sistematične napake pri meritvah padavin. Do napak pri meritvah padavin na posameznih merskih postajah prihaja, zaradi različnih vzrokov (veter, izhlapevanje itd.), dodatna napaka pa se pojavi, ko točkovne meritve pretvarjamo v ploskovne (Bajc, 2010). Tipično imajo celotne ali povprečne vrednosti padavin enega leta ali dlje na nekem območju relativno nezanesljivost okrog 10 % (Winter, 1981). Točkovne meritve padavin po navadi zajamejo samo del dejanskih padavin. Sistematični pogreški pri meritvah imajo vedno isti predznak. To pomeni, da so padavine izmerjene v točki, vedno manjše od tistih, ki so realno padle na površino tal (Bonacci, 1994).

SWAT zahteva dnevne podatke o padavinah, maksimalni in minimalni temperaturi, sončnem sevanju, relativni vlažnosti in hitrosti vetra. Podatke lahko vnesemo z vhodno datoteko, ali pa jih generiramo z uporabo povprečnih mesečnih.

2.5.1 Vremenski generator

SWAT zahteva dnevne podatke o padavinah, maksimalni in minimalni temperaturi, sončnem sevanju, relativni vlažnosti in hitrosti vetra. Podatke lahko vnesemo z vhodno datoteko, ali pa jih generiramo z uporabo povprečnih mesečnih podatkov, pridobljenih v več letih.

Dnevni generator padavin je asimetrična Markova veriga (Nicks, 1974) ali model eksponentne Markove verige (Williams, 1995). Markova veriga prvega reda je uporabljena za definicijo dneva kot mokrega, ali suhega. Ko je ustvarjen moker dan, je uporabljena asimetrična ali eksponentna porazdelitev za generiranje količine padavin.

2.5.2 Količina padavin

V uporabi so številne verjetnostne porazdelitve za opis porazdelitve količine padavin v odvisnosti od časa. SWAT ponuja dve možnosti: asimetrično porazdelitev in eksponentno porazdelitev.

Asimetrično porazdelitev je predlagal Nicks (1974) in temelji na asimetrični porazdelitvi, ki jo je uporabljal Fiering (1967), s katero je generiral ustrezen vodni tok.

Enačba za izračun količine padavin na moker dan je:

$$R_{day} = \mu_{mon} + 2 \times \sigma_{mon} \times \left(\frac{\left[\left(\frac{SND_{day} - \frac{g_{mon}}{6}}{g_{mon}} \right) \times \left(\frac{g_{mon}}{6} \right) + 1 \right]^3 - 1}{g_{mon}} \right) \quad (2)$$

Kjer je:

- R_{day} količina padavin na določen dan (mm H₂O),
- μ_{mon} srednje dnevne padavine za določen mesec (mm H₂O),
- σ_{mon} standardna deviacija dnevnih padavin za določen mesec (mm H₂O),
- SND_{day} standardna normalna deviacija izračunana za določen dan,
- g_{mon} asimetrični koeficient dnevnih padavin v mesecu.

Standardna normalna deviacija določenega dneva se izračuna po enačbi:

$$SND_{day} = \cos(6.283 \times rnd_2) \times \sqrt{-2 \ln(rnd_1)} \quad (3)$$

Kjer sta:

- rnd_1 in rnd_2 poljubni števili med 0.0 in 0.1.

Eksponentna porazdelitev je ponujena kot alternativa asimetrični. Ta porazdelitev potrebuje manj vhodnih podatkov in se običajno uporablja na območjih, kjer so padavinski podatki omejeni. Količina dnevnih padavin je z eksponentno porazdelitvijo izračunana z enačbo:

$$R_{day} = \mu_{mon} \times (-\ln(rnd_1))^{r_{exp}} \quad (4)$$

Kjer je:

- R_{day} količina padavin na določen dan (mm H₂O),
- μ_{mon} srednje dnevne padavine v mesecu (mm H₂O),
- rnd_1 poljubno število med 0.0 in 1.0,

- *rexp* eksponent ki mora biti nastavljen med 1.0 in 2.0.

Če se vrednost *rexp* povečuje, se bo število ekstremnih padavinskih dogodkov tekom leta večalo. Testiranje enačbe na različnih lokacijah v ZDA je pokazalo, da daje vrednost 1.3 zadovoljive rezultate.

2.5.3 Sneg

SWAT obravnava padavine kot dež ali sneg/zmrznjen dež, glede na srednjo dnevno temperaturo zraka. Če je srednja dnevna temperatura nižja od mejne vrednosti T_{s-r} , ki jo definira uporabnik, potem so padavine znotraj HRU obravnavane kot sneg in količina vode, ki je enaka snežnim padavinam, je dodana v snežni sklad.

Količina novozapadlega snega je na površju tal v obliki snežnega sklada. Snežni sklad se bo večal z novozapadlim snegom oz. manjšal z taljenjem.

Masno ravnotežje snežnega sklada je:

$$SNO = SNO + R_{day} - E_{sub} - SNO_{mt} \quad (5)$$

Kjer je:

- SNO količina vode snežnega sklada na določen dan (mm H₂O),
- R_{day} količina padavin na določen dan (dodanih samo če je $\bar{T}_{av} \leq T_{s-r}$) (mm H₂O),
- E_{sub} sublimacija (mm H₂O),
- SNO_{mt} količina stopljenega snega na določen dan (mm H₂O).

Taljenje snega je odvisno od temperature zraka, snežnega sklada, stopnje taljenja in površine snežne odeje. Taljenje snega je upoštevano pri izračunu odtoka in precejjanja. Pri računu erozije je dežna energija taljenja snega nastavljena na vrednost 0. Voda izpuščena pri taljenju snega je enotno porazdeljena čez 24 h v dnevu (Neitsch in sod., 2005).

Stopnja taljenja snega je različna, glede na letni čas in je najmanjša oz. največja pri zimskem oz. poletnem solsticiju in glede na tip površja. Na ruralnih območjih se bo stopnja taljenja gibala od 1.4 do 6.9 mm H₂O/dan - °C (Huber in Dickinson, 1988). Na urbanih območjih bodo vrednosti višje zaradi pojava stiskanja snežnega sklada, kot posledica motornih vozil, pešcev, pluženja itd.

2.6 Padavinske izgube

2.6.1 Metoda SCS

SCS postopek za račun odтока, je empirični model, ki je prišel v uporabo v 50-ih letih prejšnjega stoletja (Chow in sod., 1988). Je produkt več kot 20-ih let študij, razmerja med padavinami in odtokom z manjših ruralnih prispevnih območjih v ZDA. Model je bil razvit kot osnova za oceno količine odтока s porečij z različno rabo tal in različnimi tipi zemljine (Rallison in Miller, 1981).

SCS enačba:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (6)$$

Kjer je:

- Q_{surf} akumuliran odток ali akumulirane efektivne padavine v času t (mm H₂O),
- R_{day} višina padavin v času t (mm),
- I_a začetne izgube, ki vključujejo površinsko shrambo, prestrezanje in infiltracijo pred pojavom odтока (mm),
- S maksimalno potencialno zadrževanje (retenzija - mera za sposobnost porečja odvzeti in zadržati padavine) (mm H₂O).

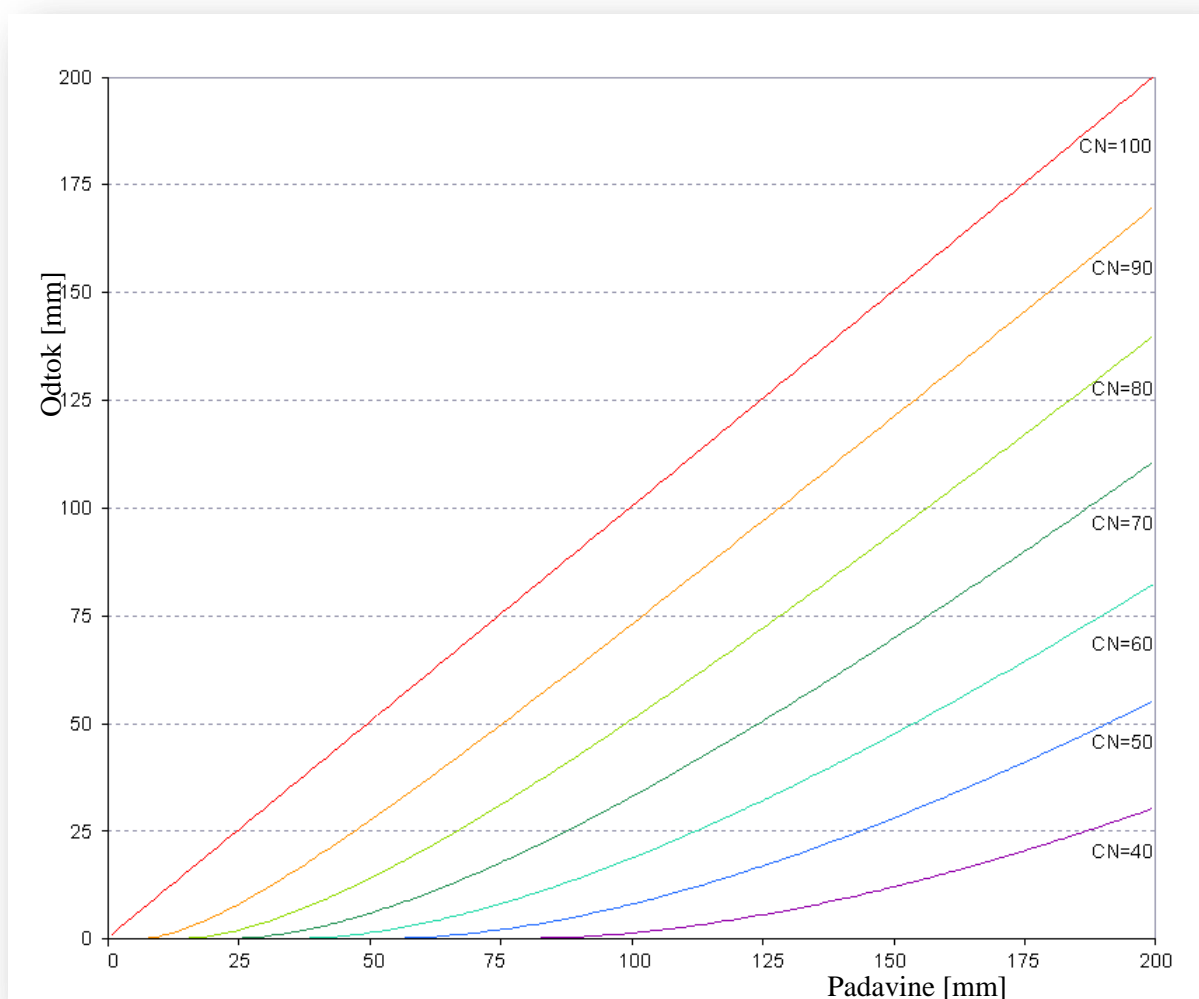
Iz analiz za manjša eksperimentalna porečja je SCS razvil empirično zvezo med I_a in S :

$$I_a = 0,2 S \quad (7)$$

Tako lahko enačbo za akumuliran odток (kumulativne efektivne padavine v času t) zapišemo kot:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0,2S)^2}{(R_{day} + 0,8S)} \quad (8)$$

Odtok se pojavi ko je $R_{day} > I_a$.



Slika 5: Parameter CN za določitev odtoka v odvisnosti od padavin (prirejeno po Neitsch in sod., 2005)

Maksimalno zadrževanje S in značilnosti porečja so povezani s parametrom CN (slika 5). Retenzija se spreminja prostorsko, glede na spremembe v zemljini, rabi tal, naklonu in časovno glede na vsebnost vode v zemlji.

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (9)$$

2.6.1.1 SCS CN

Parameter SCS CN je funkcija prepustnosti zemljine, rabe tal in predhodne vlažnosti zemljine. Tipične vrednosti CN za I. ACM skupino predhodne vlažnosti, za različne tipe zemljine in rabo tal so

prikazane v preglednici 1 in 2 (prirejeno po Neitsch in sod., 2005). Vrednosti so primerne za naklone približno 5 %.

Preglednica 1: CN vrednosti za ostale kmetijske površine (USDA SCS Engineering Division, 1983)

Tip površja	Hidrološka razvrstitev zemljin				
	Hidrološki pogoji	A	B	C	D
pašnik, travnik, ali območje stalne krme za pašo	slabi	68	79	86	89
	vmesni	49	69	79	84
	dobri	39	61	74	80
travnik z neprekinjeno rastjo, zaščiten pred pašo in običajno košen za seno		30	58	71	78
mešanica plevel - trava	slabi	48	67	77	83
	vmesni	35	56	70	77
	dobri	30	48	65	73
gozdovi v kombinaciji s travniki (sadovnjaki, ali gozdna kmetija)	slabi	57	73	82	86
	vmesni	43	65	76	82
	dobri	32	58	72	79
gozdovi	slabi	45	66	77	83
	vmesni	36	60	73	79
	dobri	30	55	70	77
kmetijske stavbe, dovozi, steze in okoliški objekti		59	74	82	86

Preglednica 2: CN vrednosti za urbana območja (USDA SCS Engineering Division, 1983)¹

Površje		Povprečen % nepropustne površine	Hidrološka razvrstitev zemljin			
			A	B	C	D
Tip površja	Hidrološki pogoji					
<i>Popolnoma razvita urbana območja</i>						
Odprti prostori (zelenice, parki, golf igrišča, pokopališča itd.)	slabi		68	79	86	89
	vmesni		49	69	79	84
	dobri		39	61	74	80
<i>Nepropustne površine:</i>						
Tlakovana parkirišča, strehe, dovozi itd.			98	98	98	98
Tlakovane ceste in ulice, odprti jarki			83	89	92	93
Gramozne ceste in ulice			76	85	89	91
Makedamske/blatne ceste in ulice			72	82	87	89
<i>Urbana okrožja:</i>						
Komerzialna in poslovna		85%	89	92	94	95
Industrijska		72%	81	88	91	93
<i>Stanovanjska okrožja glede na povprečno vrednost naselja:</i>						
0.05ha ali manj (mestne hiše)		65%	77	85	90	92
0.10ha		38%	61	75	83	87
0.13ha		30%	57	72	81	86
0.20ha		25%	54	70	80	85
0.40ha		20%	51	68	79	84
0.81ha		12%	46	65	77	82
<i>Urbana območja v razvoju:</i>						
ocenjena na novo			77	86	91	94

¹ SWAT bo avtomatsko nastavljal vrednosti CN za nepropustne površine, ko bosta v .hru datoteki definirana IURBAN in URBLU.

2.6.1.2 Hidrološka klasifikacija zemljin

U.S. Natural Resource Conservation Service (NRCS) klasificira zemljine v štiri hidrološke skupine, glede na infiltracijske sposobnosti zemljine. NRCS Soil Survey Staff (1996) definira hidrološko skupino, kot skupino zemljin, ki imajo podoben odtočni potencial v podobnih padavinskih dogodkih in površinskih razmerah. Lastnosti zemljine, ki vplivajo na odtočni potencial, so tiste, ki imajo vpliv na minimalno infiltracijo gole prsti po podaljšanjem močenju in v nezmrznjenem stanju. Te lastnosti so: globina do sezonsko visoke talne vode, nasičena hidravlična prevodnost in globina do zelo počasi prepustnega sloja. Zemljina je lahko uvrščena v enega izmed štirih razredov: A, B, C in D, ali pa v tri vmesne razrede A/D, B/D in C/D (Neitsch in sod., 2005):

Definicije razredov so:

A: (Nizek odtočni potencial): Zemljine imajo visok nivo infiltracije, tudi ko so močno močene. Sestavlja jih predvsem globok, dobro do zelo dobro drenirani pesek in prod. Imajo visok nivo prenosa vode.

B: Zemljine imajo zmeren nivo infiltracije, ko so dobro močene. V glavnem so sestavljene iz zmerno globokih do globokih, zmerno do dobro dreniranih zemljin, ki imajo zmerno fino do zmerno grobo teksturo. Imajo zmeren nivo prenosa vode.

C: Zemljine imajo počasen nivo infiltracije, ko so dobro močene. Največkrat imajo plast zemljine, ki ovira pomikanje vode navzdol, oz. imajo zmerno fino do fino teksturo. Imajo počasen nivo prenosa vode.

D: (Visok odtočni potencial). Zemljine imajo zelo nizek nivo infiltracije, ko so dobro močene. Sestavljene so predvsem iz zaglinjenih zemljin, zemljin, ki imajo stalno talno vodo, zemljin s plastjo glin na ali v bližini površja ali plitvih zemljin nad skoraj nepropustnimi sloji. Imajo zelo počasen nivo prenosa vode.

Dvojne oznake hidroloških skupin so podane za nekatere mokre zemljine, ki so lahko ustrezno drenirane. Prva črka se nanaša na drenirane pogoje, druga pa na ne drenirane. Samo zemljine z oznako D v naravnem stanju imajo lahko dvojno oznako.

2.6.1.3 Predhodni vlažnostni pogoji zemljine

SCS definira tri predhodne vlažnostne pogoje/razmere I - suho (točka venenja), II - povprečna vlažnost in III - mokro (poljska kapaciteta tal). Vrednosti CN za vlažnostne pogoje I in III so izračunane z enačbami:

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20 \times (100 - CN_2)}{(100 - CN_2 + \exp[2.533 - 0.636 \times (100 - CN_2)])} \quad (10)$$

$$CN_3 = CN_2 \times \exp[0.00673 \times (100 - CN_2)] \quad (11)$$

Kjer je:

- CN_1 vrednost CN za vlažnostne pogoje I,
- CN_2 vrednost CN za vlažnostne pogoje II,
- CN_3 vrednost CN za vlažnostne pogoje III.

2.6.1.4 Parameter zadrževanja

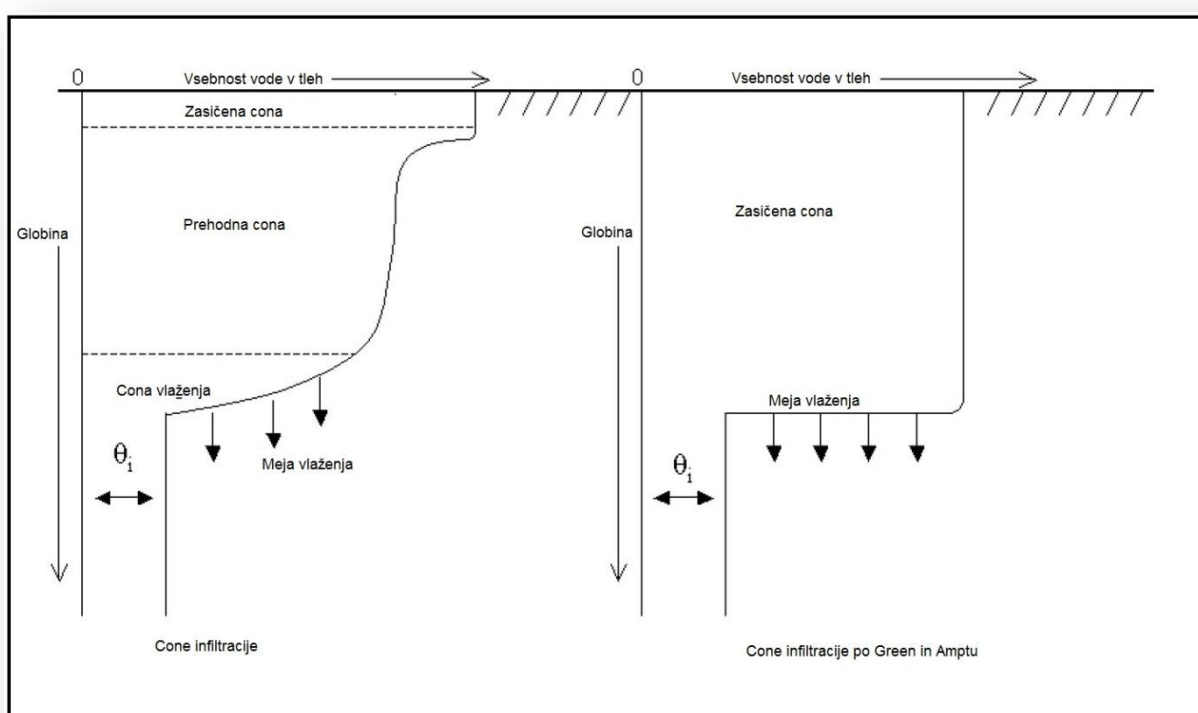
Zadrževanje je del padavin, padlih na prispevno območje, ki v določenem časovnem obdobju ne odteče kot površinski odtok.

Možna je uporaba dveh metod za določevanje parametra zadrževanja. Tradicionalna metoda dovoljuje, da se parameter zadrževanja spreminja glede na vsebino vode v profilu tal. Alternativa pa dopušča uporabo parametra, ki se spreminja glede na akumulirano evapotranspiracijo rastlin. Izračun vrednosti CN kot funkcijo rastlinske evapotranspiracije je bil dodan zato, ker je metoda vlažnosti zemljine napovedovala prevelik površinski odtok na plitvih tleh.

Z izračunom vrednosti CN glede na evapotranspiracijo rastlin, je vrednost manj odvisna od skladiščenja v zemljini in bolj odvisna od predhodnih klimatskih razmer.

2.6.2 Metoda Greena in Ampta

Leta 1911 sta znanstvenika Green in Ampt razvila enačbo infiltracije na osnovi enostavnega modela infiltracije in Darcyjevega zakona za gibanje vode skozi porozen medij (Jordan, 2010). Enačba predpostavlja, da je profil tal homogen in da je predhodna vlažnost enakomerno porazdeljena v profilu tal. Ko se voda infiltrira v zemljino, model predvideva, da je zemljina nad mejo vlaženja popolnoma zasičena in je v njej ostra ločnica v vsebnosti vlage. Slika 6 grafično ilustrira razliko med porazdelitvijo vlage z globino po enačbi Greena in Ampta in med pojavom v realnosti.



Slika 6: Primerjava med porazdelitvijo vlažnosti po modelu Green in Ampt-a in običajno opazovano porazdelitvijo (prirejeno po Neitsch in sod., 2005)

Mein in Larson sta leta 1973 (Chow, 1988) razvila prilagojeno metodologijo določanja infiltracije z uporabo enačbe Green in Ampt-a. Green-Ampt Mein-Larson metoda je vključena v SWAT, kot alternativna metoda za določitev površinskega odtoka. Ta metoda potrebuje podatke o padavinah, izmerjene v manjših časovnih intervalih ki jih zagotovi uporabnik.

Green-Ampt Mein-Larson metoda je definirana kot:

$$f_{inf,t} = K_e \times \left(1 + \frac{\Psi_{wf} \times \Delta\theta_v}{F_{inf,t}} \right) \quad (12)$$

Kjer je:

- $f_{inf,t}$ stopnja infiltracije v času t (mm/h),
- K_e efektivna hidravlična prevodnost (mm/h),
- Ψ_{wf} srk tal na meji vlaženja (mm),
- $\Delta\theta_v$ sprememba v volumski vsebnosti vlage na meji vlaženja (mm/mm),
- $F_{inf,t}$ kumulativna/naraščajoča infiltracija v času t (mm H₂O).

Green in Ampt-ov parameter efektivne hidravlične prevodnosti K_e je približno ekvivalenten polovičnemu zasičenemu hidravličnemu parametru zemljine, K_{sat} (Bouwer, 1969). Nearing s sodelavci (1996) je razvil enačbo za izračun efektivne hidravlične prevodnosti kot funkcijo zasičene hidravlične prevodnosti in vrednosti CN. Ta enačba vključuje vpliv površja zemljine v izračunu efektivne hidravlične prevodnosti.

Srk vlažne fronte Ψ_{wf} , je izračunan kot funkcija poroznosti, deleža peska in deleža gline (Rawls in Brakensiek, 1985).

2.6.3 Evapotranspiracija

Evapotranspiracija predstavlja enega izmed pomembnejših dejavnikov v hidrološkem krogu. Kot pojem predstavlja dva ločena procesa in sicer izhlapevanje in transpiracijo, kot proces pa sta oba pojma med seboj združena, saj potekata istočasno in ju je med seboj težko ločiti (Cesar, 2010).

2.6.3.1 Potencialna evapotranspiracija

Potencialna evapotranspiracija je pojem, opredeljen kot količina vode, ki je izhlapela v določenem času iz nizkih zelenih rastlin (te popolnoma zasenčijo tla) z enakomerno višino in primerno oskrbo z vodo. Lahko pa je definirana tudi kot največja količina vode, ki glede na lastnosti atmosfere in količino razpoložljive energije lahko preide v atmosfero z neprekinjenega območja, ki je v celoti prekrito z rastlinstvom in dobro oskrbljeno z vodo, skozi proces izhlapevanja in transpiracije (Mikoš in sod., 2002).

Zaradi velikega števila vrst rastlin, je prišlo do zmede pri uporabi kategorije nizkih zelenih rastlin, zato je bolj priporočljiva uporaba pojma referenčna evapotranspiracija (Cesar, 2010).

SWAT glede na indeks listne površine izračuna maksimalno količino vode, shranjeno v krošnjah in rastlinstvu. Za izračun potencialne evapotranspiracije so na voljo 3 metode.

2.6.3.2 Metoda Penman - Monteith

Enačba se je razvila na pobudo FAO v sodelovanju z Mednarodno komisijo za namakanje in drenažo (ICID) in Svetovno meteorološko organizacijo (WMO). Od leta 1990 je na njihov predlog to standardna metoda izračuna potencialne evapotranspiracije (Cesar, 2010).

$$\lambda E_t = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \rho_{air} \cdot c_p \cdot (e_z^0 - e_z) / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c / r_a)} \quad (13)$$

Kjer je:

- λE_t (MJ m⁻² d⁻¹),
- Δ naklon krivulje parnega tlaka (kPa °C⁻¹),
- H_{net} neto sevanje (MJ m⁻² d⁻¹),
- G tok toplote iz površja (MJ m⁻² d⁻¹),
- ρ_{air} gostota zraka (kg m⁻³),
- c_p specifična toplota pri konstantnem tlaku (MJ m⁻² d⁻¹),
- e_z^0 zasičen parni tlak na višini z (kPa),
- e_z dejanski parni tlak na višini z (kPa),
- r_a zračni upor (s m⁻¹),
- r_c upor rastline/krošnje (s m⁻¹),
- γ psihometrična konstanta (kPa °C⁻¹).

2.6.3.3 Metoda Priestley - Taylor

Avtorja sta enačbo razvila leta 1972 in se uporablja v primerih ko so tla zasičena z vodo.

$$\lambda E_o = \alpha_{pet} \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot (H_{net} - G) \quad (14)$$

Kjer je:

- λ latentna toplota uparjanja (MJ kg⁻¹),

- E_o potencialna evapotranspiracija (mm d^{-1}),
- α_{pet} koeficient z vrednostjo 1.26 (če tla niso zasičena z vodo, se koeficienta ne upošteva),
- Δ naklon krivulje parnega tlaka ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$),
- γ psihometrična konstanta ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$),
- H_{net} neto sevanje ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$),
- G tok toplote iz površja ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

2.6.3.4 Hargreavesova enačba

Enačba nam podaja dnevne rezultate izračuna referenčne evapotranspiracije izražene v milimetrih (Cesar, 2010).

$$\lambda E_o = 0.0023 \cdot H_0 \cdot (T_{mx} - T_{mn})^{0.5} \cdot (\bar{T}_{av} + 17.8) \quad (15)$$

Kjer je:

- λ latentna toplota uparjanja (MJ kg^{-1}),
- E_o potencialna evapotranspiracija (mm d^{-1}),
- H_0 izven zemeljsko sevanje ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$),
- T_{mx} maksimalna dnevna temperatura ($^\circ\text{C}$),
- T_{mn} minimalna dnevna temperatura ($^\circ\text{C}$),
- \bar{T}_{av} povprečna dnevna temperatura ($^\circ\text{C}$).

2.7 Površinski odtok

Površinski odtok se pojavi, ko intenziteta padavin preseže stopnjo infiltracije oz. infiltracijsko sposobnost zemljine (Brilly in Šraj, 2005). Infiltracija je navadno velika na začetku, ko padavine padejo na suha tla in se zmanjšuje z močenjem talnega profila. Ko je intenziteta padavin večja od stopnje infiltracije, se začnejo najprej polniti površinske depresije in ko so te zapolnjene nastopi površinski odtok.

2.7.1 HRU

SWAT uporablja HRU (angl. *Hydrologic Response Unit*) kot osnovo za modeliranje. HRU so ustvarjene znotraj podporečja glede na rabo tal, vrsto zemljine in naklon. Uporabnik lahko izbira med eno HRU (angl. *Dominant HRU*) in več HRU (angl. *Multiple HRUs*) v posameznem podporečju. Če je

posamezno podporečje ena HRU (opcija »Dominant HRU«), z enotno rabo tal, tipom tal in naklonom potem so v tem primeru prevladujoča raba tal, tip tal in nakloni posplošeni na celotno podporečje.

HRU je lahko ustvarjena za vsako rabo tal, tip tal oz. naklon posebej, vendar bodo v praksi ta območja lahko zelo majhna in potrebno je izbrati nek kompromis med natančnostjo določitve HRU in ostalimi vhodnimi podatki.

2.7.2 Konica odtoka

Konica odtoka, je največji pretok, ki se pojavi po določenem padavinskem dogodku. Konica odtoka je indikator erozivne moči nevihte in določa napoved izgube/erozije sedimentov. SWAT izračuna konico odtoka z modificirano racionalno metodo.

Racionalna metoda je najbolj široko uporabljena empirična metoda pri dimenzioniranju kanalizacije meteornih vod z urbaniziranih površin, prav tako pa se uporablja tudi za določitev največjega odtoka iz manjših ruralnih porečij (do 2.5 km²). Racionalna metoda temelji na predpostavki, da če se dežna intenziteta i začne pri času $t = 0$ in se nadaljuje nedoločen čas, bo odtok naraščal do časa koncentracije $t = t_{conc}$, ko bo celotna površina podporečja prispevala k površinskemu odtoku. Racionalna enačba oceni največji pretok kot:

$$q_{peak} = \frac{C \times i \times Area}{3.6} \quad (16)$$

Kjer je:

- q_{peak} največji pretok (m³/s),
- C koeficient odtoka,
- i povprečna intenziteta padavin v času koncentracije (mm/h),
- $Area$ površina podporečja (km²),
- 3.6 faktor zaradi pretvorbe enot.

2.7.2.1 Čas koncentracije

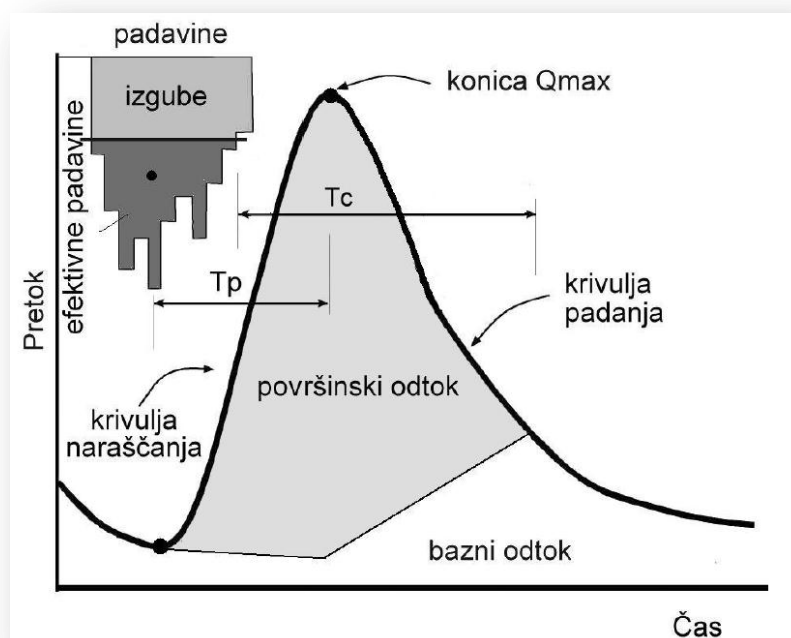
Čas koncentracije, je čas od konca nevihtnega dogodka, do trenutka, ko vsa prispevna površina podporečja prispeva odtok k skupnemu odtoku. Z drugimi besedami, je čas koncentracije čas, ki ga kapljica vode porabi od najbolj oddaljene točke na porečju do iztočnega profila (slika 7).

Čas koncentracije je vsota časa površinskega toka (čas, ki je potreben, da površinski vodni tok iz najbolj oddaljene točke porečja doseže strugo glavnega vodotoka) in časa toka po strugi vodotoka (čas, ki je potreben, da tok iz zgornjih kanalov doseže iztočni profil):

$$t_{conc} = t_{ov} + t_{ch} \quad (17)$$

Kjer je:

- t_{conc} čas koncentracije podporečja (h),
- t_{ov} čas koncentracije površinskega toka/čas potovanja po površini porečja (h),
- t_{ch} čas koncentracije toka vodotoka/čas potovanja po vodotoku (h).



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

Čas koncentracije površinskega toka:

Čas koncentracije površinskega toka lahko izračunamo po enačbi:

$$t_{ov} = \frac{L_{shp}}{3600 \times v_{ov}} \quad (18)$$

Kjer je:

- L_{shp} dolžina naklona podporečja (m),

- v_{ov} hitrost površinskega toka (m/s),
- 3600 faktor pretvorbe enot.

Hitrost površinskega toka je lahko določena iz Manning-ove enačbe z upoštevanjem en meter širokega pasu na površini naklona:

$$v_{ov} = \frac{q_{ov}^{0.4} \times slp^{0.3}}{n^{0.6}} \quad (19)$$

Kjer je:

- q_{ov} povprečen površinski pretok (m^3/s),
- slp povprečni naklon podporečja (m/m),
- n Manning-ov koeficient hrapavosti podporečja.

Upoštevajoč povprečen pretok 6.35 mm/h in pretvorbo enot dobimo enačbo:

$$v_{ov} = \frac{0.005 \times L_{shp}^{0.4} \times slp^{0.3}}{n^{0.6}} \quad (20)$$

Enačbo 20 vstavimo v enačbo 18 in dobimo:

$$t_{ov} = \frac{L_{shp}^{0.6} \times n^{0.6}}{18 \times slp^{0.3}} \quad (21)$$

Čas koncentracije toka v kanalu:

Čas koncentracije toka v kanalu t_{ch} izračunamo z enačbo:

$$t_{ch} = \frac{L_c}{3.6 \times v_c} \quad (22)$$

Kjer je:

- L_c povprečna dolžina kanala na podporečju (km),
- v_c povprečna hitrost vode v kanalu (m/s),
- 3.6 faktor pretvorbe enot.

Povprečna dolžina kanala je lahko ocenjena z enačbo:

$$L_c = \sqrt{L \times L_{cen}} \quad (23)$$

Kjer je:

- L dolžina kanala od najbolj oddaljene točke podporečja do iztočnega profila (km),
- L_{cen} razdalja od najbolj oddaljene točke podporečja do središča podporečja (km).

Če ocenimo $L_{cen} = 0.5 \times L$, je povprečna dolžina kanala:

$$L_c = 0.71 \times L \quad (24)$$

Povprečno hitrost vode v kanalu lahko ocenimo z Manning-ovo enačbo, ob predpostavki da imamo trapezno obliko korita z naklonom stranic v razmerju 2 : 1 in razmerjem širine dna in globine 10 : 1.

$$v_c = \frac{0.489 \times q_{ch}^{0.25} \times slp_{ch}^{0.375}}{n^{0.75}} \quad (25)$$

Kjer je:

- v_c povprečna hitrost vode v kanalu (m/s),
- q_{ch} povprečen pretok v kanalu (m³/s),
- slp_{ch} naklon kanala (m/m),
- n Manning-ov koeficient hrapavosti kanala.

Za račun povprečnega pretoka v kanalu v mm/h, se uporablja naslednji izraz:

$$q_{ch} = \frac{q_{ch}^* \times Area}{3.6} \quad (26)$$

Kjer je:

- q_{ch}^* povprečen pretok v kanalu (m³/s),
- $Area$ površina podporečja (km²),
- 3.6 faktor pretvorbe enot.

Povprečen pretok v kanalu je povezan s specifičnim pretokom na enoto površine (enota površine je po navadi 1ha).

$$q_{ch}^* = q_0^* \times (100 \times Area)^{-0.5} \quad (27)$$

Kjer je:

- q_0^* specifični pretok na enoto površine (mm/h),
- $Area$ površina podporečja (km²),
- 100 faktor pretvorbe enot.

Ob predpostavki, da je specifični pretok na enoto površine 6.35 mm/h in združitvi enačb 26 in 27 v enačbo 25 je povprečna hitrost vode v kanalu:

$$v_c = \frac{0.317 \times Area^{0.125} \times slp_{ch}^{0.375}}{n^{0.75}} \quad (28)$$

Ob združitvi enačb 24 in 28 v enačbo 22 dobimo:

$$t_{ch} = \frac{0.62 \times L \times n^{0.75}}{Area^{0.125} \times slp_{ch}^{0.375}} \quad (29)$$

Kjer je:

- t_{ch} čas koncentracije toka po vodotoku (h),
- L dolžina kanala od najbolj oddaljene točke podporečja do iztočnega profila (km),
- n Manning-ov koeficient hrapavosti kanala,
- $Area$ površina podporečja (km²),
- slp_{ch} naklon kanala (m/m).

Ne glede na to, da se nekatere predpostavke uporabljene v enačbah 21 in 29, zdijo precej poenostavljene, dajo rezultati dobljenega časa koncentracije zadovoljive rezultate na homogenih podporečjih. Enačbi upoštevata hidravlične zakonitosti in sta bolj zanesljivi od enačb, ki temeljijo zgolj na empiričnih dejstvih.

2.7.2.2 Koeficient odtoka

Koeficient odtoka je razmerje med odteklo in padlo vodo (Brilly in Šraj, 2006). SWAT računa koeficient kot razmerje med dotokom, $i \times Area$ in konico pretoka, q_{peak} . Koeficient se spreminja od nevihte do nevihte in je izračunan z enačbo:

$$C = \frac{Q_{surf}}{R_{day}} \quad (30)$$

Kjer je:

- Q_{surf} površinski odtok (mm H₂O),
- R_{day} količina dežja na določen dan (mm H₂O).

2.7.2.3 Intenziteta padavin

Intenziteta padavin je povprečna intenziteta padavin v času koncentracije porečja. Glede na to definicijo, lahko intenziteto dežja zapišemo kot:

$$i = \frac{R_{tc}}{t_{conc}} \quad (31)$$

Kjer je:

- i intenziteta dežja (mm/h),
- R_{tc} količina dežja padlega v času koncentracije (mm H₂O),
- t_{conc} čas koncentracije podporečja (h).

Analiza padavinskih podatkov različnih trajanj in povratnih dob, ki jih je zbral Hershfield (1961), je pokazala, da je količina padlega dežja v času koncentracije proporcionalna s količino dežja padlega v 24-urni periodi.

$$R_{tc} = \alpha_{tc} \times R_{day} \quad (32)$$

Kjer je:

- R_{tc} količina dežja padlega v času koncentracije (mm H₂O),
- α_{tc} delež dnevne količine dežja, padlega v času koncentracije,
- R_{day} količina dežja na določen dan (mm H₂O).

Pri kratkotrajnih nevihtah, oz. nevihtah, kjer vse padavine padejo znotraj časa koncentracije, se vrednost α_{tc} približuje svoji zgornji limiti 1.0. Minimalna vrednost α_{tc} se bo pojavila v nevihtah enakomerne intenzitete ($i_{24} = i$). Minimalna vrednost je lahko definirana z vnosom produkta časa in intenzitete padavin v enačbo 32:

$$\alpha_{tc,min} = \frac{R_{tc}}{R_{day}} = \frac{i \times t_{conc}}{i_{24} \times 24} = \frac{t_{conc}}{24} \quad (33)$$

Tako α_{tc} pade v območje $t_{conc}/24 \leq \alpha_{tc} \leq 1.0$.

2.7.2.4 Modificirana racionalna formula

Modificirana racionalna formula za oceno maksimalnega pretoka je dobljena z združevanjem enačb 30, 31 in 32 v enačbo 16:

$$q_{peak} = \frac{\alpha_{tc} \times Q_{surf} \times Area}{3.6 \times t_{conc}} \quad (34)$$

Kjer je:

- q_{peak} maksimalni pretok (m³/s),
- α_{tc} delež dnevne količine dežja, padlega v času koncentracije,
- Q_{surf} površinski odtok (mm H₂O),
- $Area$ površina podporečja (km²),
- t_{conc} čas koncentracije podporečja (h),
- 3.6 faktor pretvorbe enot.

2.7.3 Zakasnitev površinskega dela odtoka

V večjih porečjih s časom koncentracije večjim od enega dneva, le del površinskega odtoka doseže glavni kanal v istem dnevu. SWAT vključuje funkcijo shranjevanja dela površinskega odtoka, kot odtoka, ki je z zamikom sproščen v glavni kanal.

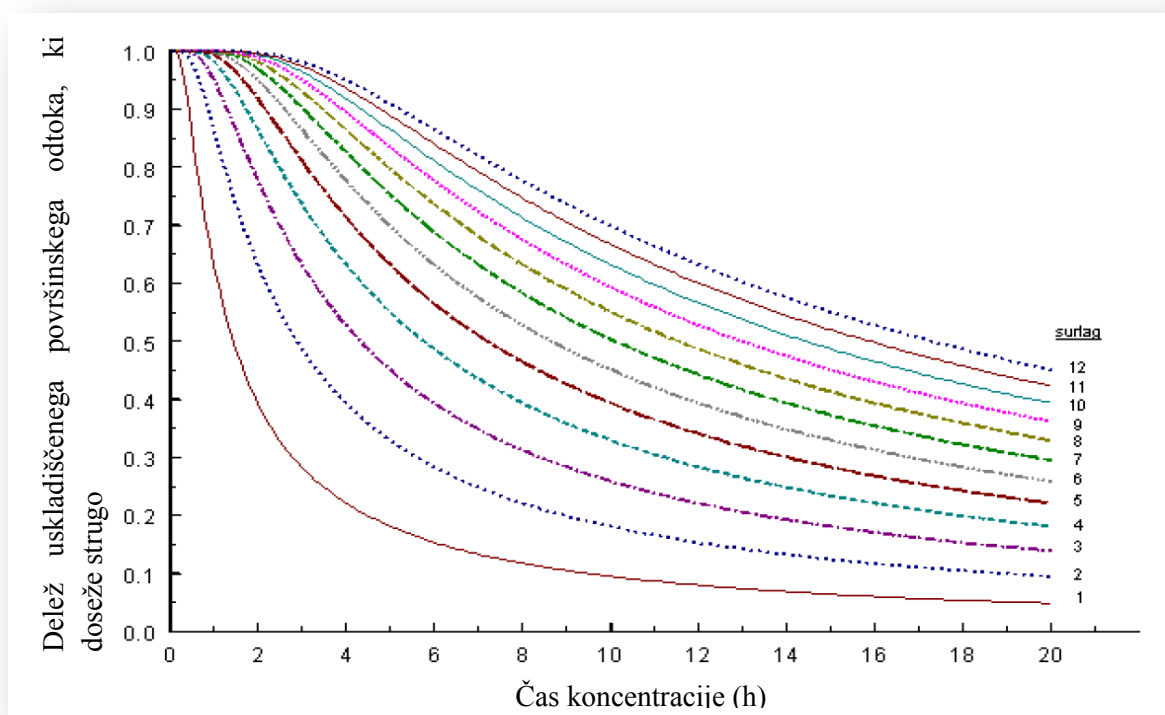
Če je površinski odtok določen z SCS CN ali Green in Ampt-ovo metodo, je izračunana količina površinskega odtoka sproščenega v glavni kanal:

$$Q_{surf} = \left(Q'_{surf} + Q_{stor,i-1} \right) \cdot \left(1 - \exp \left[\frac{-surlag}{t_{conc}} \right] \right) \quad (35)$$

Kjer je:

- Q_{surf} količina površinskega odtoka izpuščenega v glavni kanal, na določen dan (mm H₂O),
- Q'_{surf} količina površinskega odtoka ustvarjenega v podporečju, na določen dan (mm H₂O),
- $Q_{stor,i-1}$ količina površinskega odtoka uskladiščenega od prejšnjega dne oz. izpuščenega z zamikom (mm H₂O),
- $surlag$ koeficient časovnega zamika površinskega odtoka,
- t_{conc} čas koncentracije podporečja (h).

Izraz $\left(1 - \exp\left[\frac{-surlag}{t_{conc}}\right]\right)$ v enačbi 35 predstavlja delež skupne razpoložljive vode, ki ji je omogočen vstop na odseku na določen dan.



Slika 8: Vpliv koeficienta časovnega zamika (*surlag*) in časa koncentracije t_{conc} na delež izpuščenega površinskega odtoka (prirejeno po Neitsch in sod., 2005)

Če se za določen čas koncentracije t_{conc} vrednost koeficienta časovnega zamika površinskega odtoka (*surlag*) zmanjšuje, ostane več vode uskladiščene (slika 8). Zamuda v izpustitvi površinskega odtoka zgladi hidrogram na odseku.

2.7.4 Izgube pri prenosu (angl. *transmission losses*)

Mnogo polsuhih in suhih prispevnih območij ima presihajoče struge, v katerih so odvzemi vodnega toka zelo veliki (Lane, 1982). Odvzemi ali izgube v prenosu, zmanjšujejo volumen odtoka, ko (visoka) voda potuje dol-vodno. Poglavje 19 v SCS Hydrology Handbook (Lane, 1983) opisuje postopek, za oceno izgub pri prenosu za presihajoče tokove, ki je vključen tudi v SWAT. Metoda je bila razvita za oceno izgub v prenosu vala, kadar nimamo meritev pretokov. Enačba za napoved volumna odtoka, z upoštevanjem izgub pri prenosu je:

$$vol_{Qsurf,f} = \begin{cases} 0 & vol_{Qsurf,i} \leq vol_{thr} \\ a_x + b_x \cdot vol_{Qsurf,i} & vol_{Qsurf,i} > vol_{thr} \end{cases} \quad (36)$$

Kjer je:

- $vol_{Qsurf,f}$ volumen odtoka, po izgubah pri prenosu (m^3),
- a_x parameter linearne funkcije (začetna vrednost) za kanal dolžine L in širine W (m^3),
- b_x smerni koeficient linearne funkcije za kanal dolžine L in širine W,
- $vol_{Qsurf,i}$ volumen odtoka pred izgubami v prenosu (m^3),
- vol_{thr} mejni volumen za kanal dolžine L in širine W (m^3).

Mejni volumen je:

$$vol_{thr} = -\frac{a_x}{b_x} \quad (37)$$

Ustrezna enačba za konico odtoka je:

$$q_{peak,f} = \frac{1}{(3600 \cdot dur_{flw})} \cdot [a_x - (1 - b_x) \cdot vol_{Qsurf,i}] + b_x \cdot q_{peak,i} \quad (38)$$

Kjer je:

- $q_{peak,f}$ maksimalni pretok po izgubah v prenosu (m^3/s),
- dur_{flw} trajanje pretoka (h),
- a_x parameter linearne funkcije (začetna vrednost) za kanal dolžine L in širine W (m^3),
- b_x smerni koeficient linearne funkcije za kanal dolžine L in širine W,
- $vol_{Qsurf,i}$ volumen odtoka pred izgubami v prenosu (m^3),
- $q_{peak,i}$ konica pretoka pred izgubami v prenosu (m^3/s).

Trajanje odtoka je določeno z enačbo:

$$dur_{flw} = \frac{Q_{surf} \cdot Area}{3.6 \cdot q_{peak}} \quad (39)$$

Kjer je:

- dur_{flw} trajanje odtoka (h),
- Q_{surf} količina površinskega odtoka (mm H₂O),
- $Area$ površina podporečja (km^2),

- q_{peak} konica pretoka (m^3/s),
- 3.6 faktor pretvorbe enot.

Da bi določili linearne parametre kanalom različnih dimenzij, so potrebni parametri za enoto kanala.

Enotni kanal je definiran kot kanal dolžine $L = 1\text{ km}$ in širine $W = 1\text{ m}$.

Parametri enotnega kanala so:

$$k_r = -2.22 \cdot \ln \left[1 - 2.6466 \cdot \frac{K_{ch} \cdot dur_{flw}}{vol_{Qsurf,i}} \right] \quad (40)$$

$$a_r = -0.2258 \cdot K_{ch} \cdot dur_{flw} \quad (41)$$

$$b_r = \exp[-0.4905 \cdot k_r] \quad (42)$$

Kjer je:

- k_r faktor padanja ($m^{-1} km^{-1}$),
- a_r parameter linearne funkcije (začetna vrednost) za enotni kanal (m^3),
- b_r smerni koeficient linearne funkcije za enotni kanal,
- K_{ch} efektivna hidravlična prevodnost naplavin v strugi (mm/h),
- dur_{flw} trajanje odtoka (h),
- $vol_{Qsurf,i}$ (m^3) začetni volumen odtoka (m^3).

Parametra linearne funkcije sta:

$$b_x = \exp[-k_r \cdot L \cdot W] \quad (43)$$

$$a_x = \frac{a_r}{(1-b_r)} \cdot (1 - b_x) \quad (44)$$

Kjer je:

- a_x parameter linearne funkcije (začetna vrednost) za kanal dolžine L in širine W (m^3),
- b_x smerni koeficient linearne funkcije za kanal dolžine L in širine W ,
- k_r faktor padanja ($m^{-1} km^{-1}$),
- L dolžina kanala od najbolj oddaljene točke podporečja do iztočnega profila (km),
- W povprečna širina toka oz. širina kanala (m),
- a_r parameter linearne funkcije (začetna vrednost) za enotni kanal (m^3),
- b_r smerni koeficient linearne funkcije za enotni kanal.

Za izgube v prenosu površinskega odтока, se predvideva da pronicajo v nižji vodonosnik.

3 OPIS OBRAVNAVANEGA OBMOČJA

3.1 Uvod

Porečje vodotoka Glinščice, leži v osrednjem delu Slovenije in obsega Šentvid, Dravlje, Šiško, Rožnik in Rožno dolino. Glavni pritok Glinščice je Pržanec, čigar povirje sega v pobočje Velike trate in Male trate in odvaja vodo s pretežno ravninskega dela vzhodno od Glinščice. Glinščica je levi pritok Gradaščice iz izvira pod severovzhodnimi obronki Toškega čela in pri Podutiku preide v ravninski del Ljubljanske kotline.

Relief porečja je raznolik, gričevnat del na vzhodu in ravninski del na jugu. Porečje Glinščice na severu sega v pobočje Toškega čela in Črnega vrha, razvodnica na vzhodu poteka skozi urbano območje Ljubljane (Dravlje, Šiška), preko Šišenskega hriba in Rožnika do izliva v Gradaščico, ki je tudi iztok iz porečja in njegov najjužnejši del. Padavinsko prispevno območje obsega 17.4 km². Skupno prispevno območje Glinščice pa je nekoliko večje in zajema 19.3 km² površine (Rusjan in sod., 2003).

Obravnava območja je bilo določeno z digitalnim modelom višin, ločljivosti 5 m in avtomatskim določevanjem razvodnice v programu MapWindow.

Večino zemeljske površine zgornjega dela porečja je prekrivane z gozdom. Zaradi majhne površine in strmega terena, se odtok iz zgornjega dela porečja skoncentrira v dokaj kratkem času in se zbira v več manjših pritokih, ki napajajo Glinščico in Pržanec. Po podatkih o kategorizaciji vodotokov, ki so dostopni na spletnem naravovarstvenem atlasu na spletni strani Agencije RS za okolje (ARSO, 2011), je zgornji del Glinščice in Pržanca, klasificiran kot naravni do sonaravno urejen vodotok.

Za razliko od zgornjega dela porečja, je osrednji del porečja (Glinca, Dolince, Kamna Gorica, Pržan, Podgora, Dravlje, Koseze in Podutik) v večji meri urbaniziran. Vodotoka sta v tem delu sonaravno do tehnično klasificirana. Na dveh krajših odsekih Glinščice in enem odseku Pržanca med Podutikom in Kosezami, je vodotok reguliran togo (slika 9). Ostalo območje, ki ni urbanizirano, je v večini namenjeno kmetijski rabi in sicer pašnikom, travnikom za košnjo in sadovnjakom. Na zahodnem robu se porečje zaključuje z gozdom.

Na območju, kjer se Pržanec priključi Glinščici je vodotok urejen togo. Korito Pržanca je naravno, podlaga je sestavljena iz prepelega površinskega sloja in glinovcev. Glinščica pot nadaljuje mimo Biološkega središča do izliva v Gradaščico, ki predstavlja najjužnejšo točko porečja. Dno struge na

tem delu je tlakovano. Globina betonskega korita je 25 cm, širina pa 103 cm. Struga se nato razširi v trapezno obliko, katere prečni prerez ima dimenzije 50 cm višine in 255 cm širine (Škrbec, 2005).

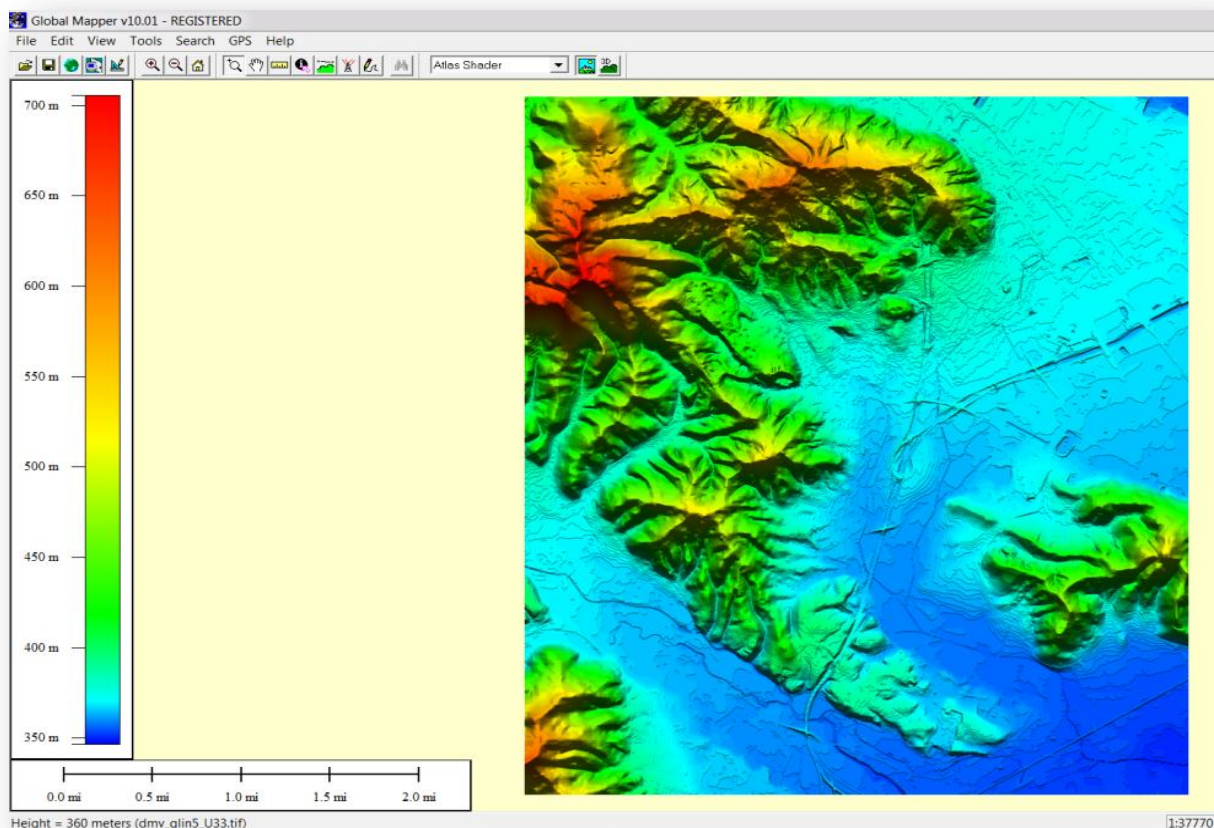


Slika 9: Togo urejen vodotok, pri Koseškem bajerju (foto: Miha Kovačec)

3.2 Topografija

Topografska slika porečja je sestavljena iz ravninskega dela v smeri sever - jug in gričevnatega dela na vzhodu in zahodu (slika 10). Relief porečja je zelo raznolik in obsega tako ravnice, kot tudi strma

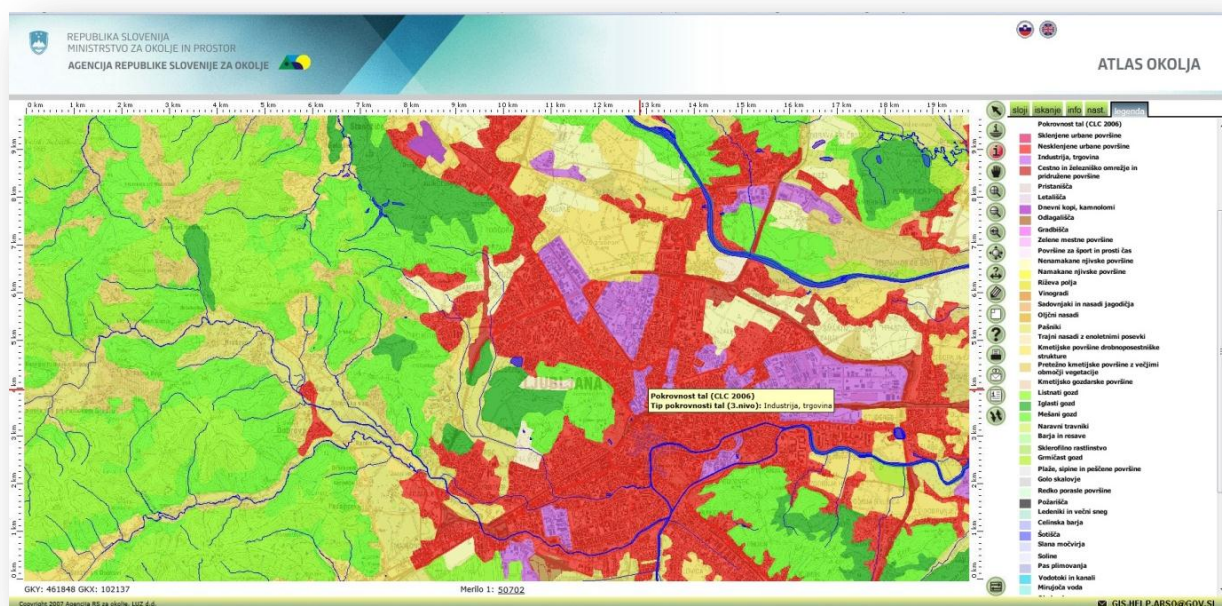
povirna območja. Za območje so značilni še raznolika vegetacijska odeja, kamninska zgradba in deleži nepropustnih površin. Največja urbanizirana območja se nahajajo na vzhodnem in južnem delu porečja (Rusjan, 2003). Naravna struga Glinščice je bila izravnana in delno kanalizirana. Omenjeni dejavniki in gospodarjenje z zemljišči vodnega in obvodnega prostora ima vpliv na vzorce odtoka s porečja.



Slika 10: Topografija območja (prikaz nadmorskih višin s programom Global Mapper 10)

3.3 Raba tal

Raba tal je bila določena z bazo podatkov Corine 2000 (CLC, 2000), spletnim Atlasom okolja (2011) (slika 11), Geopedie (2011) in opazovanja obravnavanega območja na terenu.



Slika 11: Pokrovnost tal (Atlas okolja, 2011)

Urbanizirana območja se nahajajo na jugu, severo-vzhodu ter osrednjem delu območja in predstavljajo dele naselij Rožna dolina, Koseze, Podutik in Šiška. Na skrajnem severu in na območju Šišenskega hriba je prisoten iglasti gozd, medtem ko na severo-vzhodnem delu območja, raste na manjšem območju listnati gozd. Na ostalih gozdnatih površinah, ki so v večji meri prisotne na severu, zahodu in jugo-vzhodu pa uspeva mešani gozd. Severo-vzhodni in južni del Šišenskega hriba s parkom Tivoli, je klasificiran kot športna oz. rekreacijska površina. V osrednjem delu območja poteka obvoznica do Šentviškega predora. Z izvozom Ljubljana - Podutik je ta del obravnavan kot cestno in železniško omrežje. V okolici obvoznice v osrednjem delu območja in na severnem delu, kjer so še vedno prisotne posamezne kmetije, so površine v veliki meri namenjene kmetijski rabi, in sicer pašnikom, nenamakanim njivskim površinam in sadovnjakom (slika 12).



Slika 12: Pašnik na območju Podutika (foto: Miha Kovačec)

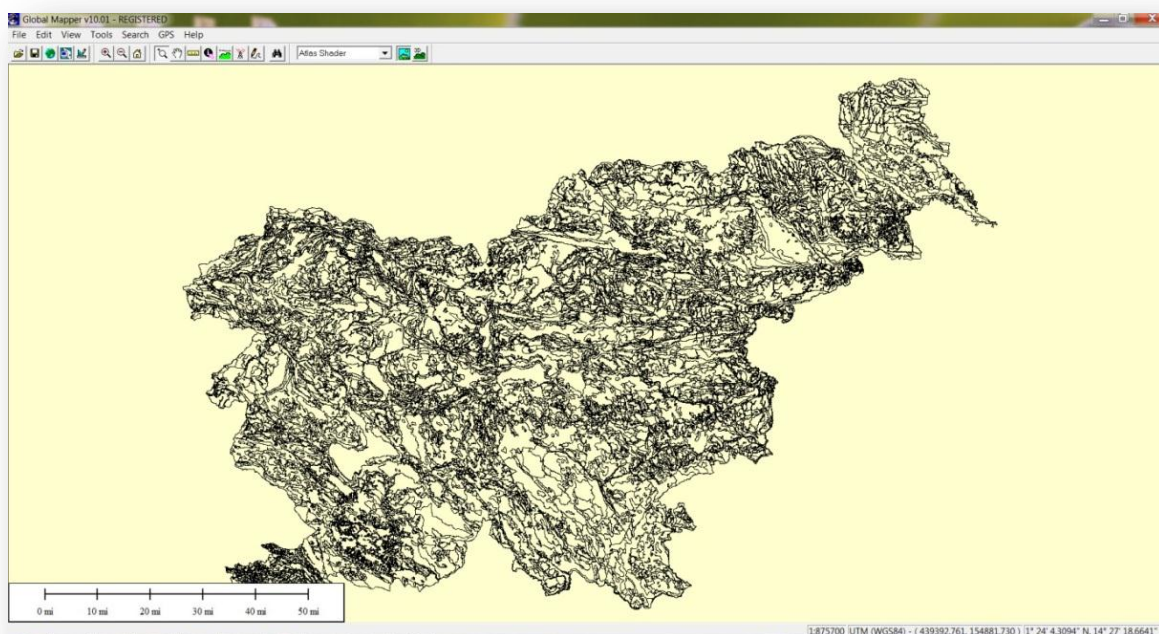
3.4 Pedologija

V pedološki študiji (Stepančič in sod. 1982), ki zajema 12.5 hektarjev veliko območje med potokom Glinščica in južnim odvodnim kanalom so ugotovili, da matično podlago območja tvori aluvialna naplavina Glinščice, ki prekriva starejšo pleistocensko usedlino. V plasteh 50 do 100 cm pod površjem se pojavljajo plasti peska in proda, gornji površinski del pa sestavlja meljasto glinasto ilovnat material. Tla spadajo v razred hidromorfoloških tal in sicer v skupino karbonatnih glejev. Prevladujoča pedosistematska enota so karbonatna, zmerno oglejena tla z izraženim površinskim oglejevanjem. Tla so v precejšni meri skeletna. Morfološko so tla sestavljena iz A-g-Go-Gr horizontov. Horizont g označuje cono, v kateri se zadržuje padavinska (površinska) voda, horizonta Go in Gr pa označujeta dominacijo talne vode (Stepančič in sod., 1982).

Teksturni sestav vpliva na to, da so tla slabo strukturirana in slabo prepustna. Po mehničnem sestavu tla spadajo v meljasto ilovico, v globljih horizontih tudi glinasto ilovico. Delež melja je v teh tleh v večini primerov precej visok, glina pa je zastopana v zmerni količini.

Površinska voda, ki se ob večjih padavinah ne odcedi pravočasno, se dalj časa zadržuje v površinskem delu tal (Stepančič in sod., 1982).

Digitalna pedološka karta (1:25 000) je dostopna na spletnih straneh MKGP (Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano, 2011). Karta je sestavljena iz pedokartografskih enot (v nadaljevanju PKE), ki so osnovna kartografska enota pedološke karte (slika 13). PKE je sestavljena iz ene ali več pedosistematskih enot (v nadaljevanju PSE), ki v naravi značilno nastopajo skupaj in jih zaradi merila karte ni mogoče ločeno prikazati. PSE je enota tal v določenem sistemu klasifikacije z značilnimi lastnostmi, ki se bistveno razlikujejo od drugih tal. PKE tako sestavljajo do tri PSE, njihova zastopanost v skupni površini pa je opredeljena s %. Inkluzija je tip tal v okviru PKE, ki se pri pregledu terena le redko pojavijo, vendar je ta pojavnost dovolj pogosta, da jih je potrebno upoštevati.



Slika 13: Digitalna pedološka karta 1:25 000 (Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano, 2011)

3.4.1 Atributni podatki PKE

Atributni podatki in sestava pedokartografskih enot PKE, ki smo jih za potrebe naloge pridobili iz ICPVO (2011) so navedeni v preglednici 3. V stolpcu »Ime PKE« so po vrstnem redu opredeljene pedosistematske enote PSE, ki sestavljajo posamezno PKE, njihovo zastopanost v % in inkluzije.

Preglednica 3: Ime PKE, zastopanost PSE v % in inkluzije (ICPVO, 2011)

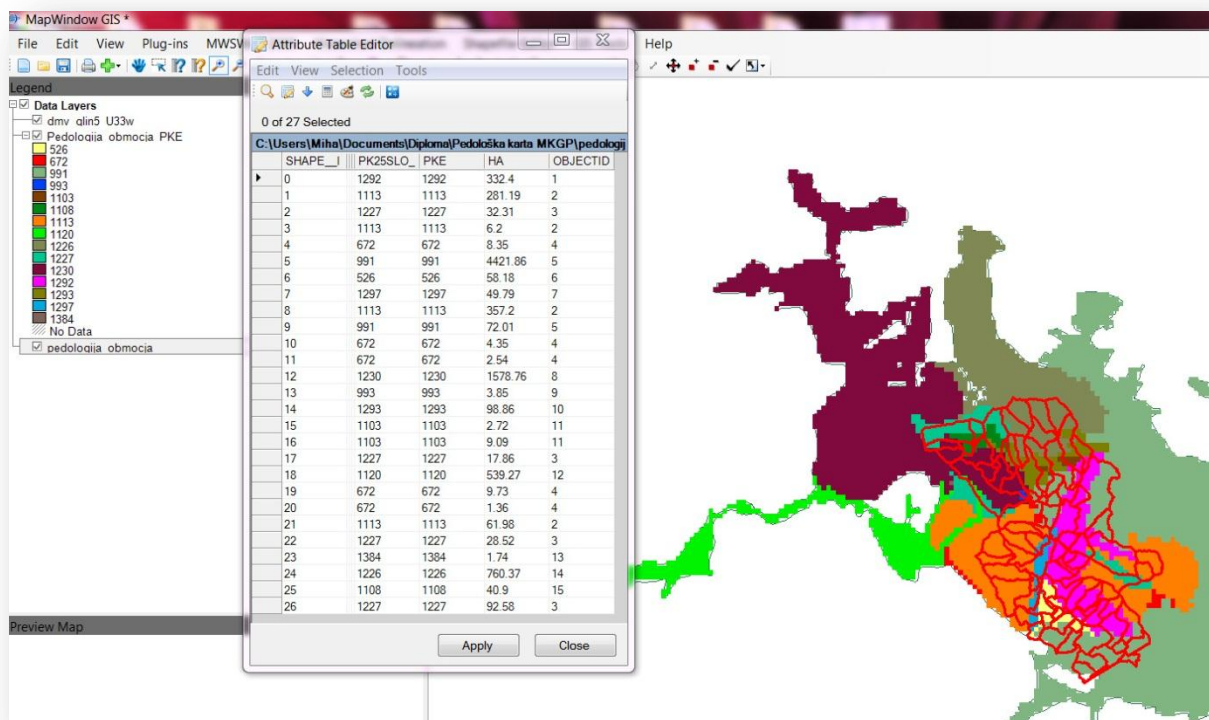
PKE	Ime PKE
526	Psevdoglej, pobočni, distričen, srednje globok 100%
672	Distrična rjava tla, na deluviju, koluvialna 100%
991	Urbana površina, mesto, naselje, tlakovane površine 100%
993	Kamnlom, odprti kamnolomi 100%
1103	Rendzina na apnencu in dolomitu, prhninasta 50%; rendzina na apnencu in dolomitu, sprsteninasta 50 %; inkluzije: rendzina, na apnencu in dolomitu, rjava
1108	Evtrična rjava tla na vezanih klastičnih pelitskih in psamitskih kamninah, tipična 70%; distrična rjava tla, na vezanih klastičnih kamninah, tipična 20%; evtrična rjava tla, na mešanih karbonatnih in nekarbonatnih kamninah, tipična 10%; inkluzije: ranker
1113	Distrična rjava tla, na permo-karbonskih skrilavcih in peščenjakih, tipična 80%; ranker, distričen, erozijski 20%; inkluzije: distrična rjava tla, na permo-karbonskih skrilavcih in peščenjakih, izprana
1120	Obrečna tla, evtrična, srednje globoka 50%; obrečna tla, evtrična, zmerno oglejena 30%; obrečna tla, evtrična, globoka 20%; inkluzije: hipoglej, evtričen, mineralen
1226	Distrična rjava tla, na permo-karbonskih skrilavcih in peščenjakih, tipična 60%; ranker, distričen, regolitični 40%
1227	Distrična rjava tla, na grodenskih peščenjakih, tipična 80%; ranker, distričen, erozijski 20%; inkluzije: izprana tla (luvisol), na silikatnih substratih, tipična
1230	Rjava pokarbonatna tla, na apnencu in dolomitu, tipična 80%; rendzina, na apnencu in dolomitu, sprsteninasta 20%
1292	Amfiglej, evtričen, mineralen, srednje močan 60%; psevdoglej, ravninski, evtričen, srednje globok, srednje izražen 30%; obrečna tla, evtrična, zmerno oglejena, na ilovnatem aluviju 10%

se nadaljuje...

...nadaljevanje preglednice 3

1293	Pseudoglej, ravninski, evtričen, srednje globok 60%; obrečna tla, evtrična, zmerno oglejena, na ilovnatem aluviju 40%
1297	Distrična rjava tla, na deluviju, koluvialna 100%; inkluzije: hipoglej, distričen, pobočni
1384	Rendzina na apnencu, prhninasta 80%; Rendzina na apnencu in dolomitu, prhninasta 20%; inkluzije: rjava pokarbonatna tla, na apnencu in dolomitu, tipična

Slika 14 prikazuje prispevno območje Glinščice in PKE, ki so na prispevnem območju zastopane in so označene z različnimi barvami. Potrebne PKE smo pridobili iz pedološke karte Slovenije (slika 13). Velikost posamezne PKE v ha je zapisana v atributni tabeli na sliki 14.



Slika 14: PKE in njihova velikost na prispevnem območju Glinščice

Preglednica 4 vsebuje povprečne lastnosti PKE. Te so določene sintetično na podlagi ovrednotenja lastnosti PSE in % PSE ter predstavljajo le dober, merilu kartiranja ustrezen približek.

Preglednica 4: Povprečne lastnosti PKE (ICPVO, 2012)

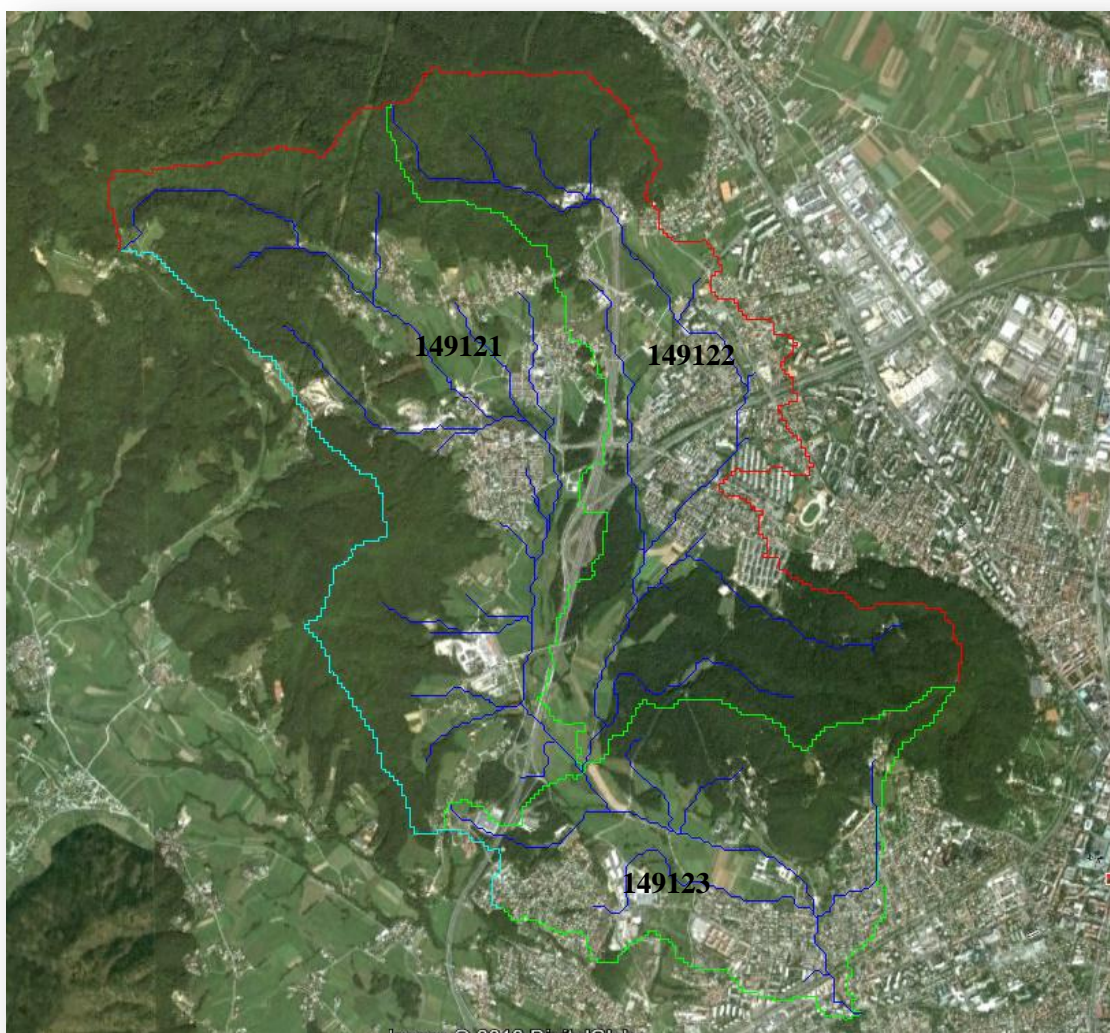
PKE	Tekstura	Povprečna globina tal	Organska snov zgornjega horizonta	Organska snov spodnjega horizonta	Efektivna poljska kapaciteta tal (mm)
526	srednje težka do težka tla	> 70 cm	srednje humozen, 2 - 4 %	mineralen	135
672	srednje težka tla	> 70 cm	srednje humozen, 2 - 4 %	malo humozen	207
991	ni mogoče določiti	ni mogoče določiti	ni mogoče določiti	/	ni mogoče določiti
993	ni mogoče določiti	ni mogoče določiti	ni mogoče določiti	/	ni mogoče določiti
1103	Lahka do srednje težka tla	večji razpon	zelo močno humozen, 15 - 30 %	/	27
1108	srednje težka tla	0 - 70 cm	srednje humozen, 2 - 4 %	mineralen	101
1113	srednje težka tla	večji razpon	srednje humozen, 2 - 4 %	mineralen	94
1120	lahka do srednje težka tla	0 - 50cm	srednje humozen, 2 - 4 %	malo humozen	144
1226	srednje težka tla	večji razpon	srednje humozen, 2 - 4 %	mineralen	77
1227	srednje težka tla	večji razpon	srednje humozen, 2 - 4 %	mineralen	74
1230	težka tla	večji razpon	srednje humozen, 2 - 4 %	malo humozen	75
1292	težka tla	> 70 cm	humozen, 4 - 10 %	malo humozen	135
1293	srednje težka do težka tla	> 70 cm	srednje humozen, 2 - 4 %	mineralen	157
1297	srednje težka tla	> 70 cm	srednje humozen, 2 - 4 %	malo humozen	207
1384	ni mogoče določiti	< 30 cm	organski, > 30 %	/	31

3.5 Podnebje in hidrologija

Porečje Glinščice ima zmerno celinsko podnebje osrednje Slovenije. Srednja letna temperatura v Ljubljani je 10.3 °C (obdobje meritev 1961-2008). Značilen je celinski padavinski režim, povprečna letna količina padavin je 1374 mm (obdobje meritev 1961-2008). (ARSO, 2009).

3.5.1 Vodni viri in hidrologija

Porečje Glinščice je območje petega reda porečja Save s šifro 14912 (šifrant padavinskih območij Republike Slovenije). Sestavljajo ga tri podporečja in sicer prispevno območje glavnega toka (149121), prispevno območje Pržanca (149122) in prispevno območje od sotočja Glinščice in Pržanca do izliva v Mestno Gradaščico (149123) (slika 15).



Slika 15: Šifrant padavinskega območij (Šraj, 2000) in linije hidrografskih razvodnic na osnovi reliefnih značilnosti (prikazano v programu Google Earth)

Podatki o padavinah, so bili pridobljeni iz merske postaje Pržanec (KSH FGG), ki je locirana znotraj porečja Glinščice, ostali vremenski podatki, ki so prav tako potrebni vhodni podatek v model, pa so bili pridobljeni iz meteorološke postaje Ljubljana-Bežigrad (ARSO), ker je to edina postaja, ki meri sončno sevanje, relativno vlažnost in hitrost vetra. Podatki o padavinskih postajah so prikazani v preglednici 5. Koeficient korelacije med padavinskima postajama je 0,870 (Štajdohar, 2005).

Preglednica 5: Padavinske postaje

Merska postaja	Tip inštrumenta	Koordinate		Nadmorska višina (m)
		X	Y	
Lj. Bežigrad	Meteorološka postaja	462612.6800	5102581.0300	299
Pržanec	ONSET RG2-M	458471.6801	104859.3584	

4 IZDELAVA MODELA POVRŠINSKEGA ODTOKA S PROGRAMOM MWSWAT

4.1 Razmejitev porečja

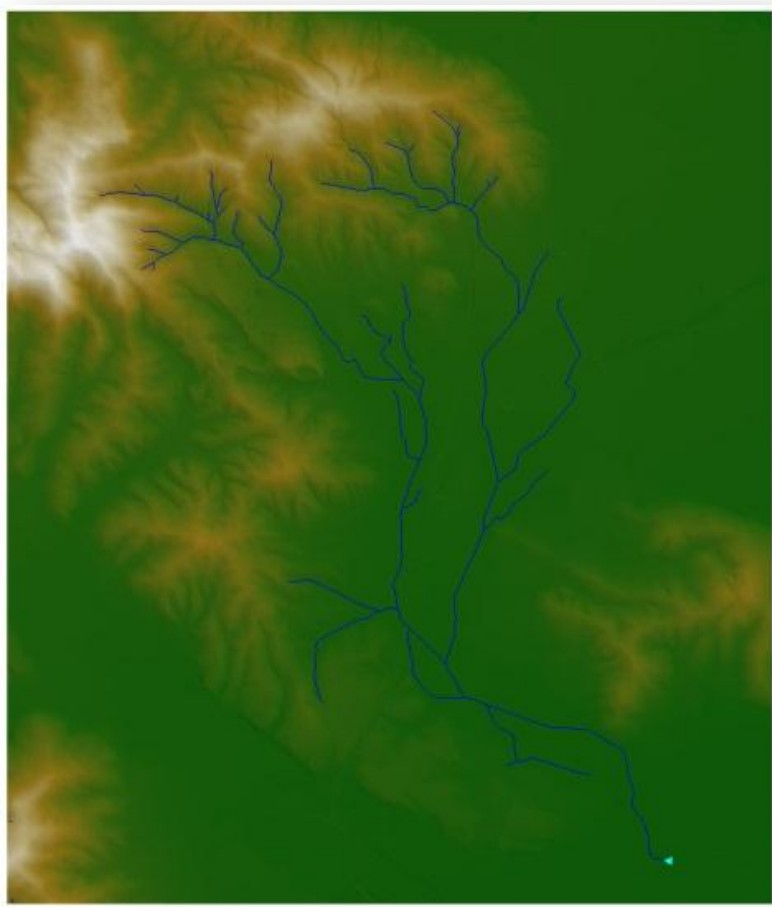
Namen razmejitve porečja (angl. *Watershed delination*), je umestitev toka vodotokov v prostor in določitev območij, ki drenirajo v območja dol-vodno. Odsek vodotoka je del med dvema sotočjema vodotokov, od izvira do sotočja ali od sotočja do iztoka iz porečja.

Razmejitev porečja, poteka v treh fazah (slike 16-18):

Nastavitve in obdelava: V program vnesem digitalni model višin in ga obdelamo. Na tem mestu, lahko, če imamo predhodno pripravljeno linijo vodotokov, le-to vnesemo v model in na ta način identificiramo potek vodotoka (slika 16).

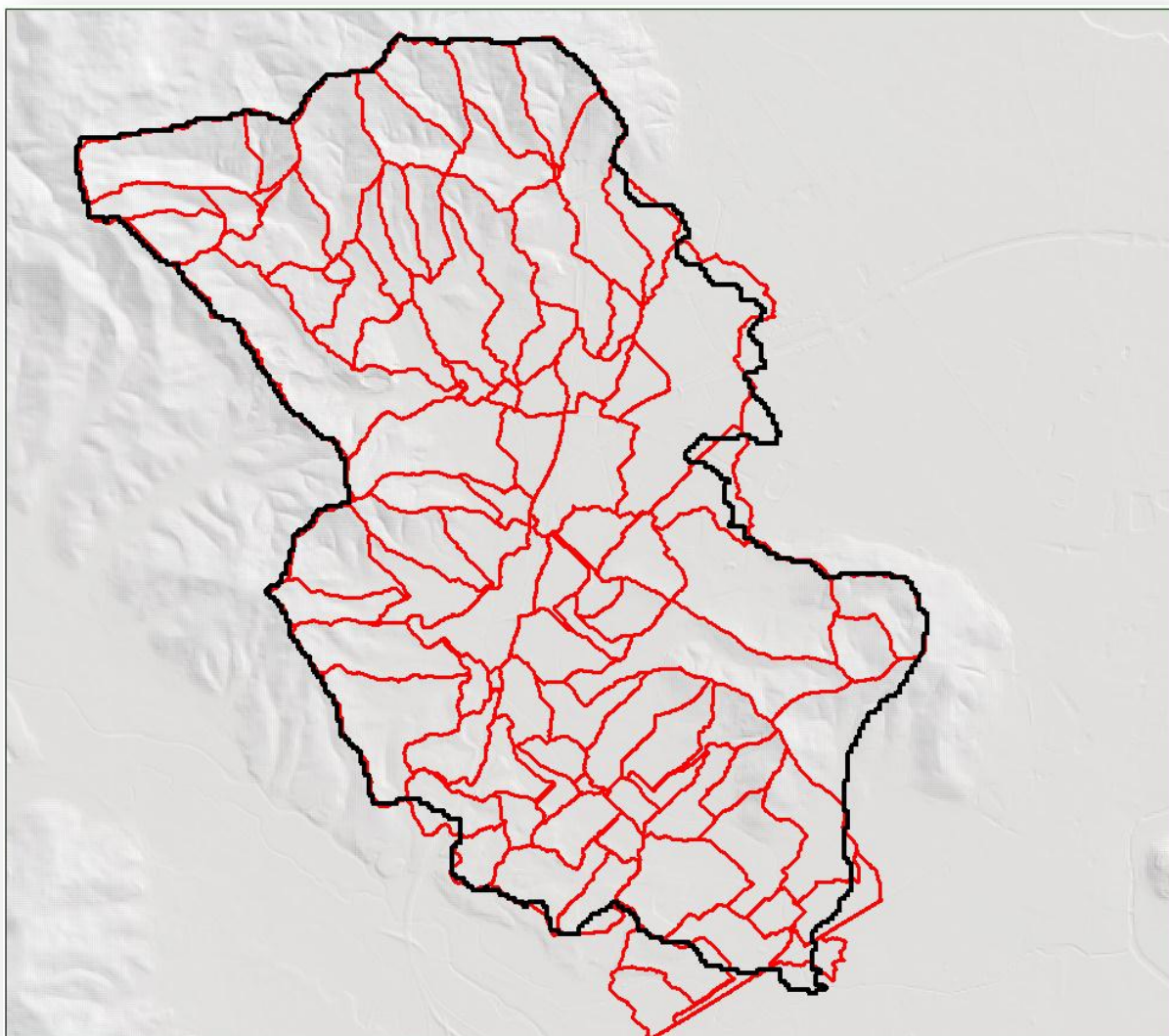
Določitev mreže vodotokov: Število odsekov v mreži vodotokov je določeno z mejno površino oz. številom celic v modelu višin, ki so potrebne za formiranje vodotoka. Manjše kot je število celic in površin, večja bo natančnost določevanja in več pritokov bo upoštevanih, večje bo število odsekov oz. podporečij. V diplomski nalogi je bilo porečje Glinščice razdeljeno na 95 podporečij (slika 17).

Določitev iztoka s porečja: V model lahko vnesemo pripravljeno točkovno datoteko s pripadajočimi koordinatami (iztok Glinščice v Gradaščico) ali pa iztok lociramo ročno, na digitalnem modelu višin (slika 16).



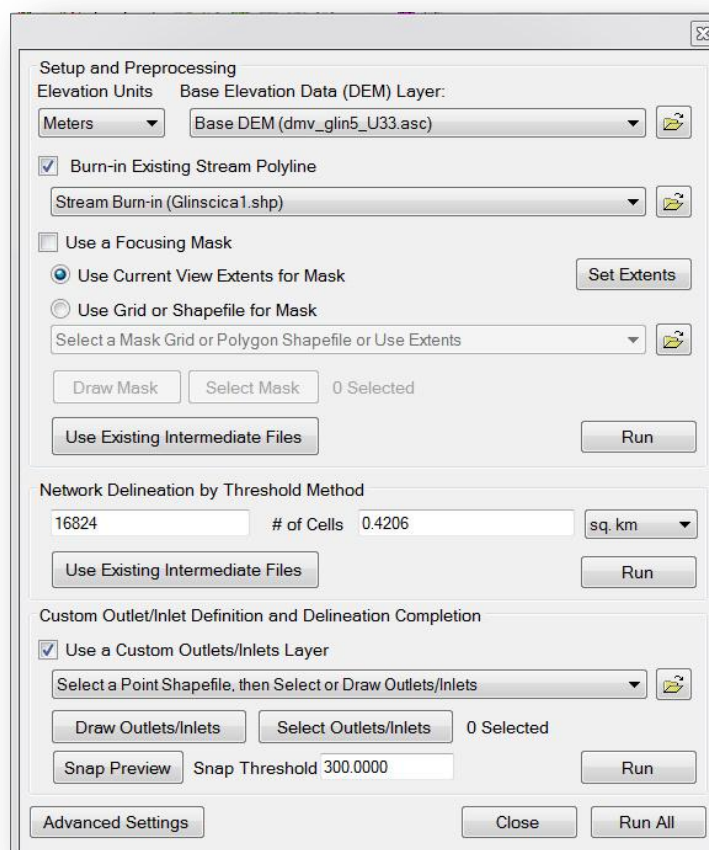
Slika 16: Vnos pripravljene linijske datoteke vodotoka in točkovne datoteke, ki predstavlja iztok

Linija hidrografske razvodnice šifrantnega porečja, ki je bila določena na osnovi reliefnih karakteristik in odvodnje meteornih voda v urbanih območjih (Šraj, 2000; Rusjan, 2003), nekoliko odstopa od razvodnice uporabljene v diplomski nalogi (slika 17). Uporabljena razvodnica je bila narejena z funkcijo »Automatic Watershed Delineation«, programa MapWindow na podlagi digitalnega modela višin ločljivosti 5 m in je bila za naše potrebe ustrežnejša od obstoječih hidrografskih razvodnic iz leta 2000. Razvodnica bolj natančno sledi topografiji terena in posledično ustrezneje določi prispevno območje vodotoka. Obliki sta dokaj podobni, le na južnem delu območja pride do malce večjih razlik, kjer uporabljena razvodnica upošteva območje do Tržaške ceste.



Slika 17: Primerjava med razvodnico iz šifranta in razvodnico narejeno z funkcijo »Automatic Watershed delineation« v programu MapWindow

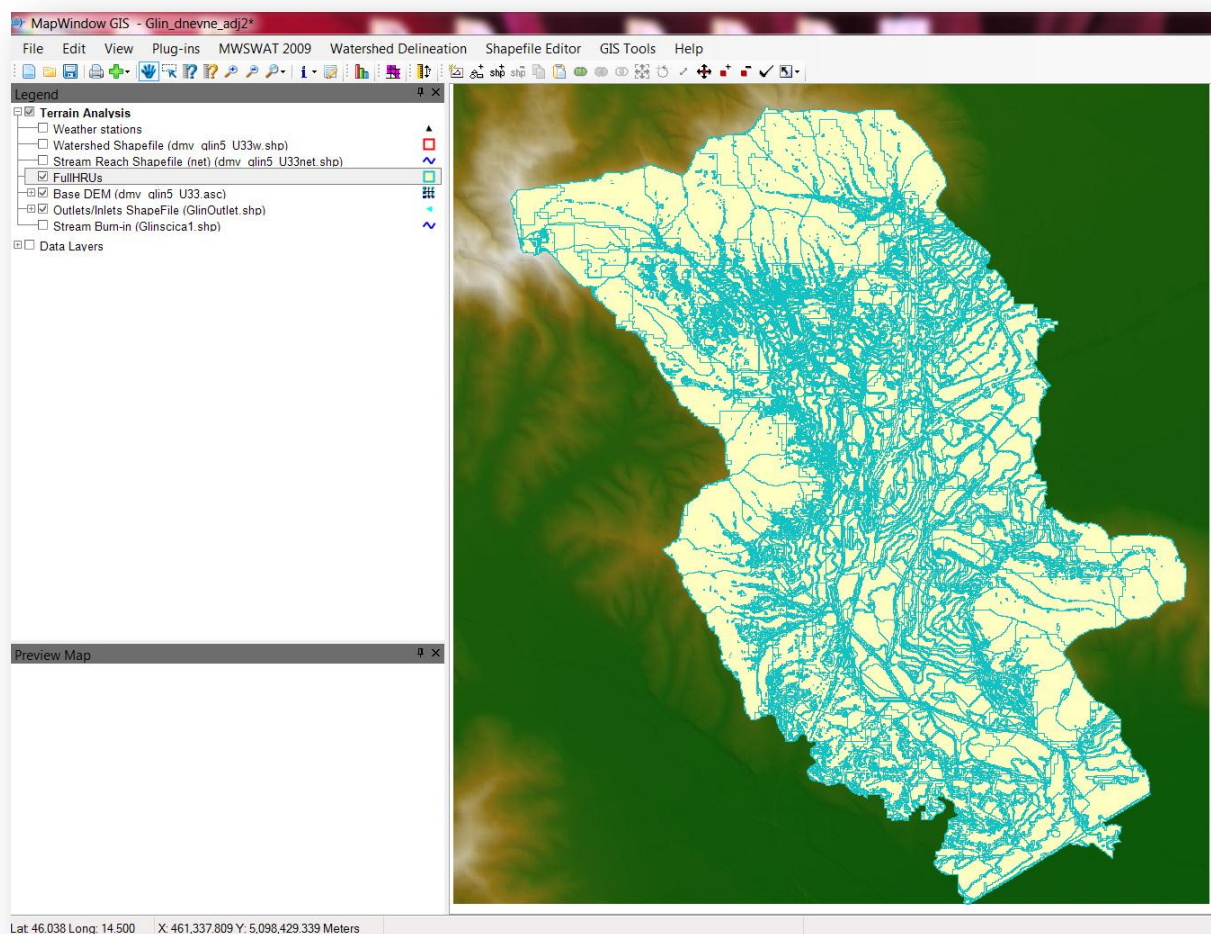
Število odsekov v mreži vodotokov je določeno z mejno površino oz. številom celic v modelu višin, ki so potrebne za oblikovanje vodotoka. Manjše kot je število celic in površin, večja bo natančnost določevanja, več pritokov bo upoštevanih in večje bo število odsekov oz. podporečij. V nalogi je bilo na območju določenih 95 odsekov oz. podporečij in 410 HRU (slike 17, 19 in 20).



Slika 18: Pogovorno okno »Automatic watershed delineation« za vnos digitalnega modela višin, razmejitev območja, določitev mreže vodotokov in iztoka

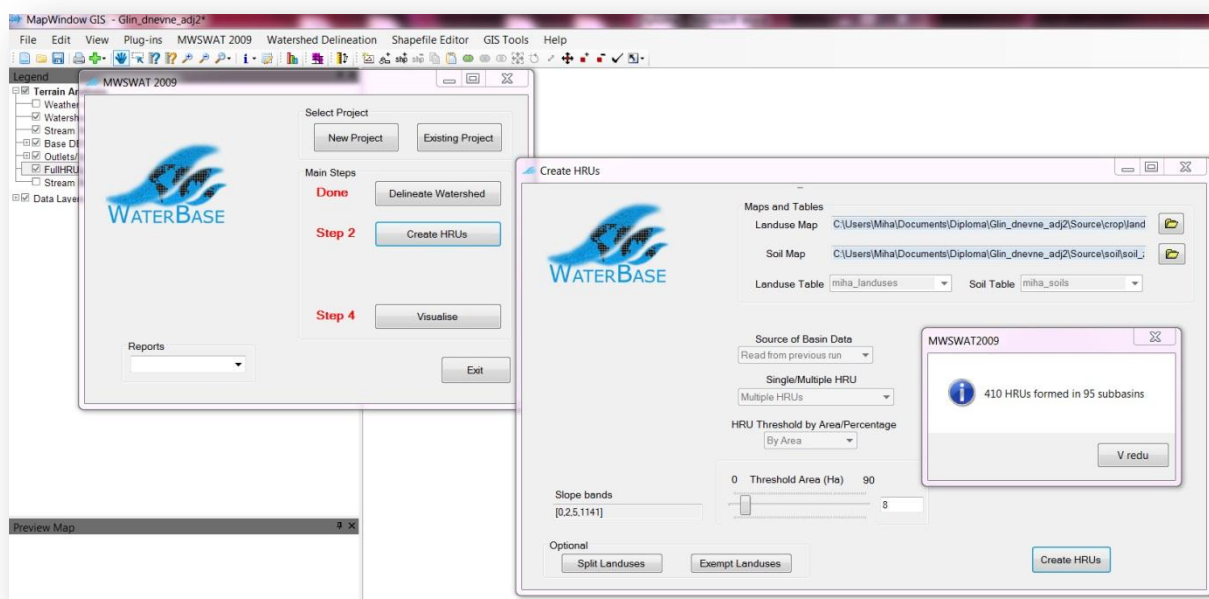
4.2 Določitev hidrološke odzivne enote HRU

SWAT uporablja hidrološko odzivno enoto (HRU) kot osnovno enoto za modeliranje. HRU so ustvarjene znotraj podporečja in vsaka izmed njih je kombinacija rabe tal, vrste zemljine in naklona. Lahko je tudi posamezno podporečje ena HRU (»Dominant HRU«), z enotno rabo tal, vrsto zemljine in naklonom. Po uspešno določenih podporečjih, je naslednji korak dodati informacije o rabi tal in tipih tal na območju.



Slika 19: Razdelitev porečja na posamezne HRU

Uporabnik lahko izbira med eno HRU (angl. *Dominant HRU*) ali več HRU (angl. *Multiple HRUs*). »Dominant HRU« pomeni, da je za vsako podporečje izbrana ena HRU, določena glede na prevladujočo rabo in tip tal, ki sta nato zastopana v celotnem podporečju, ostale rabe in tipe tal pa se zanemari. Pri izbiri »Multiple HRU«, pa uporabnik sam vnese mejno vrednost, katera ne sme biti presežena pri ustvarjanju HRU. Vrednost lahko poda v odstotkih, npr. če določena raba tal v podporečju ne presega 10 %, potem ta ne bo upoštevana, ali pa v površini, npr. HRU manjše od 5 ha bodo zanemarjene in to območje bo ustrezno porazdeljeno med ostale rabe in tipe tal. S pogovornim oknom »Ustvari HRU« (angl. *Create HRU*), vnesemo v model rastrske zapise rabe tal in tipov zemljine (slika 20). Številke, ki sestavljajo zapis, moramo povezati z ustreznimi šiframi rabe tal in imeni zemljine, ki smo jih dodali v podatkovno bazo programa v obliki Access tabel. Na sliki 19 je območje razdeljeno na 410 HRU, kolikor jih je bilo upoštevanih tudi pri simulacijah v nalogi.



Slika 20: Pogovorno okno za ustvarjanje HRU »Create HRU«

4.2.1 Vnos rabe tal

Potreben vhodni podatek v model, je raba tal oz. rastrski zapis rabe tal (slika 22). To je matrika števil, ki določajo na katerem območju se nahaja določena raba. Ko v SWAT-u izberemo, s katero vrednostjo iz tabele v podatkovni bazi želimo povezati posamezno številko, se iz baze podatkov prebere ustrezno kodo rabe tal, ki je dodeljena določenemu območju. Za vsako kodo oz. rabo tal posebej, obstajajo značilnosti, zapisane v dveh datotekah (*crop.dat*, *urban.dat*), ki določajo značilnosti posameznega območja (slika 21)

Datoteka	Uredi	Oblika	Pogled	Pomoč
1	AGRL	4		
33.50	0.45	3.00	0.15	0.05 0.50 0.95 0.64 1.00 2.00
30.00	11.00	0.0199	0.0032	0.0440 0.0164 0.0128 0.0060 0.0022 0.0018
0.250	0.2000	0.0050	4.00	0.750 8.50 660.00 36.00 0.0500 0.000
0.000	0	0.00	0.650	0.100
2	AGRR	4		
39.00	0.50	3.00	0.15	0.05 0.50 0.95 0.70 2.50 2.00
25.00	8.00	0.0140	0.0016	0.0470 0.0177 0.0138 0.0048 0.0018 0.0014
0.300	0.2000	0.0070	4.00	0.750 7.20 660.00 45.00 0.0500 0.000
0.000	0	0.00	0.650	0.100
3	AGRC	5		
30.00	0.40	4.00	0.05	0.05 0.45 0.95 0.50 0.90 1.30
18.00	0.00	0.0250	0.0022	0.0663 0.0255 0.0148 0.0053 0.0020 0.0012
0.200	0.0300	0.0060	4.00	0.750 6.00 660.00 39.00 0.0500 0.000
0.000	0	0.00	0.650	0.100

Slika 21: Datoteka z značilnostmi površja tal (*crop.dat*)

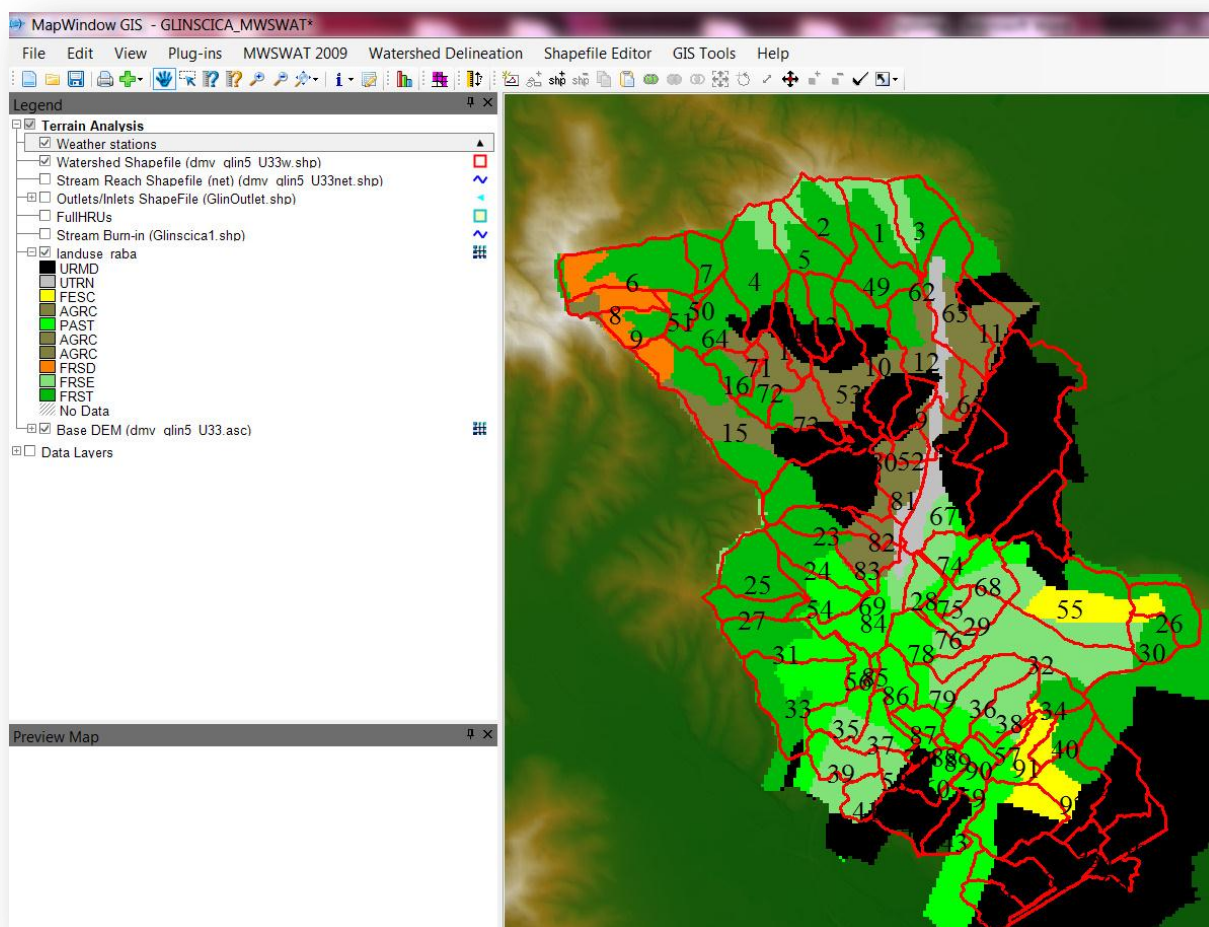
Območje je lahko definirano zelo natančno, saj model vključuje veliko število spremenljivk rastlin, njihovi rasti, površini listov, globini korenin, biomasi, donosu pridelka, vnosa hranil, itd. Tudi pri urbanih površinah je upoštevano zelo veliko spremenljivk in dejavnikov, ki vplivajo na površinski odtok (površina nepropustne površine, koeficient spiranja, itd.). Možen je vnos zadrževalnikov, večjih vodnih površin, rekreacijskih površin, poudarek pa je na kmetijski rabi tal, saj lahko izbiramo med zelo velikim številom posevkov, ki imajo različne setvene lastnosti, količine donosov, za rast optimalno temperaturo, možno je vključiti namakanje, gnojenje in cikle kolobarjenja.

V preglednici 6 je prikazana korelacija med Corine klasifikacijo rabe tal in klasifikacijo rabe tal v SWAT-u (Glavan, 2007).

Preglednica 6: Korelacija med Corine klasifikacijo rabe tal in klasifikacijo rabe tal v SWAT-u

CORINE KODA	SWAT KODA
112 Nesklenjene urbane površine	URMD Discontinuous urban fabric
122 Cestno in železniško omrežje	UTRN Transportation (highway roads)
142 Površine za šport in prosti čas	FESC Sport and leisure (Park and recreational facilities)
211 Nenamakane njivske površine	AGRC Non irrigated arable land
231 Pašniki	PAST Pasture
242 Kmetijske površine drobno posestniške strukture	AGRC Complex cultivation patterns
243 Pretežno kmetijske površine z večjimi območji vegetacije	AGRC Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation
311 Listnati gozd	FRSD Broadleaved forest
312 Iglasti gozd	FRSE Coniferous forest (Evergreen)
313 Mešani gozd	FRST Mixed forest

Šifre rabe tal Corine se razlikujejo od SWAT-ovih, zato je bilo potrebno posamezni šifri iz Corine, najti ustrezno šifro v SWAT-u. Nekatera kmetijska območja iz Corine so bila v obravnavanem primeru združena v eno območje, definirano v SWAT-u (211, 242, 243 so AGRC). Na sliki 22 je prikazan vnos rabe tal v območje.



Slika 22: Rastrski zapis rabe tal na območju

4.2.2 Vnos pedoloških tipov

Podatki o talnih tipih, ki jih za simulacijo zahteva SWAT, niso javno dostopni, zato jih je bilo potrebno naročiti. V Sloveniji izvajajo meritve in skrbijo za podatke na Biotehniški fakulteti na Infrastrukturnemu centru za pedologijo in varstvo okolja (ICPVO, 2011). Na območju Glinščice se nahaja 15 PKE, ki jim je bilo potrebno določiti atributne vrednosti. Iz centra smo pridobili atributne podatke o povprečni vsebnosti organske snovi, zrnivosti oz. teksturi PKE, povprečni globini PKE in efektivni poljski kapaciteti tal (preglednici 3 in 4). Pri vnosu ostalih zahtevanih podatkov smo sodelovali z Infrastrukturnim centrom za pedologijo in varstvo okolja (Prus, 2012).

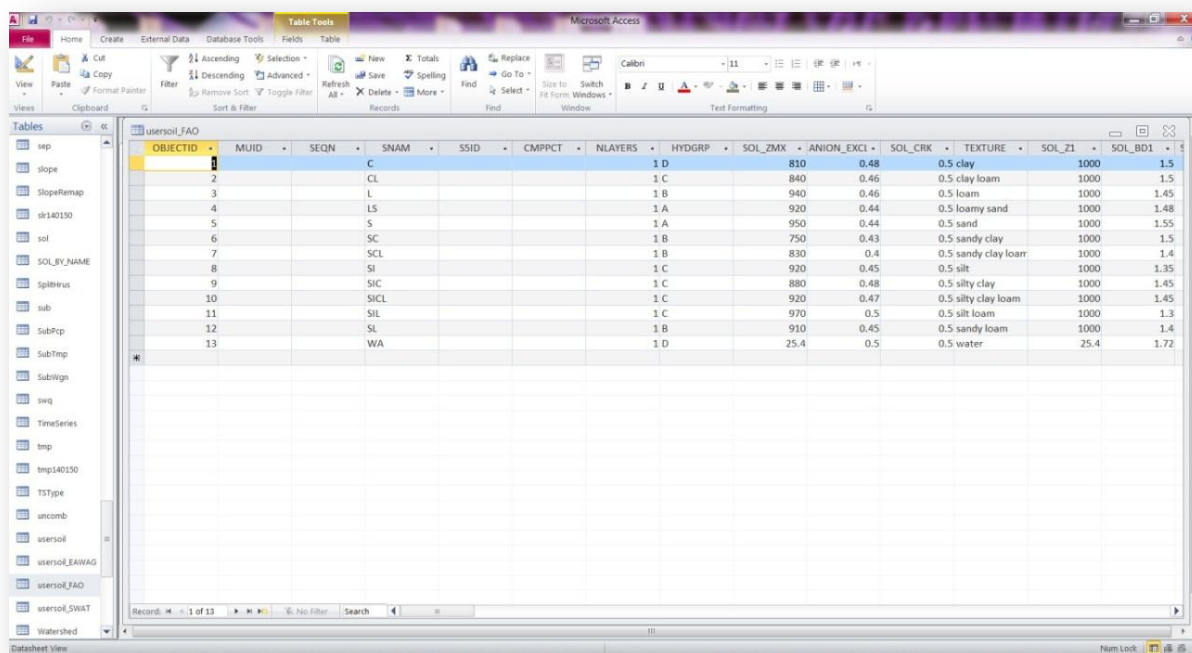
V preglednici 7, so navedeni atributni podatki, posameznega tipa tal, ki so potrebni za simulacijo v SWAT-u.

Preglednica 7: Potrebni vhodni podatki o talnih tipih

Oznaka		Opis / enota
HYDGRP	Hidrološka skupina zemljine	Glede na infiltracijske sposobnosti zemljine [mm/h]
SOL_ZMX	Maksimalna globina korenin	[mm/h]
SOL_Z	Globina sloja	[mm]
SOL_BD	Gostota	[g/cm ³]
SOL_AWC	Kapaciteta skladiščenja vode	[mm H ₂ O/mm zemljine]
SOL_K	Hidravlična prevodnost	[mm/h]
SOL_CBN	Delež organskega ogljika	[%]
SOL_CLAY	Delež gline	[%]
SOL_SILT	Delež melja	[%]
SOL_SAND	Delež peska	[%]
SOL_ROCK	Delež trdne kamnine	[%]
SOL_ALB	Odboj svetlobe	Vlažna zemljina oz. dosežena poljska kapaciteta
USLE_K	Faktor K, USLE enačbe	Erozivnost tal [(t m ² g)/(m ³ t cm)]

Baza tipov tal v SWAT-u je zelo obsežna in podatkovno zelo bogata. Lahko izbiramo med več klasifikacijami tipov tal, ki imajo zelo natančno določene posamezne horizonte in njihove attribute. Ker je SWAT ameriški model, je v bazi podatkov veliko ameriških tipov tal, ki z tlemi v Sloveniji niso združljivi, saj gre za konkretna imena po njihovi klasifikaciji.

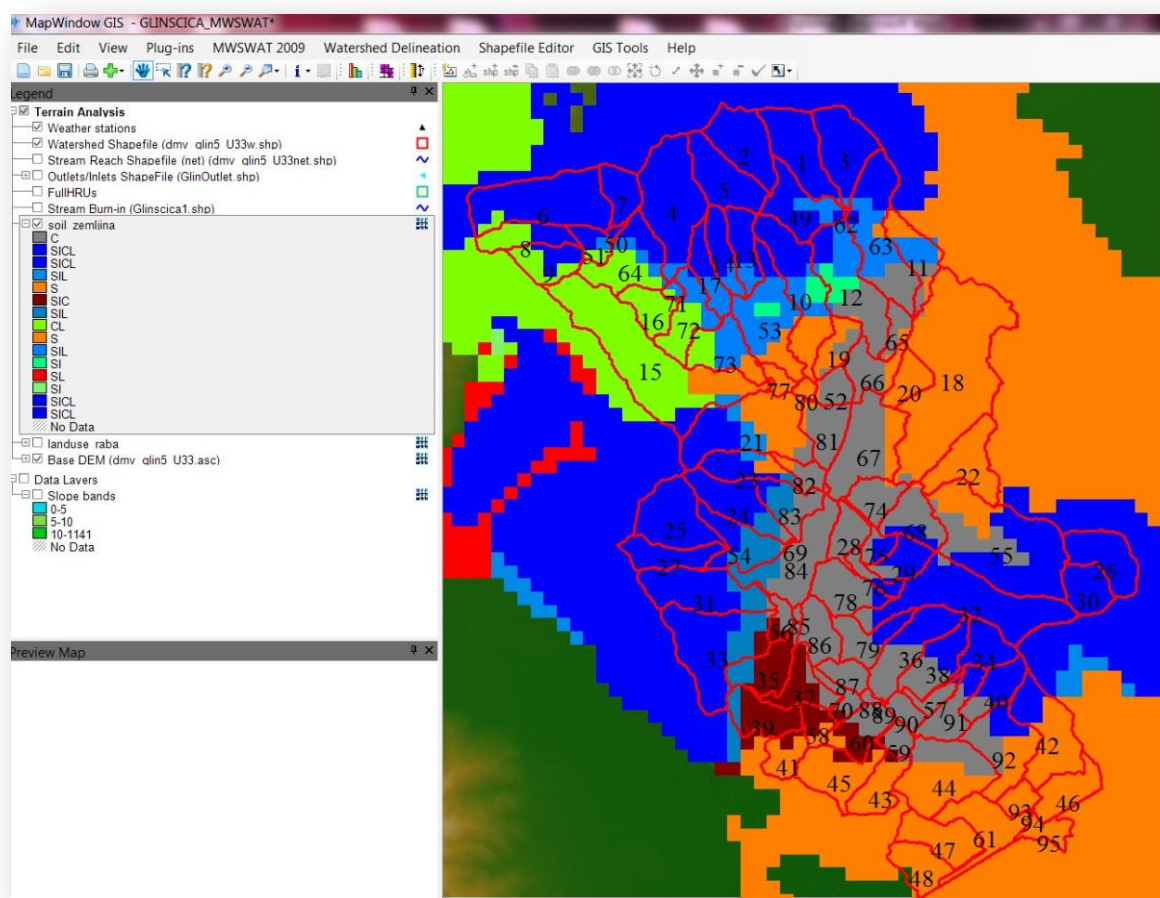
Glede na stopnjo opravljenih meritev in razpoložljivih podatkov v Sloveniji, smo za potrebe izračuna uporabili bolj splošno FAO (angl. *Food and Agriculture Organization*) klasifikacijo, ki tla razdeli na 13 tipov (slika 23) in tako smo PKE, ki se nahajajo na območju, razdelili v enega izmed tipov tal po FAO klasifikaciji.



OBJECTID	MUID	SEQN	SNAM	SSID	CMPPCT	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	SOL_CRK	TEXTURE	SOL_ZI	SOL_BD1
1			C			1 D		810	0.48		0.5 clay	1000	1.5
2			CL			1 C		840	0.46		0.5 clay loam	1000	1.5
3			L			1 B		940	0.46		0.5 loam	1000	1.45
4			LS			1 A		920	0.44		0.5 loamy sand	1000	1.48
5			S			1 A		950	0.44		0.5 sand	1000	1.55
6			SC			1 B		750	0.43		0.5 sandy clay	1000	1.5
7			SCL			1 B		830	0.4		0.5 sandy clay loam	1000	1.4
8			SI			1 C		920	0.45		0.5 silt	1000	1.35
9			SIC			1 C		880	0.48		0.5 silty clay	1000	1.45
10			SICL			1 C		920	0.47		0.5 silty clay loam	1000	1.45
11			SIL			1 C		970	0.5		0.5 silt loam	1000	1.3
12			SL			1 B		910	0.45		0.5 sandy loam	1000	1.4
13			WA			1 D		25.4	0.5		0.5 water	25.4	1.72

Slika 23: FAO klasifikacija talnih tipov v podatkovni bazi Access

Vnos talnih tipov v model je podoben vnosu rabe tal (slika 24). Iz digitalne pedološke karte Slovenije (slika 13) je bilo potrebno izvoziti poligone, ki v tem primeru predstavljajo PKE in sovpadajo z prispevnim območjem in jih spremeniti v rastrsko sliko. Matriko števil oz. rastrsko sliko smo povezali s tabelo v bazi podatkov v SWAT-u (slika 23), kjer so zapisani atributni podatki posameznega talnega tipa oz. PKE. Na območju, je bilo upoštevanih 15 PKE in 8 talnih tipov, ker imajo nekatere PKE enake značilnosti in so po FAO klasifikaciji uvrščene v isti razred.



Slika 24: Rastrski zapis talnih tipov (PKE) na območju

V preglednici 8 je prikazana korelacija med uporabljenimi PKE, kodami talnih tipov tal po FAO klasifikaciji in teksturi talnega tipa.

Preglednica 8: Korelacija med PKE in FAO klasifikacijo (Prus, 2012)

PKE - pedokartografska enota	Tekstura	Koda talnega tipa
672, 1293, 1297	Silt loam	SIL
526	Silty clay	SIC
991, 993	Sand	S
1103, 1384	Silt	SI
1108, 1113, 1226, 1227	Silty clay loam	SICL
1120	Sandy loam	SL
1230	Clay loam	CL
1292	Clay	C

4.3 Vnos vremenskih podatkov in zagon SWAT-a

4.3.1 Vremenski podatki

SWAT zahteva dnevne podatke o padavinah, maksimalni in minimalni temperaturi, sončnem sevanju, relativni vlažnosti in hitrosti vetra. Podatke lahko vnesemo z vhodno datoteko, ali pa jih generiramo z uporabo povprečnih mesečnih podatkov, pridobljenih v več letih.

Dnevni generator padavin je asimetrična Markova veriga (Nicks, 1974) ali model eksponentne Markove verige (Williams, 1995). Markova veriga prvega reda je uporabljena za definicijo dneva kot mokrega, ali suhega. Ko je ustvarjen moker dan, je uporabljena asimetrična ali eksponentna porazdelitev za generiranje količine padavin.

Padavine se v model vnašajo z vhodno datoteko *.txt* in sicer po točno določenem postopku. Vhodna datoteka mora vsebovati podatke o celotnem obravnavanem času, medtem ko ni potrebno, da se zapis začne z prvim dnevom simulacije. SWAT lahko sam poišče začetni in končni datum v datoteki, če je seveda datoteka pripravljena na pravi način (Kovačec, 2011).

Podatki o vremenskih postajah, na katerih so bili pridobljeni podatki o padavinah, temperaturi in ostalih spremenljivkah, so zapisani s *.txt* datoteko, v kateri mora biti opredeljena zemljepisna širina in dolžina ter nadmorska višina postaje in koda, po kateri se postajo identificira. V nalogi je bila uporabljena ena meteorološka postaja in sicer Ljubljana Bežigrad, ki ima zemljepisno širino 46.06 stopinje, zemljepisno dolžino 14.5 stopinje, nadmorsko višino 298 m in je označena s kodo 140150 ime datoteke pa je bilo *lj_bezigrad.txt*.

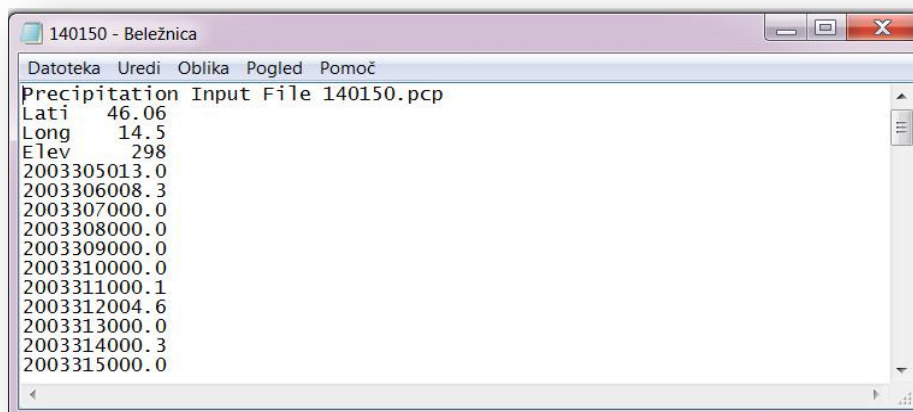
Spremenljivka PCPSIM v glavni datoteki prispevnega območja (*file.cio*) identificira uporabljeno metodo za pridobitev podatkov o padavinah. Za branje vnešenih podatkov, je spremenljivka nastavljena na vrednost 1 in tako so imena podatkov o padavinah in število meritev padavin shranjenih v datoteki, definirani. Za generiranje padavinskih vrednosti, pa je spremenljivka PCPSIM nastavljena na vrednost 2 (Neitsch in sod., 2009). V nalogo so bile padavine vnešene z pripravljeno datoteko in vremenski generator (*wgn*), ni bil upoštevan. Kljub temu da podatkov nismo generirali, je bilo potrebno v model vnesti datoteko s pravilno obliko, ki predstavlja vremenski generator, ker sistem v nasprotnem primeru ne dovoli nadaljevanja. Vrednosti so bile izmišljene, pomembna je bila samo pravilna oblika datoteke in ne njena vsebina. Omenjen primer se je izkazal za hibo v modelu, ki bi jo po našem mnenju bilo potrebno popraviti.

Zelo pomemben je pravi format datoteke o vremenskih podatkih in pravilen vrstni red navedenih podatkov v njej.

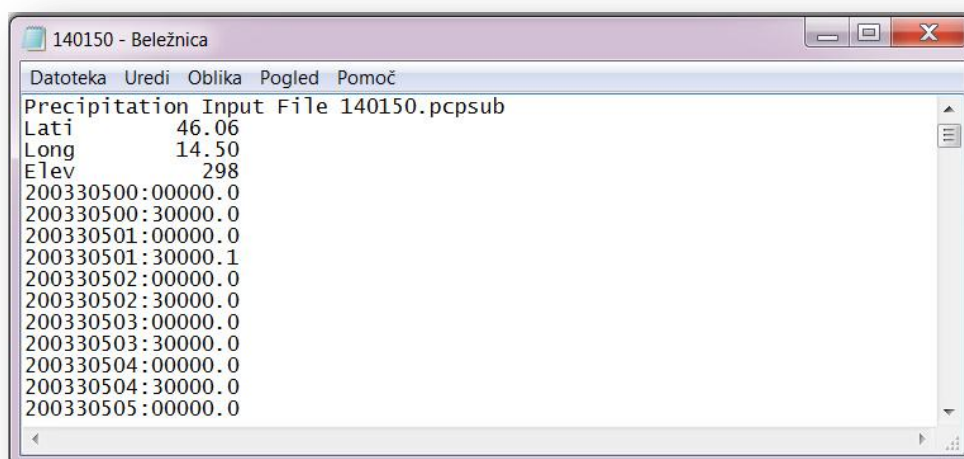
Za padavine je ustvarjena datoteka *.pcp* (npr. *140150.pcp*) v isti mapo kot datoteka podatkov o postajah (slika 25). Ostali vremenski podatki imajo svojo datoteko in sicer vnos temperature *.tmp* (*140150.tmp*), sončna radiacija *.slr*, relativna vlažnost *.hmd* in hitrost vetra *.wnd*.

Padavinski podatki v vhodni datoteki *.pcp* so sestavljeni iz opisa postaje (zemljepisna širina in dolžina ter nadmorska višina) in samih podatkov.

Naslednje vrstice imajo za vnos dnevnih padavin datume v julijanski obliki (4-mestno število za leta, ki mu sledi 3-mestno število dneva začeto z 1 končano z 365) v stolpcih 1-7. Sledijo podatki o padavinah v mm v obliki xxx.x. Pri vnosu 30-minutnih padavin, je datoteka nekoliko drugačna, saj mora vsebovati tudi 30-minutne intervale (slika 26). Če je vnesena vrednost -99.0, to pomeni, da razpoložljivih podatkov ni in se uporabi vremenski generator, ki v nalogi ni bil uporabljen. Meritve in simulacija se v našem primeru začnejo na dan 1. november 2003 in končajo 31. januarja 2004, torej sta začetni in končni datum v datoteki označena kot 2003305 in 2004031. Podatki o letu in datumu, morajo biti v vseh datotekah enaki in zapisani v istem zaporedju dni.



Slika 25: Vnos dnevnih padavin s *.txt* datoteko z začetkom 1. 11. 2003 (140150.pcp)

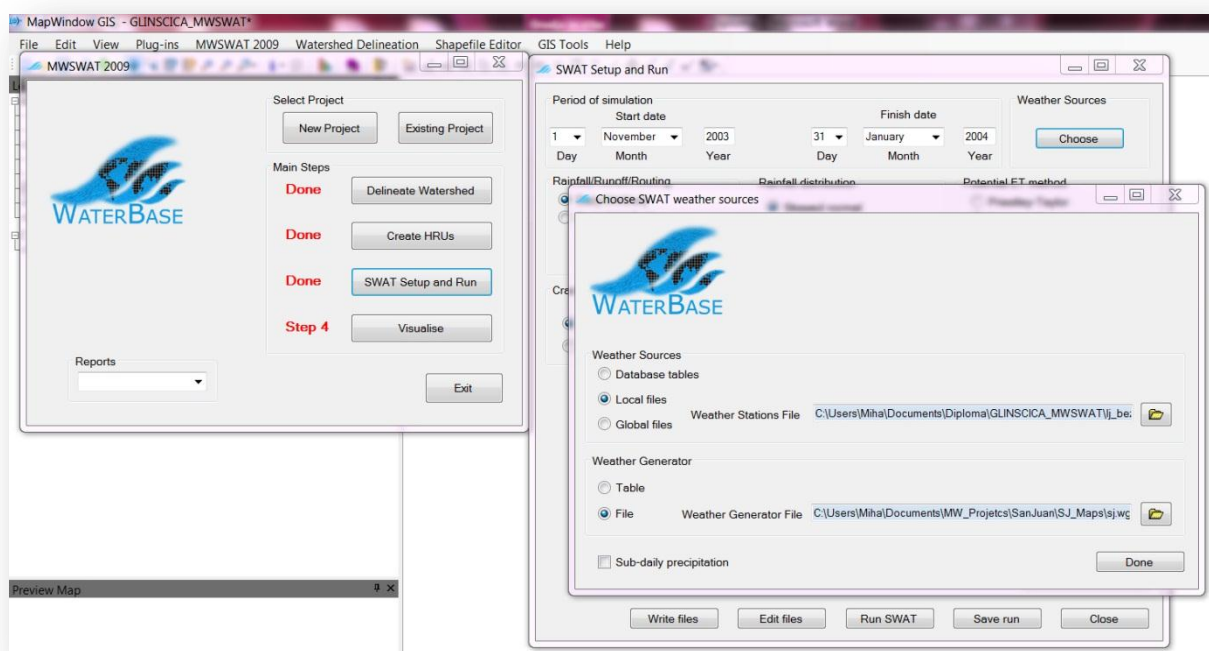


Slika 26: Vnos 30 minutnih padavin s .txt datoteko z začetkom 1. 11. 2003(140150.pcpsub)

V oknu »Izberi vir vremenskih podatkov za SWAT« (angl. *Choose SWAT weather sources*) lahko izberemo »lokalno datoteko« (angl. *Local file*), kar pomeni, da bo izbrana postaja zagotovila podatke za celotno porečje. Če simuliramo večje porečje in imamo na voljo podatke iz več merskih postaj, potem podatke o zemljepisni širini, dolžini in nadmorski višini posamezne postaje opredelimo v tej datoteki. Tako so vremenski podatki lahko ustrezneje prostorsko zastopani po celotnem območju.

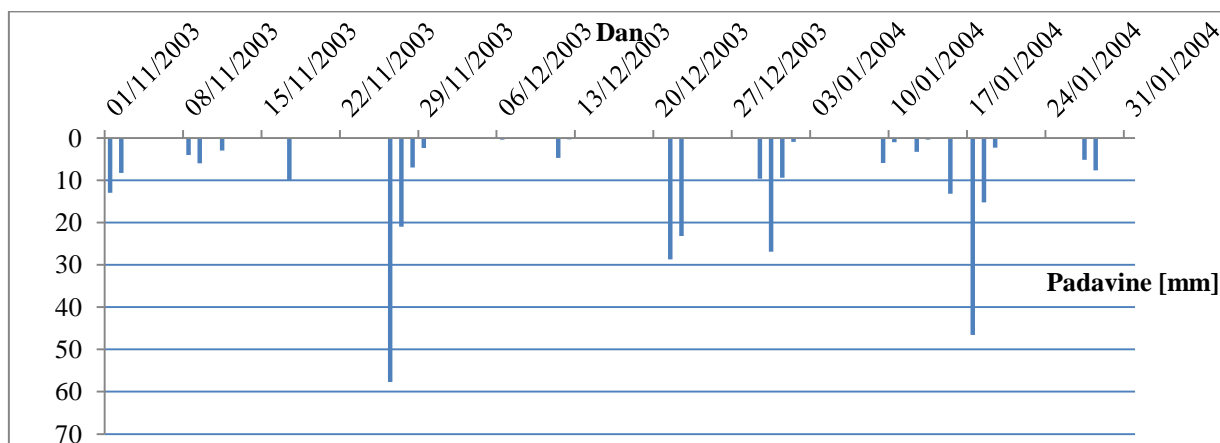
V primeru izbire »Globalne datoteke« (angl. *Global files*), pa ima SWAT seznam vremenskih postaj po svetu in njihove podatke. Glede na lokacijo območja izbere 6 najbližjih postaj za katere generira potrebne manjkajoče vhodne vremenske podatke. Če so na voljo merjeni podatki iz lokalnih merskih postaj, je njihova uporaba gotovo smotrnejša, saj pripomore k bolj fizični interpretaciji modela (slika 27).

Relativna vlažnost je v model vnešena v %, temperatura v °C, padavine v mm, sončno sevanje v MJ/m² in hitrost vetra v m/s.



Slika 27: Pogovorno okno za izbiro in vnos vremenskih podatkov

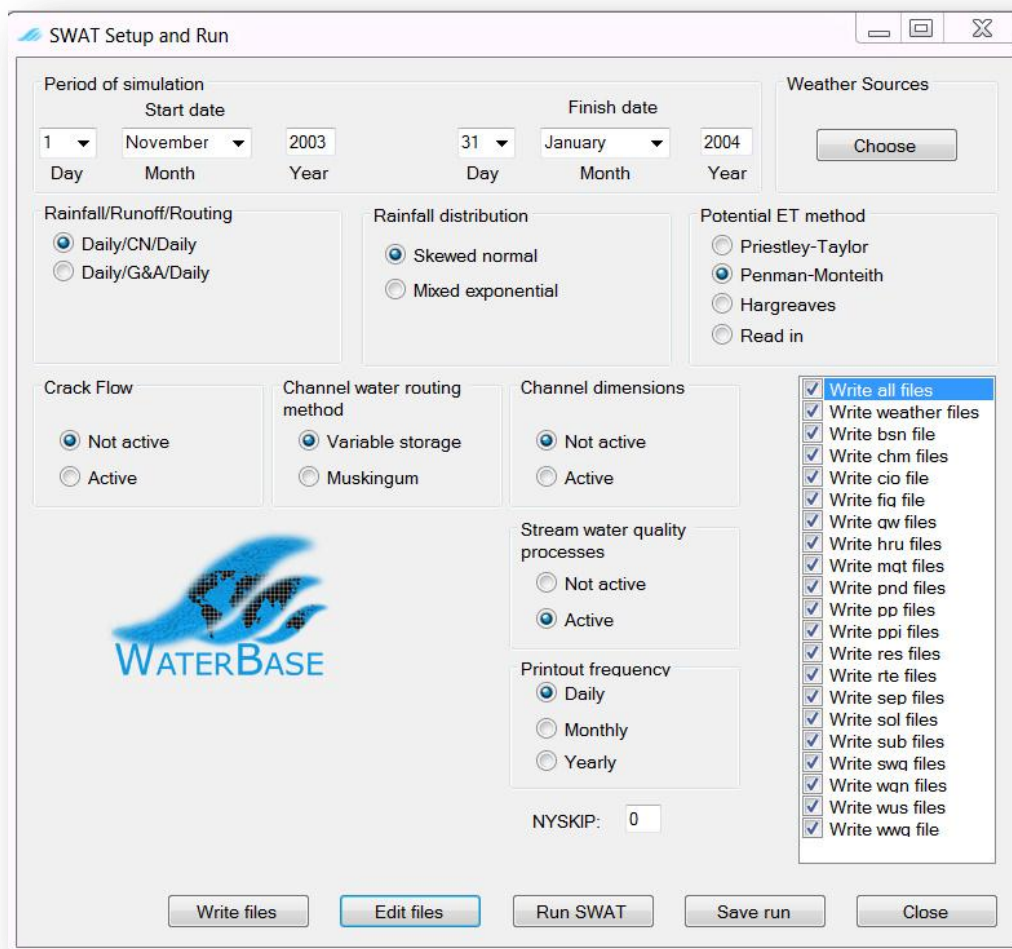
Model je bil umerjen za obdobje 3 mesecev, od 1. novembra 2003 do 31. januarja 2004. V tem času je padlo 330.1 mm padavin, v štirih večjih in sedmih manjših nalivih. Največ padavin je padlo 26. novembra 2003 in sicer 57.7 mm in 17. januarja, 46.6 mm (slika 28).



Slika 28: Padavine, v simuliranem obdobju od 1. 11. 2003 do 31. 1. 2004 (ARSO, 2009)

4.4 Zagon modela

V pogovornem oknu za zagon simulacije imamo, na voljo še nekaj metod, ki jih lahko v simulaciji uporabimo oz. dejavnikov za katere želimo, da so v simulaciji upoštevani (slika 29).

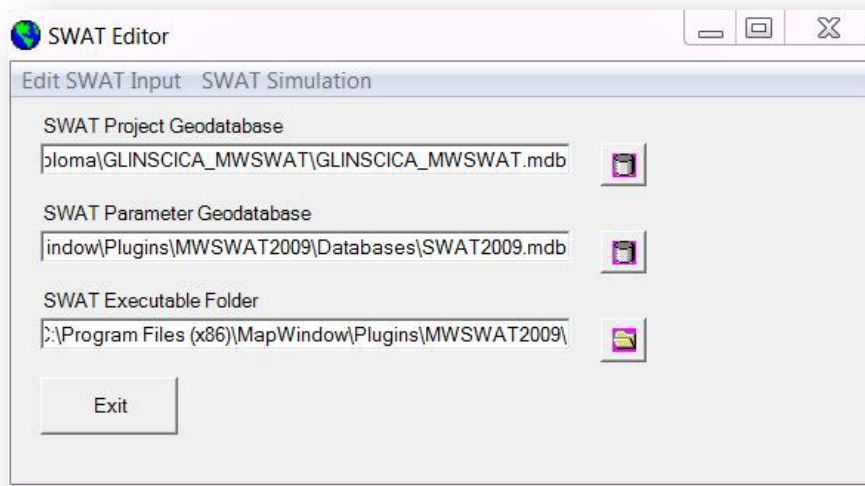


Slika 29: Pogovorno okno za dostop do vremenskih podatkov, izbiro metod za simulacijo, frekvenco zapisa, dostopa do SWAT urejevalnika (angl. Editor) in zagon modela SWAT

Definiramo lahko:

- Začetni in končni datum simulacije,
- Metodo izračuna padavinskih izgub in računa odtoka,
- Metodo izračuna evapotranspiracije,
- Metodo prenosa poplavnega vala,
- Frekvenco zapisa izhodnih podatkov (dnevni, mesečni, letni).

V pogovornem oknu, pred samo simulacijo, v model zapišemo vse do sedaj vnesene podatke in izbrane metode. Dostopamo tudi do SWAT urejevalnika (angl. *Editorja*), ki je program za urejanje vhodnih podatkov, za lažji dostop do baz podatkov in spremembo posameznih podatkov. S tem orodjem lahko po spremembi parametrov znova zaženemo SWAT oz. model umerimo z ročnim spreminjanjem parametrov, kot tudi z avtomatsko funkcijo umerjanja. S SWAT urejevalnikom lahko opravimo tudi analizo občutljivosti (slika 30).



Slika 30: SWAT urejevalnik

V nalogi, je bil za umerjanje modela uporabljen SWAT-CUP4, program za umerjanje SWAT modelov, ki je tako kot MWSWAT javno dostopen in uporaben v javne namene. Deluje kot samostojen program. Ko je s SWAT-om simulacija opravljena, je rezultat simulacije vhodni podatek v SWAT-CUP4.

5 PRIMERJAVA SIMULACIJ Z RAZLIČNO IZBIRO METOD IN NATANČNOSTJO VHODNIH PODATKOV

Pred samim umerjanjem, smo opravili nekaj poskusnih simulacij z različnimi nastavitvami in sicer z uporabo različnih metod razmejitve porečja, razmejitve mreže vodotokov, različnih metod izračuna potencialne evapotranspiracije, metod izračuna padavinskih izgub in metode računa toka po kanalu. Simulacije so bile opravljene z vnosom dnevni padavin in ena z vnosom 30-minutnih padavin. Namen poskusnih simulacij je bila ocena vpliva posameznih izbir metod ali natančnosti vhodnih podatkov na izdelavo modela, obnašanje modela in delno tudi na rezultate.

Ker izbira metode potencialne evapotranspiracije, glede na uporabljene vhodne podatke, pri simulaciji pretoka ni igrala pomembnejše vloge in so bili rezultati enaki pri vseh treh metodah, je bila pri vseh simulacijah in umerjanju izbrana metoda izračuna potencialne evapotranspiracije po metodi Penman-Monteith enačbi, ki je po navodilih FAO standardna metoda izračuna evapotranspiracije.

5.1 Obnašanje modela pri različni razmejitvi porečja in številu hidroloških odzivnih enot

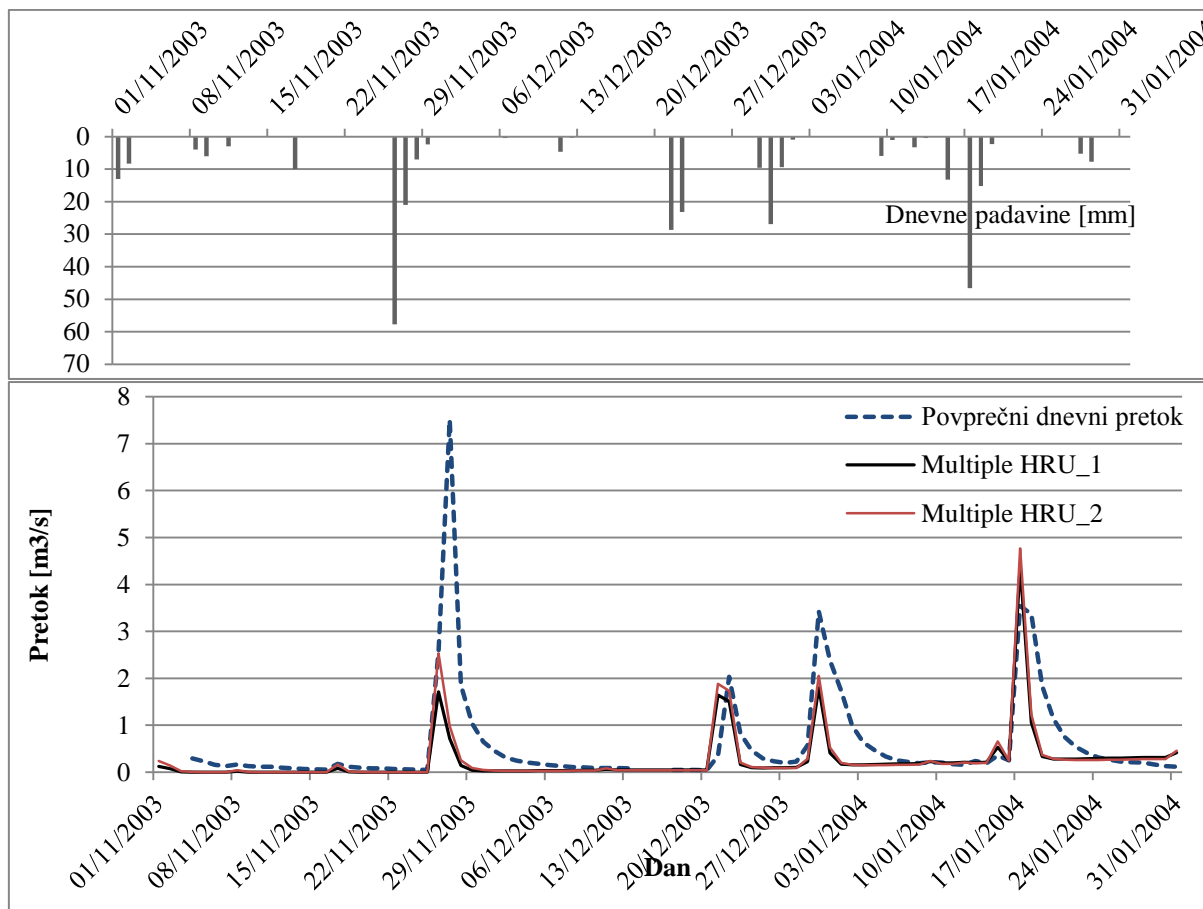
Za potrebe izdelave modela in umerjanja smo najprej naredili dve simulaciji z različno metodo razmejitve porečja. S tem smo želeli določiti vpliv nastavitve razmejitve porečja in ustvarjenega števila HRU na rezultat, t.j. neumerjen povprečni dnevni pretok.

Ker je območje majhno, simulacija traja samo 3 mesece ter posploševanje dominantne rabe tal oz. talnega tipa čez posamezno podporečje ni potrebno oz. bi s tem izgubili preveč podatkov smo pri obeh simulacijah uporabili izbiro »Multiple HRU«. Izbira »Dominant HRU« je bolj primerna za zelo velika območja in daljše simulacije, pri katerih ima časovni faktor dolžine posamezne simulacije pomembno težo. Seveda je potrebno upoštevati tudi natančnost vhodnih podatkov in poiskati pravi kompromis med ločljivostjo prostorskih podatkov in natančnostjo umerjanja. Večja kot je razdrobljenost HRU, daljši bo čas simulacije in posledično tudi umerjanja. Razlike v simulacijah so prikazane v preglednici 9.

Preglednica 9: Prikaz dveh različnih nastavitev pri razmejitvi porečja

	Simulaciji	
	»Multiple HRU_1«	»Multiple HRU_2«
Razmejitev mreže vodotokov	0,2 km ² oz. 8000 celic	0,1 km ² oz. 4000 celic
Število podporečij/odsekov	27	95
Določitev HRU	Glede na območje, 15 ha	Glede na območje, 8 ha, Rabi tal URMD in UTRN se ne izključi
Število HRU	51	410
Račun padavinskih izgub	SCS CN	SCS CN
Račun toka po kanalih	Spremenljivi koeficient skladiščenja	Spremenljivi koeficient skladiščenja
Vnos padavin	dnevne	dnevne

Rezultata obeh simulacij se glede na vhodne podatke prav dosti ne razlikujeta. Zaradi upoštevanja večjega deleža cestnih in urbaniziranih površin, je neumerjen pretok simuliran z drugo simulacijo nekoliko večji, pri obeh pa se pojavi precejšnje odstopanje od merjenega povprečnega dnevnega pretoka (slika 31). Primerjavi sta podobni tudi zato, ker je porečje zelo majhno, čas simulacije v katerem pade 330.1 mm padavin, pa relativno kratek.



Slika 31: Primerjava dveh neumerjenih simulacij z različnim številom HRU

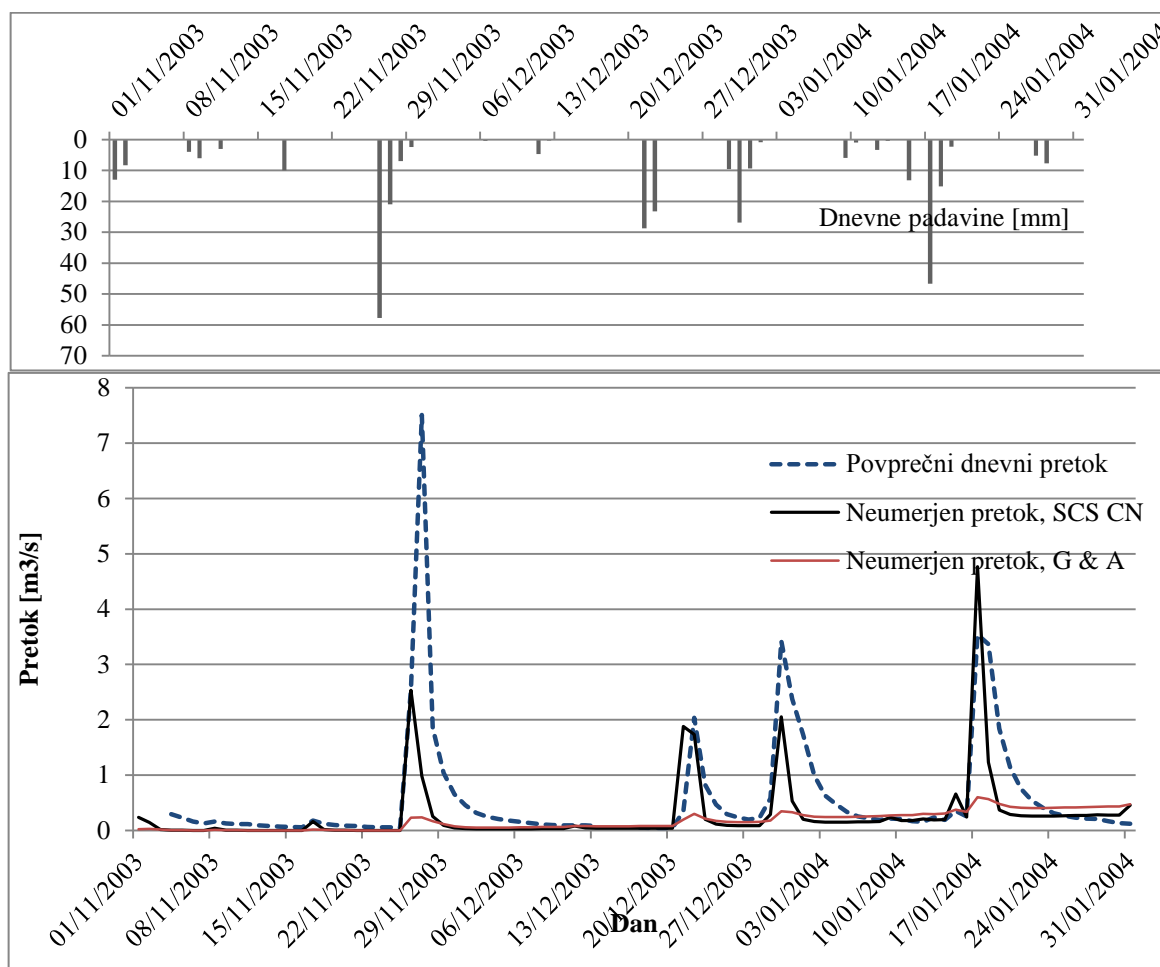
Na podlagi teh rezultatov je bila v vseh nadaljnjih simulacijah in pri umerjanju, pri razmejitvi območja na podporečja in določitvi mreže vodotokov, uporabljena nastavitev simulacije »Multiple HRU_2«, saj je bil rezultat te simulacije malenkost boljši, hkrati pa je zaradi večjega števila upoštevanih fizičnih dejavnikov bolj reprezentativno predstavila območje. Torej je bilo pri umerjanju modela porečje razdeljeno na 95 podporečij oz. 410 HRU, urbanizirane (URMD) ter cestne površine (UTRN) pa niso bile izključene.

5.2 Primerjava simulacij pretoka, glede na uporabljeno metoda izračuna padavinskih izgub

Opravili smo simulaciji z dvema različnima metodama računa padavinskih izgub in sicer SCS Curve Number ter metodo Greena in Ampta (preglednica 10). Vsi ostali parametri so bili privzetih vrednosti. Rezultati metode SCS CN so bili v konkretnem primeru, pri neumerjenemu pretoku neprimerno boljši saj je bil simuliran pretok po metodi Greena in Ampta močno podcenjen (slika 32).

Preglednica 10: Prikaz dveh simulacij, opravljenih z različnima metodama padavinskih izgub

	Simulaciji	
	Neumerjen pretok_SCS CN	Neumerjen pretok_G&A
Račun padavinskih izgub	SCS CN	Green in Ampt
Račun toka po kanalih	Spremenljivi koeficient skladiščenja	Spremenljivi koeficient skladiščenja
Interval padavin	dnevne	dnevne



Slika 32: Primerjava dveh neumerjenih simulacij z uporabo različnih metod padavinskih izgub

5.3 Primerjava simulacij pretoka, glede na interval vnosa padavin

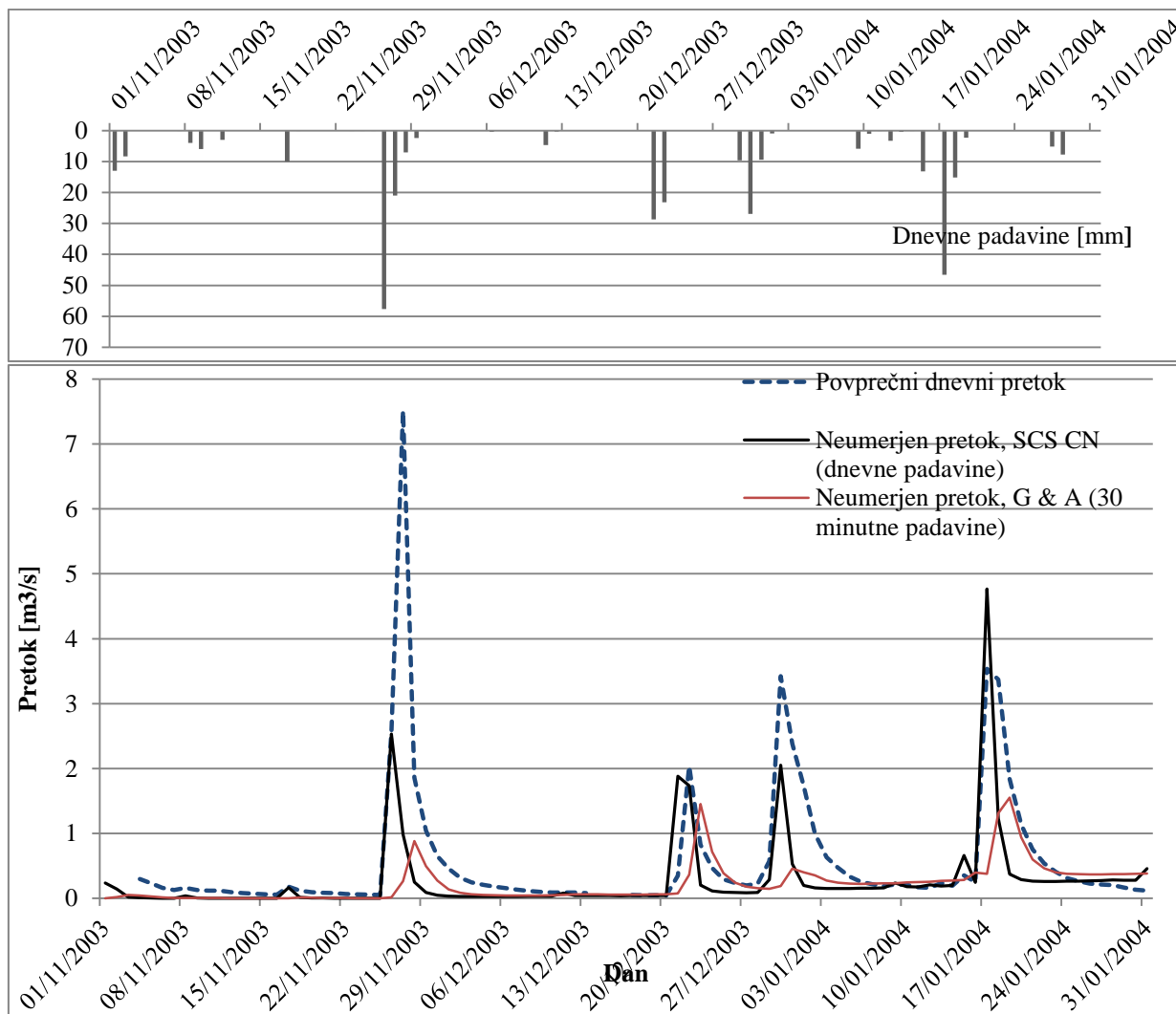
Model v osnovi ni namenjen računu posameznih poplavnih dogodkov, zato je tudi njegova struktura namenjena daljšim časovnim dogodkom. Kljub temu dopušča vnos padavin manjših časovnih intervalov (slika 25) in to pri samem računu pretoka tudi upošteva. SWAT, za izpis pretoka ponuja tri možnosti. Frekvenca zapisa izhodne spremenljivke je lahko povprečni dnevni, mesečni ali letni pretok.

Potrebno je omeniti, da račun padavinskih izgub po metodi SCS CN, ki se je pri vnosu dnevnih padavin izkazal za ustrežnejšega, s 30-minutnim časovnim intervalom padavin ni možen. Če vnašamo padavine manjših časovnih intervalov, se izgube vedno računajo po metodi Greena in Ampta (preglednica 11). Obstaja sicer izhodna datoteka *hourq.out*, ki pa ne predstavlja pretoka, ampak samo volumen vode, na izbrani lokaciji znotraj porečja, v nekem trenutku.

Rezultati obeh simulacij so sicer prikazani na sliki 33, vendar realna primerjava simulacij glede na interval vnosa padavin, zaradi različnosti metode za izračun padavinskih izgub, ni bila možna. Iz večih razlogov, smo se v nadaljevanju odločili za dnevne vrednosti padavin in metodo SCS padavinskih izgub.

Preglednica 11: Prikaz dveh simulacij, opravljenih z različnim intervalom vnosa padavin

	Simulaciji	
	Neumerjen pretok_SCS CN	Neumerjen pretok_G&A30min
Račun padavinskih izgub	SCS CN	Green in Ampt
Račun toka po kanalih	Spremenljivi koeficient skladiščenja	Spremenljivi koeficient skladiščenja
Interval padavin	dnevne	30-minut



Slika 33: Primerjava dveh neumerjenih simulacij z izračunom padavinskih izgub po metodi SCS CN (dnevne padavine) ter Green in Ampt (30 minutne padavine)

5.4 Vpliv izbire metode prenosa valov po strugi

V prejšnjih podpoglavjih so bile opravljene simulacije z SWAT-om, upoštevajoč različne nastavitve, ki so na voljo znotraj samega modela. Pri izračunu pretoka z nekega območja, pa ima velik pomen tudi način prenosa vode po strugi. SWAT ima na voljo dve možnosti prenosa vode po strugi in sicer metodo spremenljivega koeficienta skladiščenja in Muskingumovo metodo. Obe metodi sta variaciji kinematičnega modela vala. SWAT prenaša vodo kot volumen.

Metoda spremenljivega koeficienta skladiščenja na določenem odseku temelji na kontinuitetni enačbi. Če volumnu pritoka odštejemo volumen odtoka v časovnem koraku, dobimo volumen skladiščenja na koncu časovnega koraka (Nietsch in sod., 2009).

Muskingumova metoda modelira volumen skladiščenja v kanalu, kot kombinacijo prizmatičnega in klinastega dela vala. Ko poplavni val potuje po rečnem odseku, je vtok v določen odsek večji od odtoka iz odseka in ustvarjena je prizmatična oblika vala. V trenutku, ko val doseže iztok iz odseka, pa odtok preseže vtok in ustvarjena je negativna klinasta oblika vala (Neitsch in sod., 2009). Poleg klinastega vala, rečni odsek vsebuje tudi konstantni volumen prizmatičnega prereza. Ker metodi močno vplivata na formiranje in obliko poplavnega vala, smo model umeril z uporabo obeh metod.

5.5 Vpliv izbire parametrov modela SWAT

SWAT je zelo kompleksen model in vsebuje ogromno število parametrov, ki vplivajo na hidrološke procese, gibanje sedimentov, erozijo, gibanje pesticidov in hranil, donos pridelka in biomase, kakovost vode itd.

Pri umerjanju smo izbrali parametre, ki so neposredno povezani s hidrološkimi procesi in gibanjem vode znotraj porečja. Izbrali smo 15 parametrov, ki neposredno vplivajo na gibanje vode v tleh, po kanalih, prenos vode med nizkim in globokim vodonosnikom, parametre povezane s taljenjem snega in pronicanjem vode (preglednica 12). Njihove končnice identificirajo, kateri skupini v SWAT-u parameter pripada, umerjanje pa poteka po postopku zmanjševanja intervala vrednosti, dokler ni dosežena optimalna kombinacija parametrov. Kvalifikant pred parametrom ($r_{_}$, $v_{_}$) pa določa, način menjave parametra z vrednostjo iz dobljenega razpona po iteraciji. Medtem ko $v_{_}$ določa zamenjavo parametra z novim parametrom iz dobljenega razpona po iteraciji, $r_{_}$ pomeni relativno spremembo parametra in sicer množenje z vrednostjo 1 plus dobljen faktor iz razpona vrednosti parametra (Abbaspour in sod., 2006).

Preglednica 12: Pri umerjanju uporabljeni parametri (Arnold in sod., 2011)

Parameter	Skupina
$r_{_}CN2.mgt$ - koeficient odtoka	»Management« - upravljanje
$v_{_}ALPHA_BF.gw$ - faktor baznega odtoka	»Groundwater« - podzemna voda
$v_{_}GWQMN.gw$ - mejna globina v nizkem vodonosniku, pri kateri se pojavi povratni tok	»Groundwater« - podzemna voda
$v_{_}GW_REVAP.gw$ - hitrost gibanja vode, od nizkega vodonosnika, do območja korenin	»Groundwater« - podzemna voda
$v_{_}GW_DELAY.gw$ - zamik gibanja podzemne vode	»Groundwater« - podzemna voda

se nadaljuje...

...nadaljevanje preglednice 12

<i>v__REVAPMN.gw</i> - mejna globina vode v nizkem vodonosniku, pri kateri se pojavi precejanje v globoki vodonosnik	»Groundwater« - podzemna voda
<i>v__ESCO.hru</i> - faktor nadomestitve izhlapele vode	»Hru« - hidrološka odzivna enota
<i>v__CH_N2.rte</i> - Manningov koeficient hrapavosti	»Routing« - prenos vala
<i>v__CH_K2.rte</i> - efektivna hidravlična prevodnost kanala	»Routing« - prenos vala
<i>v__SFTMP.bsn</i> - temperatura, pri kateri dež postane sneg	»Basin« - porečje
<i>v__SMFMX.bsn</i> - maksimalni faktor taljenja snega	»Basin« - porečje
<i>v__SMFMN.bsn</i> - minimalni faktor taljenja snega	»Basin« - porečje
<i>v__SURLAG.bsn</i> - koeficient zamika površinskega odtoka	»Basin« - porečje
<i>r__SOL_AWC.sol</i> - razpoložljiva kapaciteta vode v zemljini	»Soils« - talni tipi
<i>v__TLAPS.sub</i> - sprememba temperature glede na nadmorsko višino	»Subbasin« - podorečje

Ker je spreminjanje kombinacije parametrov zahtevno in zelo zamudno, smo pri umerjanju modela uporabili program SWAT-CUP4 (poglavje 6). S programom SWAT-CUP4 smo opravili veliko zagonov modela ter od 4 do 6 iteracij na zagon. Vsaka iteracija je sestavljena iz 500 oz. 1000 simulacij. Izhodni podatek simulacije je kombinacija razponov vrednosti parametrov. Simulacija v kateri največ merjenih podatkov leži znotraj 95 PPU, je rezultat iteracije.

Iteracija z 500 simulacijami, je pri upoštevanih 15 parametrih trajala približno 2 uri, medtem ko je izračun 1000 simulacij trajal približno 4 ure. Vse simulacije so bile opravljene z osebnim računalnikom z procesorjem i5 - 460M frekvence 2.53 GHz in delovnim pomnilnikom 4 GB.

V diplomski nalogi, so predstavljeni le trije zagoni modela, s kombinacijo parametrov, ki so dali najboljše rezultate (poglavje 7).

6 SWAT-CUP4

SWAT-CUP4 je program za umerjanje in analizo občutljivosti modelov SWAT. Pri parametrizaciji modela je potrebno upoštevati razmerje med številom parametrov in ločljivostjo prostorskih podatkov. V primeru, da imamo slabe podatke, ki prikazujejo območje in je npr. ločnica med dvema območjema težko določljiva, se je potrebno vprašati, ali je sploh smiselno model umerjati z velikim številom parametrov. Smiselno ravnotežje je težko doseči in to vpliva na rezultate umerjanja (Abbaspour, 2011).

Kombinacija merjenih podatkov, tehnike analize prostorskih podatkov, geostatistične analize tal in napredek pri daljinskem zaznavanju podatkov, je prihodnost hidrološkega modeliranja. Matematično bi umerjen model lahko zapisali kot:

$$M = M(\theta : p, g, w, b, v, m, \dots) \quad (43)$$

Kjer je:

- θ vektor parametrov,
- p metoda umerjanja,
- g način optimizacije,
- w vektor uteži optimizacije,
- b mejni pogoji,
- v spremenljivke pri optimizaciji,
- m število merjenih/opazovanih spremenljivk.

Enačba pomeni, da je model pogojen s procesom umerjanja, načinom optimizacije, faktorjem uteži pri optimizaciji, začetnih in mejnih pogojih, vrsti in velikosti merjenih podatkov itd. Na območjih, katera v večji meri s svojim delovanjem upravlja človek, npr. so kmetijsko intenzivna itd., predstavljajo naravni procesi sekundarno vlogo. Če detajlni podatki o dogajanju na območju niso na voljo, modeliranje takih območij ni možno.

Težave s katerimi se srečujemo pri umerjanju modela porečja, so negotovosti pri napovedih oz. predvidevanjih. Modeliranje procesov na porečjih ima v splošnem veliko stopnjo negotovosti. Negotovosti lahko delimo na:

Konceptualne negotovosti modela: Negotovosti zaradi poenostavitev v modelu, negotovosti zaradi procesov, ki se na porečju dogajajo, pa v model niso vključene, negotovosti zaradi procesov, ki so v

model vključene, njihov vpliv pa je modelarju nepoznan ali nemerljiv, negotovosti zaradi procesov, ki v model niso vključeni in zanje modelar ne ve.

Negotovosti zaradi vhodnih podatkov: Negotovosti zaradi napak v vhodnih spremenljivkah (podatki o padavinah, temperaturi,...). Do napak lahko pride tudi zaradi točkovno merjenih podatkov, ki so posplošeni na večje območje. Ker so izhodni podatki, zelo občutljivi na vhodne podatke, predvsem padavine, je potrebno pri teh biti še posebej pazljiv. V gorskih območjih, so negotovosti zaradi vhodnih podatkov lahko zelo velike.

Ne-edinstvenost parametra: Pri direktnem modeliranju, ima en parameter samo en izhodni signal iz modela. Pri inverznem modeliranju (IM) je lahko en opazovan/merjeni signal povzročen z naborom mnogo različnih kombinacij parametrov. Inverzno modeliranje, je v zadnjih letih postala zelo uporabna metoda za umerjanje. IM se ukvarja s sklepanjem oz. določevanjem lastnosti fizičnega sistema, iz merjenih izhodnih spremenljivk modela (npr. pretok, koncentracija sedimentov). Ta način je zelo privlačen, saj je neposredno merjenje parametrov, ki opisujejo fizični sistem, lahko časovno zelo potratno, drago in ima omejeno možnost aplikacije. Ker smo fizično sposobni izmeriti le določeno število (šumnih) podatkov in ker so fizični modeli navadno opisani z kontinuitetnimi enačbami, noben hidrološki sistem ni enotno rešljiv. Z drugimi besedami to pomeni, da če obstaja en model, ki sovпада z meritvami, jih gotovo obstaja več. Cilj IM je karakteriziranje nabora modelov z dodeljevanjem porazdelitev (negotovosti) parametrom, ki se prilegajo meritvam in izpolnjujejo naša predvidevanja ter ostale pomembne informacije.

6.1 SUFI2 (angl. *Sequential Uncertainty Fitting*)

SUFI2 je pol avtomatski proces inverznega modeliranja, ki združuje proces umerjanja in analizo negotovosti.

Pri analizi SUFI2, negotovost parametrov pomeni upoštevanje negotovosti, ki nastanejo zaradi različnih vzrokov, kot so negotovost vhodnih podatkov, negotovost zaradi konceptualnosti modela, negotovost parametrov in merjenih podatkov. Mera, do katere so vse negotovosti upoštevane, je opredeljena kot P vrednost, ki je procent merjenih podatkov, ki so zajeti v 95 % napovedi negotovosti (95PPU). Če so vsi vhodni podatki in procesi pravilno manifestirani v izhodnih podatkih, ki so merjeni z napako, potem je to stopnja napake, torej negotovost v napovedovanju.

Delež podatkov, ki so zajeti v napovedi negotovosti, je dobra mera za oceno zmogljivosti analize negotovosti. 95PPU je izračunana pri 2,5 % in 97,5 % zbirne funkcije verjetnosti izhodne spremenljivke, pridobljene z vzorčenjem »Latin Hypercube«, ki dopušča 5 % zelo slabih simulacij.

Merilo za oceno zmogljivosti umerjanja/analize negotovosti, je tudi R vrednost, ki je povprečna širina pasu 95PPU, razdeljena s standardno deviacijo merjenih podatkov. SUFI2 torej teži k temu, da čim več merjenih podatkov, leži znotraj najmanjše možne širine pasu 95PPU (Faramarzi in sod, 2009).

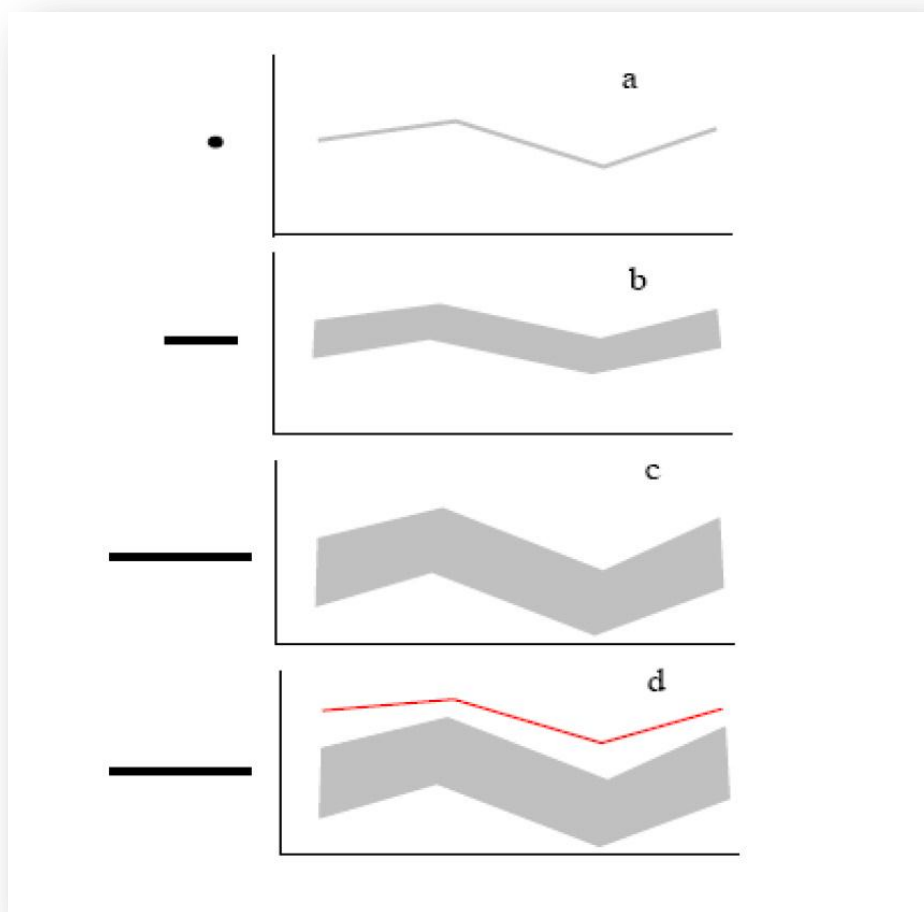
Koncept analize negotovosti algoritma SUFI2 je grafično prikazan na sliki 34. Slika prikazuje, da ena sama vrednost parametra (prikazanega s piko) vodi k natanko enemu odzivu modela (slika 34a), medtem ko propagacija negotovosti parametra (prikazanega s črto) vodi k osenčenemu delu 95PPU (Slika 34b). Ko se negotovost parametra povečuje, se povečuje tudi negotovost izračuna, ne nujno linearno, kot je prikazano na sliki 34c. Torej se analiza SUFI2 začne z predpostavljajanjem velike negotovosti parametra znotraj fizično smiselnih mej, tako da so merjeni podatki v čim večji meri zajeti znotraj pasu 95PPU, nato negotovost zmanjšuje po korakih in hkrati nadzira P vrednost in R vrednost. V vsakem koraku so parametri prejšnjega izračuna posodobljeni na način, da so vsi novi razponi parametrov manjši od prejšnjih in so centrirani okrog najboljše simulacije (Schuol in sod., 2008).

Teoretično se P vrednosti gibljejo med 0 in 100 %, R vrednosti pa med 0 in neskončno. P vrednost 100 % in R vrednost 0, bi pomenila, da simulirani podatki natančno sovpadajo z merjenimi podatki. Stopnja, s katero se oddaljimo od teh vrednosti, je lahko mera za moč oz. natančnost umerjanja.

Večji P vrednosti, je lahko dosežena na račun večje R vrednosti, torej je potrebno doseči ustrezno ravnotežje med njima. Ko sta kompromisni vrednosti doseženi, takrat negotovost parametra ustreza razponu vrednosti parametra.

Nadalje lahko prikažemo ustreznost simulacije z koeficientoma R^2 ali/in Nash-Sutcliff (NS), ki prikazujeta razmerje med opazovanimi/merjenimi vrednostmi in končno, »najboljšo« simulacijo. Potrebno je poudariti, da najboljša rešitev ni najboljša simulacija, temveč končni razpon vrednosti parametrov.

Če so začetni razponi vrednosti parametrov znotraj fizično smiselnih mej in kljub temu ni moč najti 95PPU, ki ustreza večini ali vsaj nekaj merjenim podatkom (slika 34d), potem ni problem v umerjanju parametrov, ampak je potrebno konceptualni model ponovno preučiti in preveriti vhodne podatke v model.



Slika 34: Konceptualna ilustracija razmerja med negotovostjo parametra in negotovostjo napovedi
(Abbaspour, 2011)

6.1.1 SUFI2 kot optimizacijski algoritem

Sledi kratek opis korakov SUFI2 algoritma (Abbaspour in sod., 2004):

1. Korak: Določitev, načina optimizacije z zahtevo po več upoštevanih kriterijih (angl. *multi-criteria*).
2. Korak: Vzpostavitev fizično smiselnega absolutnega minimuma in maksimuma razpona vrednosti parametrov, ki bodo optimizirani.

$$b_j: b_{j,abs_min} \leq b_j \leq b_{j,abs_max} \quad j = 1 \dots m \quad (44)$$

Kjer je:

- b_j j - ti parameter,
- m število ocenjenih parametrov.

3. Korak: Ta korak vsebuje neobvezno, vendar zelo priporočljivo »absolutno analizo občutljivosti« vseh parametrov v zgodnji fazi umerjanja. Analiza občutljivosti je izvedena z namenom, da vrednosti vseh parametrov ostanejo konstantno blizu razumnih vrednosti, medtem ko vrednosti varirajo znotraj razpona vrednosti iz prejšnjega koraka.

4. Korak: Parametrom se dodelijo začetne vrednosti razpona negotovosti, prvega »Latin hypercube« vzorčenja. V splošnem so zgornje vrednosti manjše od absolutnih vrednosti, so subjektivne in odvisne od izkušenj modelarja. Analiza občutljivosti v 3. koraku, je lahko merilo za izbiro primernih razponov. Čeprav pomembne, te začetne vrednosti niso bistvene in so lahko kasneje posodobljene v okviru absolutnih vrednosti.

5. Korak: Izvrši se vzorčenje »Latin Hypercube«, ki poda n kombinacij parametrov, pri čemer je n število simulacij. To število mora biti relativno veliko, približno 500 do 1000 simulacij.

6. Korak: Izračunan je »objective function« oz. določen način optimizacije.

7. Korak: Izračun nekaterih statističnih vrednosti, za oceno vzorčenja posameznega nabora. V tem koraku je izvršen tudi t-test, ki določa relativno pomembnost posameznega parametra. Mera občutljivosti v tem koraku, je drugačna kot v 3. koraku, saj je v tem primeru ocenjena relativna sprememba načina optimizacije, ki je posledica spremembe posameznega parametra, medtem ko se ostali parametri spreminjajo. Tako relativna občutljivost temelji na linearni aproksimaciji in nudi samo delno informacijo o občutljivosti optimizacije na parametre modela. Nadalje je relativna občutljivost parametra, ki je dobljena s t-testom, pogojena z razponi vrednosti parametrov. Tako se lahko razvrstitev občutljivosti parametrov z vsako iteracijo spremeni.

8. Korak: Izračun vrednosti, za ocenjevanje negotovosti. Ustreznost ujemanja, je dobljena z oceno negotovosti, ki je preračunana iz deleža merjenih podatkov, ki so zajeti v 95PPU pasu in povprečne razdalje \bar{d} med zgornjim in spodnjim robom 95PPU:

$$\bar{d}_x = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k (X_U - X_L)_l \quad (45)$$

Kjer je:

- k število opazovanih meritev,
- X_L spodnja meja pri 2,5 %,
- X_U zgornja meja pri 97,5 %.

Ustreznost ujemanja je optimalna, če je 100 % meritev zajetih v 95PPU in \bar{d} blizu 0. Vendar zaradi napak pri meritvah in negotovosti modela idealne vrednosti niso dosežene.

Razumna mera za \bar{d} je izražena z R vrednostjo, ki je:

$$R - faktor = \frac{\bar{d}_X}{\sigma_X} \quad (46)$$

Kjer je:

- σ_X standardna deviacija merjene spremenljivke X .

Vrednosti manjše od 1 so zaželena mera za R vrednost.

9. Korak: Nadaljuje se vzorčenje parametrov in posodabljanje razpona vrednosti parametrov.

6.1.2 Optimizacija

V datoteki *observed.sf2* je potrebno izbrati način optimizacije *Obj_Fn_Type*. Na voljo imamo 7 statističnih načinov, z različno formulacijo. Vsaka formulacija lahko vodi do drugačnega rezultata, torej je končni razpon vrednosti parametrov odvisen od načina optimizacije. Z združitvijo različnih tipov funkcij oz. več kriterijsko formulacijo, se je ta težava zmanjšala. Načini optimizacije pri analizi SUFI2 so:

- 1 = mult: Multiplikativna oblika kvadrata napake,
- 2 = sum: Vsota kvadratov napake,
- 3 = r²: Koeficient determinacije R²,
- 4 = Chi2: Hi-kvadrat χ^2 ,
- 5 = NS: Nash-Sutcliffe koeficient,
- 6 = br2: Produkt koeficienta determinacije R² in regresijske linije bR²,
- 7 = ssqr: SSQR metoda.

V nalogi je bil izbran 6 način optimizacije, torej produkt koeficienta determinacije R² in regresijske linije, bR². Funkcija omogoča izračun razlike v velikosti dveh signalov (označenih z b), kot tudi njune dinamike (označene z R²). Način optimizacije je zapisan kot:

$$\phi = \begin{cases} |b|R^2 & \text{če} & |b| \leq 1 \\ |b|^{-1}R^2 & \text{če} & |b| > 1 \end{cases} \quad (47)$$

V primeru več spremenljivk, je g definiran kot:

$$g = \sum_i w_i \phi_i \quad (48)$$

Kjer je :

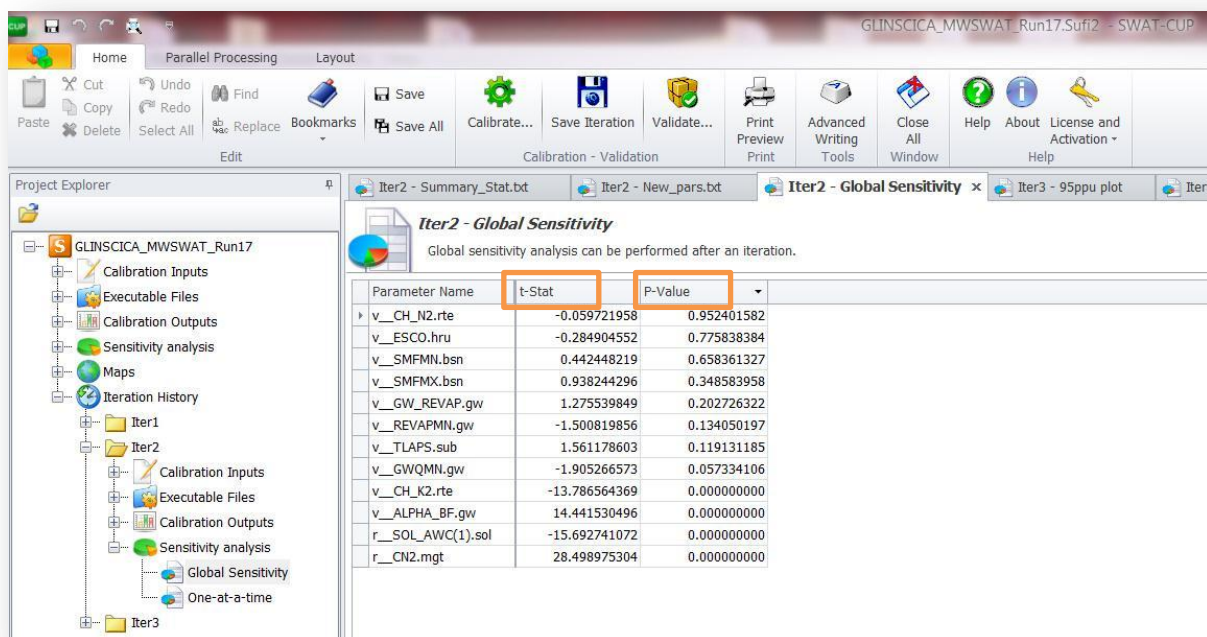
- $|b|$ velikost signala,
- R^2 dinamika signala,
- w utež spremenljivke.

6.1.3 Analiza občutljivosti

6.1.3.1 Globalna analiza občutljivosti

Občutljivost parametrov je določena z izračunom regresijske funkcije, ki primerja parametre ustvarjene z »Latin hypercube« z vrednostmi rezultatov optimizacije.

Nato se izvede t-test, s katerim je prikazana relativna pomembnost posameznega parametra. Občutljivosti parametrov (slika 35) so povprečne spremembe v optimizacijskem postopku in so posledica spremembe posameznega parametra, medtem ko se vsi ostali parametri spreminjajo.



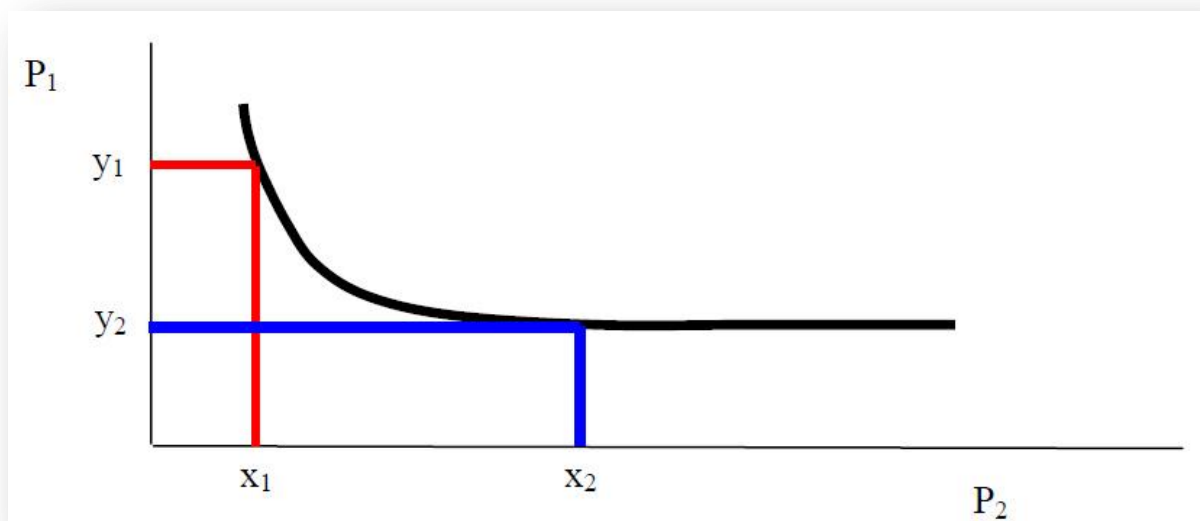
Parameter Name	t-Stat	P-Value
v_CH_N2.rte	-0.059721958	0.952401582
v_ESCO.hru	-0.284904552	0.775838384
v_SMFMN.bsn	0.442448219	0.658361327
v_SMFMX.bsn	0.938244296	0.348583958
v_GW_REVAP.gw	1.275539849	0.202726322
v_REVAPMN.gw	-1.500819856	0.134050197
v_TLAPS.sub	1.561178603	0.119131185
v_GWQMN.gw	-1.905266573	0.057334106
v_CH_K2.rte	-13.786564369	0.000000000
v_ALPHA_BF.gw	14.441530496	0.000000000
r_SOL_AWC(1).sol	-15.692741072	0.000000000
r_CN2.mgt	28.498975304	0.000000000

Slika 35: Globalna analiza občutljivosti

Na sliki 35 je najbolj občutljiv parameter koeficient odtoka CN2, sledita mu razpoložljiva kapaciteta vode v tleh SOL_AWC in faktor bočnega odtoka ALPHA_BF. »t-Stat« prikazuje merilo občutljivosti. Večja kot je absolutna vrednost, bolj je parameter občutljiv. »P-Value« prikazuje pomembnost občutljivosti. Bolj kot se vrednost približuje 0, bolj je občutljivost pomembna.

6.1.3.2 »One-at-a-time« analiza občutljivosti

Analiza občutljivosti »One-at-a-time« prikazuje občutljivost spremenljivke na spremembe parametra, če imajo vsi ostali parametri konstantno vrednost. Problem je v tem, da ne vemo, kakšne naj bodo vrednosti konstantnih parametrov, vemo pa, da je občutljivost enega parametra, odvisna od vrednosti ostalih parametrov.



Slika 36: »One-at-a-time« analiza občutljivosti (Abbaspour, 2011)

Zgornji primer (slika 36) prikazuje prav to dejstvo. Če je parameter P1 konstanten pri vrednosti y_1 , potem majhna sprememba parametra P2 (okoli vrednosti x_1), povzroči veliko spremembo funkcije oz. načina optimizacije, torej je parameter P2 občutljiv parameter. Če pa je parameter P1 konstanten pri vrednosti y_2 , potem bodo spremembe parametra P2 (okoli vrednosti x_2), dajale vtis, da P2 ni občutljiv parameter. Zato vrednosti konstantnih parametrov vplivajo na občutljivost parametrov.

7 UMERJANJE MODELA, ANALIZA OBČUTLJIVOSTI IN REZULTATI

SWAT je po definiciji program, namenjen modeliranju velikih prispevnih površin. Z njegovo pomočjo so med drugim modelirali celoten afriški kontinent (Schuol in sod., 2008), za daljše celotno obdobje (nekaj 10 let). Model smo v nalogi aplicirali na, v primerjavi z obstoječimi raziskavami, zelo majhnem porečju in s krajšo dobo 3 mesecev.

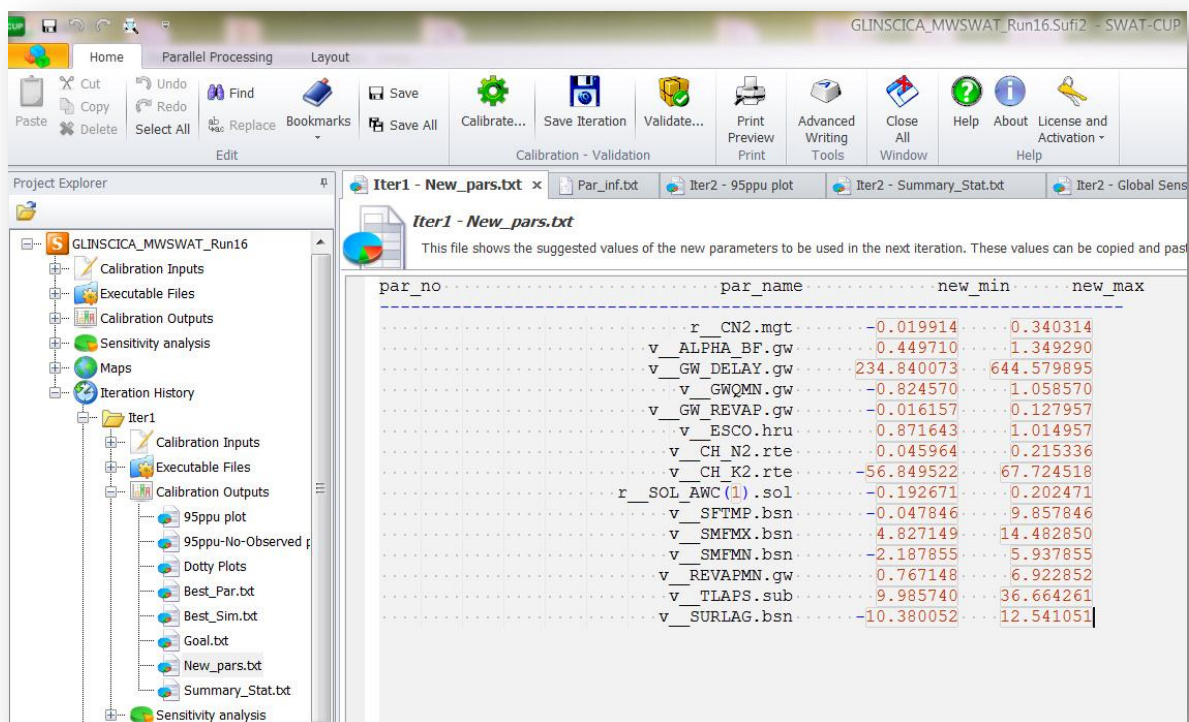
Model je bil izdelan in umirjen za obdobje 3 mesecev, od 1. novembra 2003 do 31. januarja 2004. Podatki o padavinah so bili pridobljeni iz merske postaje Pržanec (KSH FGG), ki je locirana znotraj porečja Glinščice, ostali meteorološki podatki, ki so prav tako potrebni vhodni podatek v model, pa so bili pridobljeni iz meteorološke postaje Ljubljana-Bežigrad (ARSO). V obravnavanem obdobju je padlo 330.1 mm padavin, v štirih večjih in sedmih manjših padavinskih dogodkih. Največ padavin je padlo 26. novembra 2003 in sicer 57.7 mm in 17. januarja 46.6 mm (slika 28). Vse opravljene simulacije smo primerjali s povprečnim dnevnim merjenim pretokom, merjenim na odseku Glinščice pri Biološkem središču (KSH FGG). Razlog za manjkajoče podatke v dnevih od 1. do 4. novembra 2003 in od 14. do 17. decembra, so nedelovanje instrumenta.

Statistična primerjava povprečnih dnevnih pretokov - izmerjenih in izračunanih vrednosti na odseku Glinščice pri Biološkem središču, je bila ovrednotena z P vrednostjo, R vrednostjo, koeficientom Nash-Sutcliffe in koeficientom determinacije.

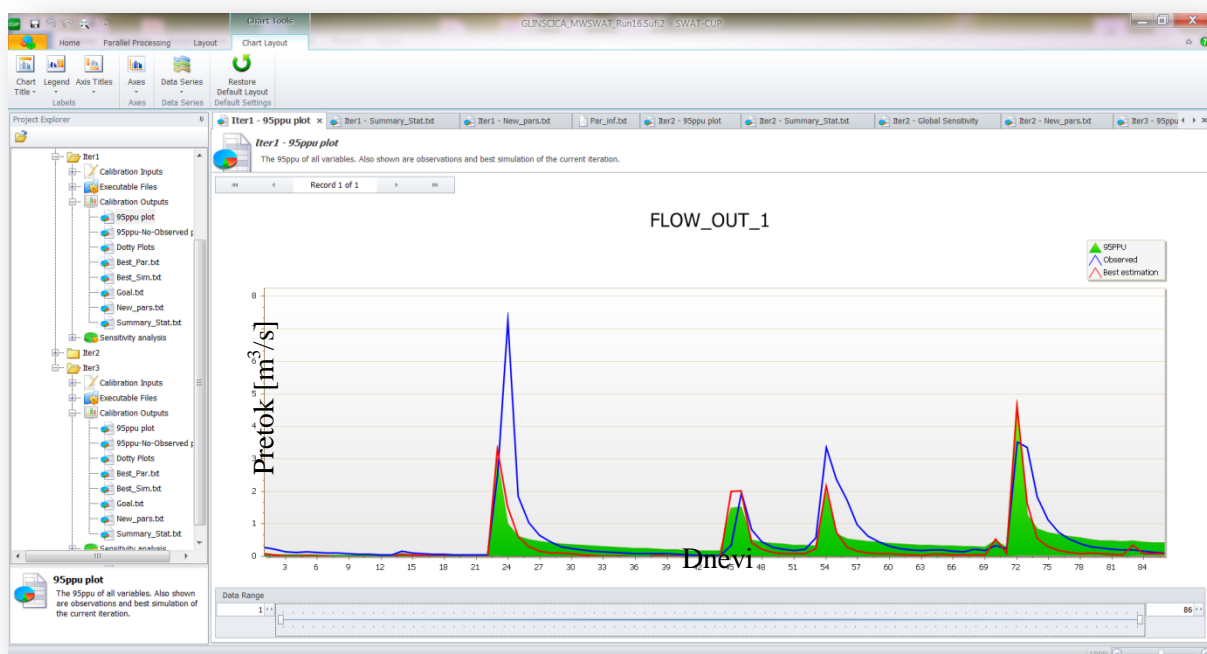
7.1 Uporaba spremenljivega koeficienta skladiščenja

7.1.1 Zagon 1

Uporabljenih je bilo vseh 15 parametrov. Opravljene so bile 3 iteracije s skupno 3000 simulacijami. V nadaljevanju so prikazani rezultati vsake iteracije.

Iteracija 1:

Slika 37: Razponi vrednosti parametrov po 1. iteraciji

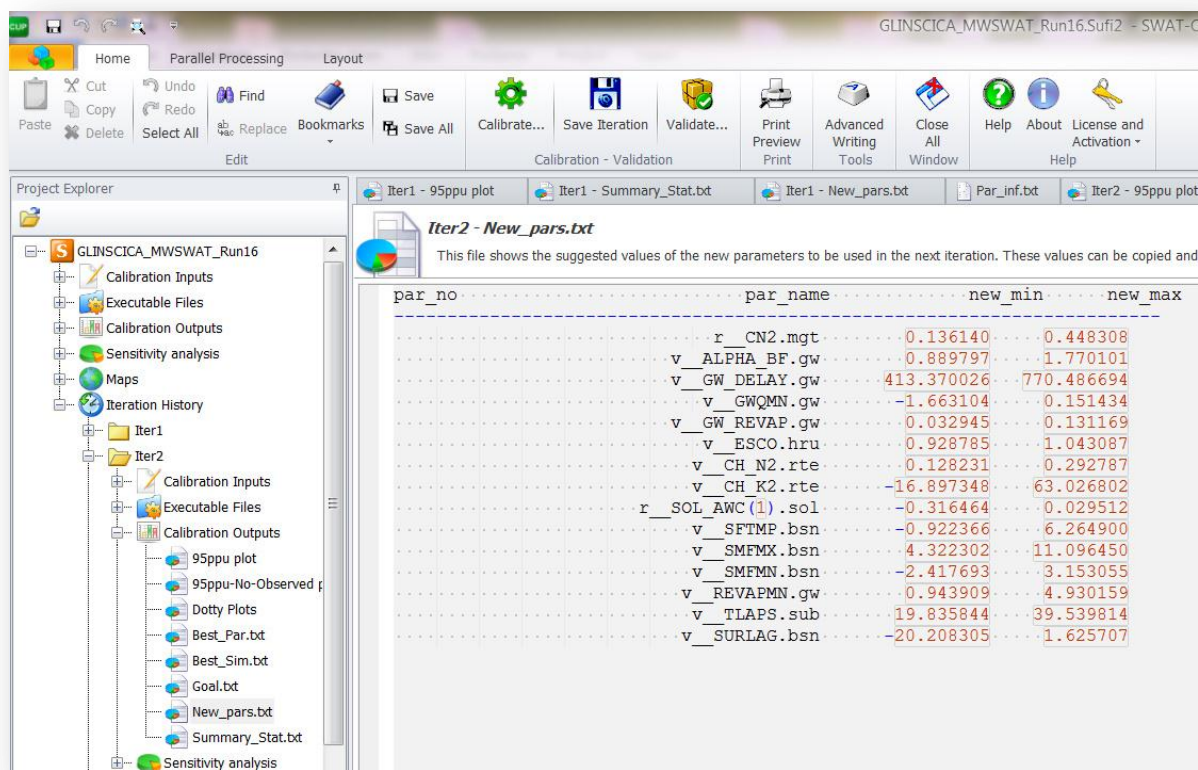


Slika 38: Merjen pretok, najboljši simuliran pretok in 95PPU po 1. iteraciji

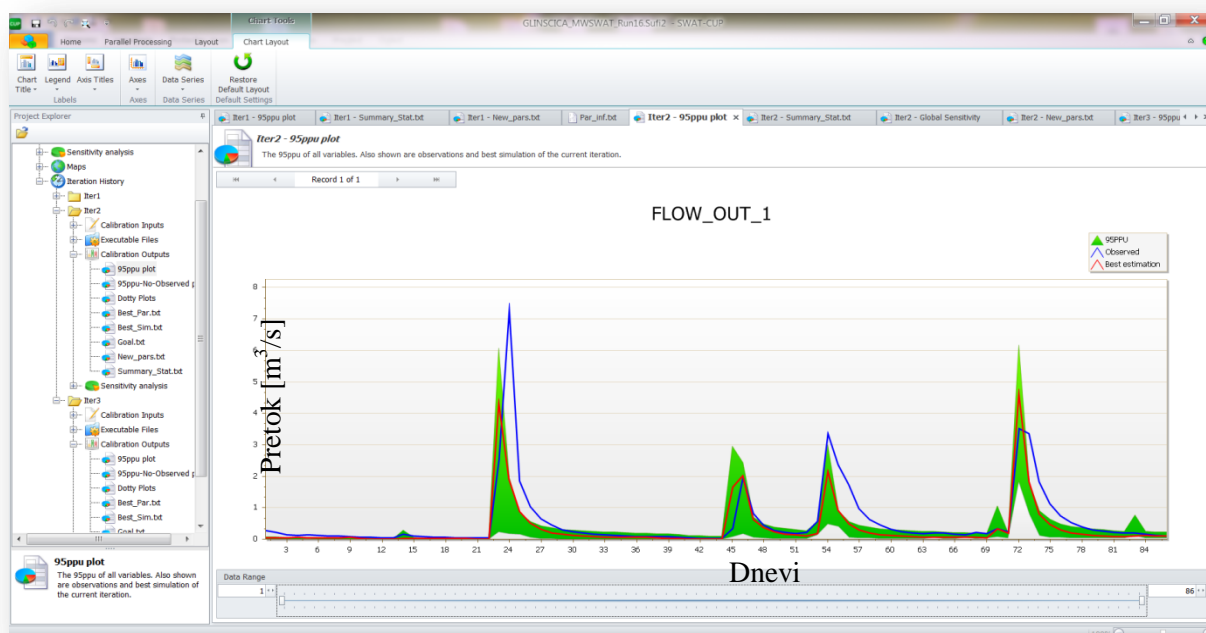
Statistični podatki ujemanja po 1. Iteraciji:

Preglednica 13: Statistični podatki ujemanja po 1. iteraciji 1. zagona

P vrednost	0.57
R vrednost	0.42
Koeficient determinacije (R^2)	0.48
Nash-Sutcliffe koeficient (NS)	0.42

Iteracija 2:

Slika 39: Razponi vrednosti parametrov po 2. iteraciji



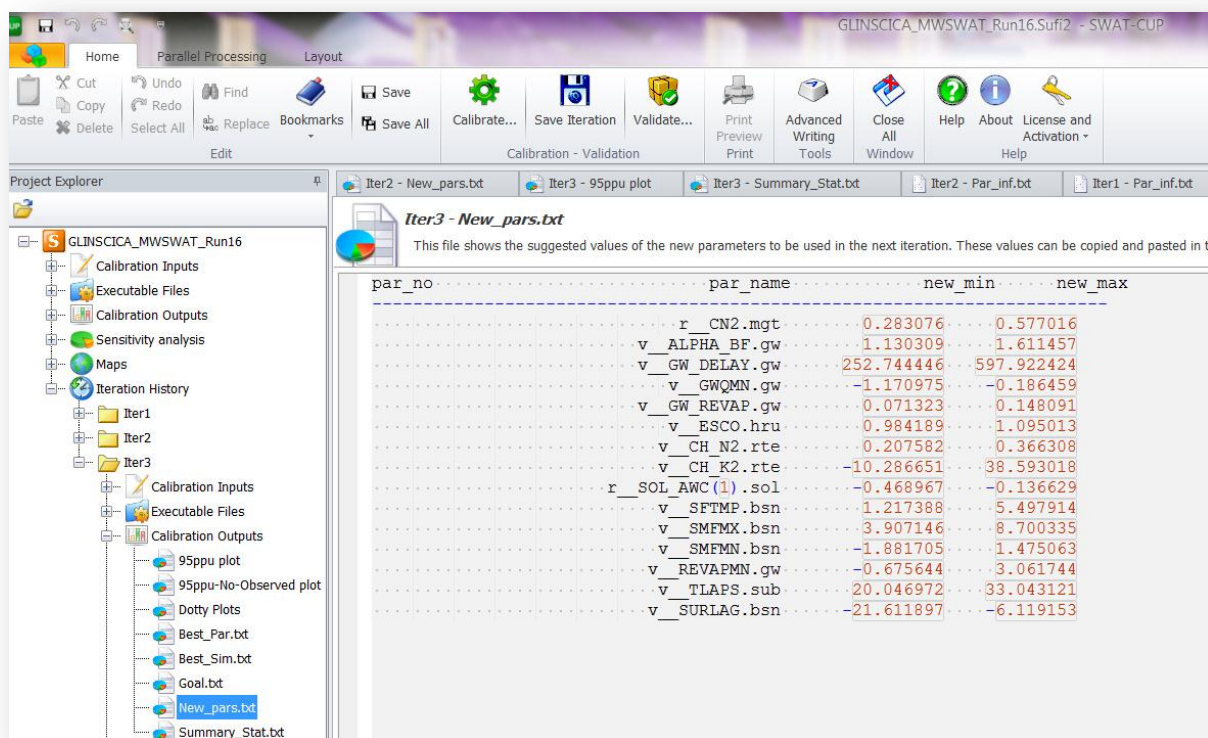
Slika 40: Merjen pretok, najboljši simuliran pretok in 95PPU po 2. iteraciji

Statistični podatki ujemanja po 2. iteraciji so predstavljeni v preglednici 14.

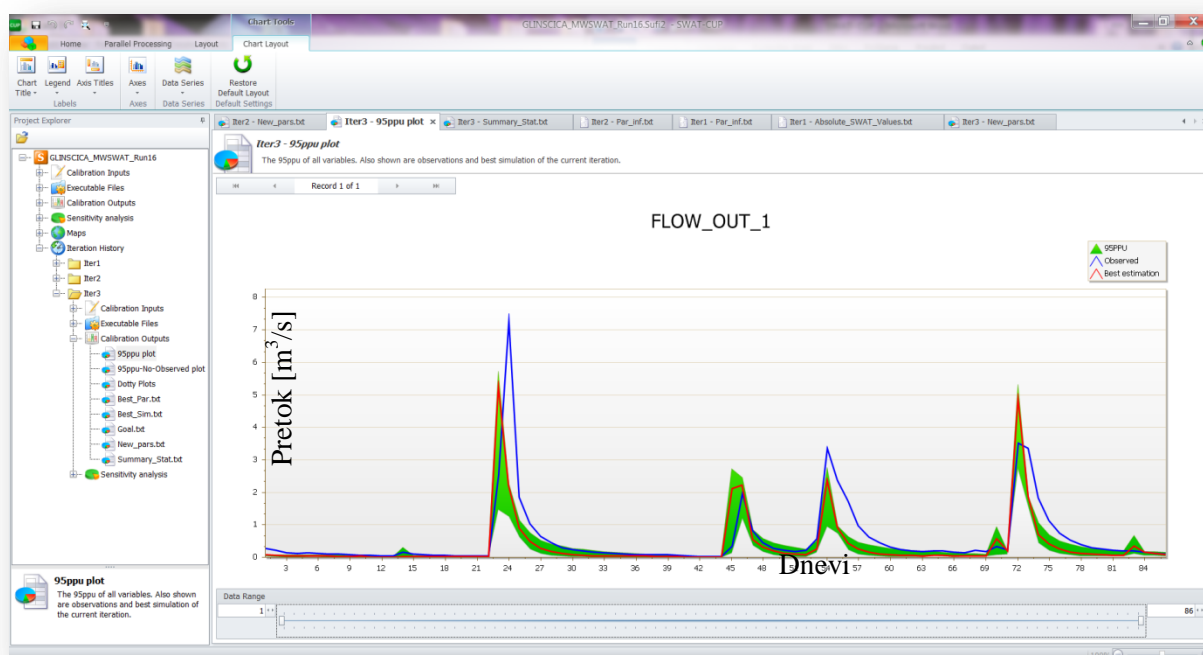
Preglednica 14: Statistični podatki ujemanja po 2. iteraciji 1. zagona

P vrednost	0.52
R vrednost	0.43
Koeficient determinacije (R^2)	0.53
Nash-Sutcliffe koeficient (NS)	0.49

Iteracija 3:



Slika 41: Razponi vrednosti parametrov po 3. iteraciji



Slika 42: Merjen pretok, najboljši simuliran pretok in 95PPU po 3. iteraciji

Preglednica 15: Statistični podatki ujemanja po 3. iteraciji 1. zagona

P vrednost	0.40
R vrednost	0.32
Koeficient determinacije (R^2)	0.50
Nash-Sutcliffe koeficient (NS)	0.45

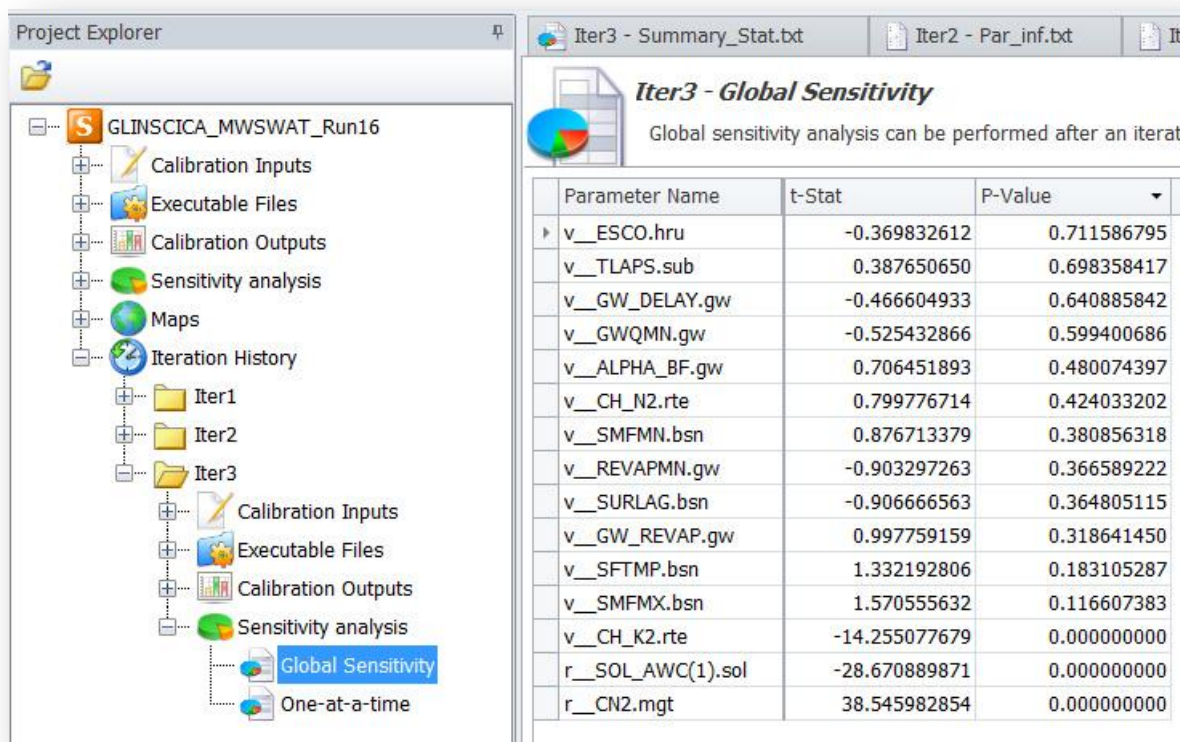
Iz grafov (slika 37, 38, 39, 40, 41, 42) je razvidno, da se pri vsaki iteraciji pas 95PPU zožuje (R vrednost) in da je največ merjenih podatkov vključenih v 95PPU v 2. iteraciji (P vrednost). Prav tako, ima najboljši statistični rezultat 2. iteracija, kjer znaša koeficient determinacije 0.53 in Nash-Sutcliffe koeficient 0.49.

Trend opazovane in simulirane premice pretoka je zelo podoben, le vrh valov je pri novembrskih padavinah podcenjen in pri januarskih precenjen. Prvi simuliran val v decembru ima ustrezno ujemanje, medtem ko je drugi nekoliko podcenjen. Padajoči del vala je pri vseh valovih podcenjen, medtem ko je bazni odtok simuliran dokaj ustrezno. Podoben trend se je pokazal pri vseh zagonih, razlika je bila le v precenjenosti oz. podcenjenosti valov in posledično v statističnih kazalcih ujemanja.

7.1.1.1 Analiza občutljivosti:

Pri vseh treh iteracijah se je pokazalo, da so najbolj občutljivi parametri CN2, SOL_AWC in CH_K2 (slika 42). Odtok s porečja je torej najbolj odvisen od začetne vrednosti koeficienta odtoka SCS CN, od zadrževanja vode v zemljini in efektivne hidravlične prevodnosti kanala. Pri vsaki iteraciji se občutljivost parametrov in njihov vrstni red nekoliko spremeni.

Ker je porečje Glinščice zelo majhno, sta parametra zamika površinskega odtoka in podzemne vode (SURLAG in GW_DELAY) ki se merita v dnevih relativno občutljiva. Ker je razpon vrednosti parametrov zelo velik (GW_DELAY od 0 do 500 dni), smo v naslednjih simulacijah dobili boljše rezultate, če omenjenih parametrov nismo umerjali z ostalimi, ampak smo za njiju pustili privzete vrednosti.

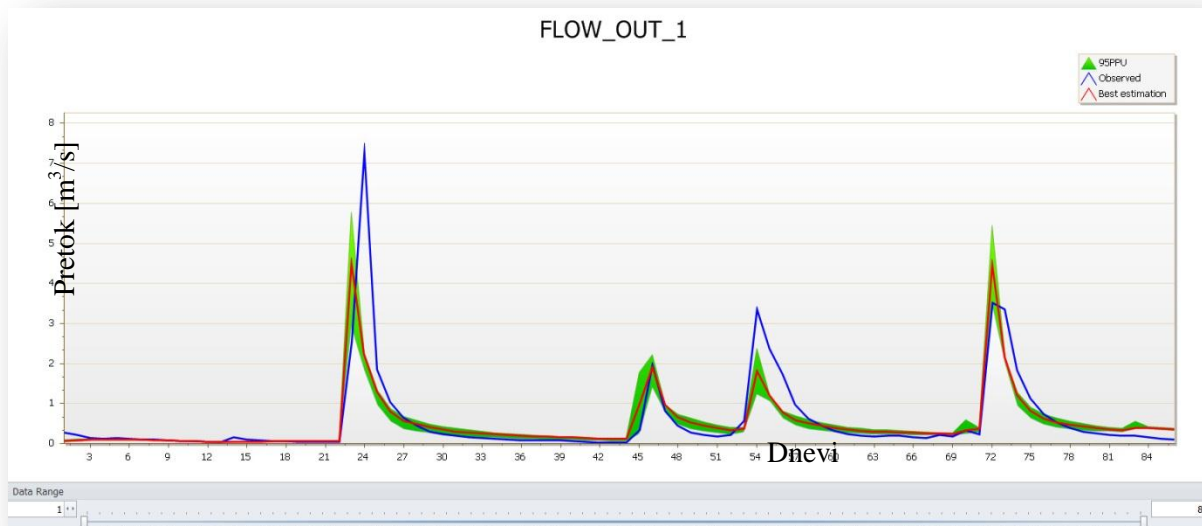


Slika 43: Globalna občutljivost parametrov po 3. iteraciji

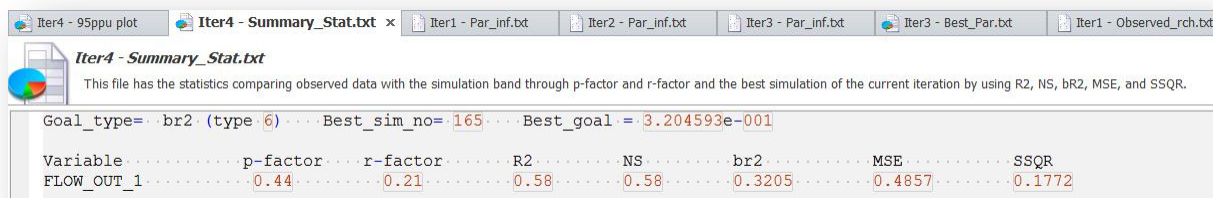
7.1.2 Zagon 2

Pri tem umerjanju modela smo uporabili 12 parametrov. Opravljene so bile 4 iteracije s skupno 2500 simulacijami.

V nadaljevanju so prikazani rezultati 4. iteracije, katere rezultati so bili najboljši. Primerjava merjenega in simuliranega pretoka, je prikazana na sliki 44.



Slika 44: Merjen pretok, najboljši simuliran pretok in 95PPU po 4. iteraciji



Slika 45: Statistični podatki ujemanja merjenega in simuliranega pretoka in kazalcev P vrednost in R vrednost, za 4. iteracijo

Trenda premic merjenega in simuliranega pretoka sta zelo podobna, tudi padajoči deli vrhov hidrograma, se lepo ujemanjo. Problematičen je prvi val, ki nastopi nekoliko prekmalu in je podcenjen, ujemanje drugega vala je ustrezno, vrh tretjega vala je zopet nekoliko podcenjen, medtem ko je četrti val za malenkost precenjen.

P vrednost znaša 0.44, kar pomeni da, 44 % merjenih podatkov pade v območje 95PPU in je glede na vrednost R, ki je 0.21 in ponazarja povprečno debelino območja 95PPU, zelo dober rezultat. Rezultat vrednosti se izboljša na račun poslabšanja druge vrednosti, torej so rezultati kompromis obeh. Zaželene R vrednosti so manjše od 1.

Koeficient ujemanja Nash-Sutcliffe znaša 0.58, prav toliko tudi koeficient determinacije (slika 45).

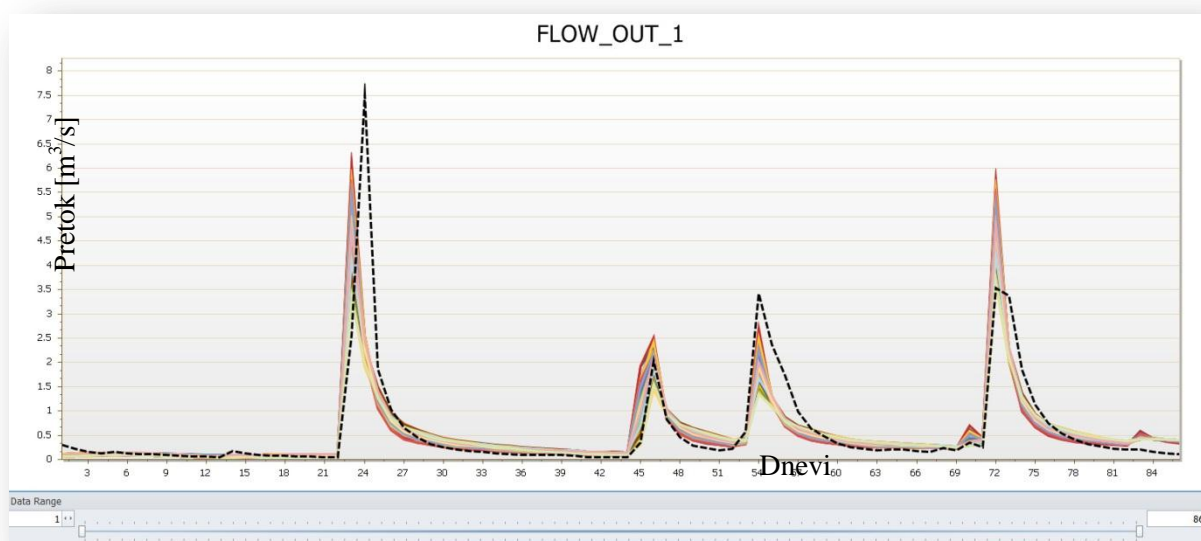
Preglednica 16: Statistični podatki ujemanja po 4. iteraciji 2. zagona

P vrednost	0.44
R vrednost	0.22
Koeficient determinacije (R^2)	0.58
Nash-Sutcliffe koeficient (NS)	0.58

7.1.2.1 Analiza občutljivosti:

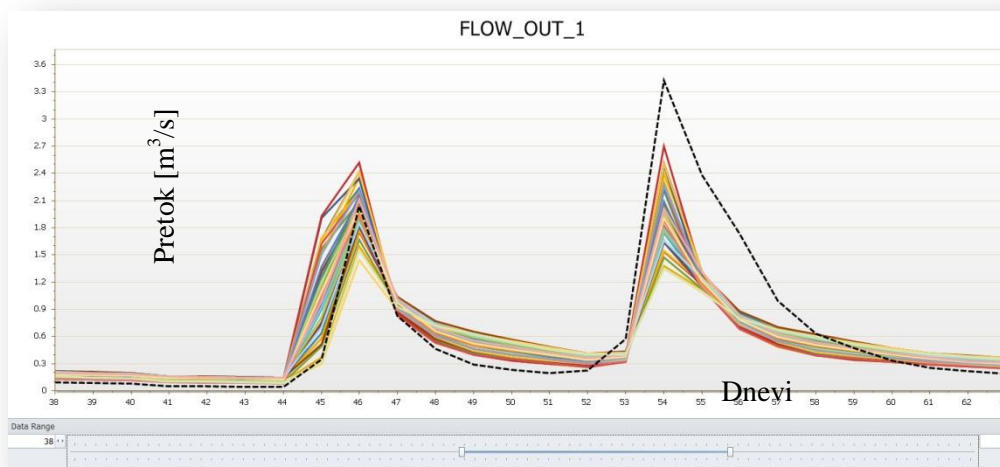
Tako kot v 1. zagonu, so bili tudi v 2. zagonu najbolj občutljivi parametri CN2, SOL_AWC in CH_K2. Za precej občutljivega pa se je izkazal tudi parameter ALPHA_BF faktor, ki vpliva na gibanje baznega odtoka. Bazni odtok je bil v 2. zagonu simuliran dokaj ustrezno in skozi proces umerjanja je opaziti, da je imel omenjeni parameter največ vpliva na bazni odtok in da je bil rezultat kombinacije s parametroma SURLAG in GW_DELAY, ki vplivata na zamik odtoka, slabši. Zato v tem primeru parametra nista bila upoštevana.

Na sliki 46 je prikazana »one-at-time« analiza občutljivosti, pri kateri so na enem grafu prikazane vse kombinacije parametrov, torej rezultati vseh simulacij, znotraj ene iteracije. Merjen pretok je označen s črtkano črto in vsaka simulacija z drugo barvo. Rezultat iteracije je simulacija z najboljšim ujemanjem. Iz slike 45 je razvidno, da je v 4. iteraciji, simulacija številka 165 dala najboljše rezultate.



Slika 46: »One-at-a-time« analiza občutljivosti

Detajl »One-at-a-time« analize občutljivosti, prikazuje slika 47 na kateri je vsaka simulacija označena z drugačno barvo.

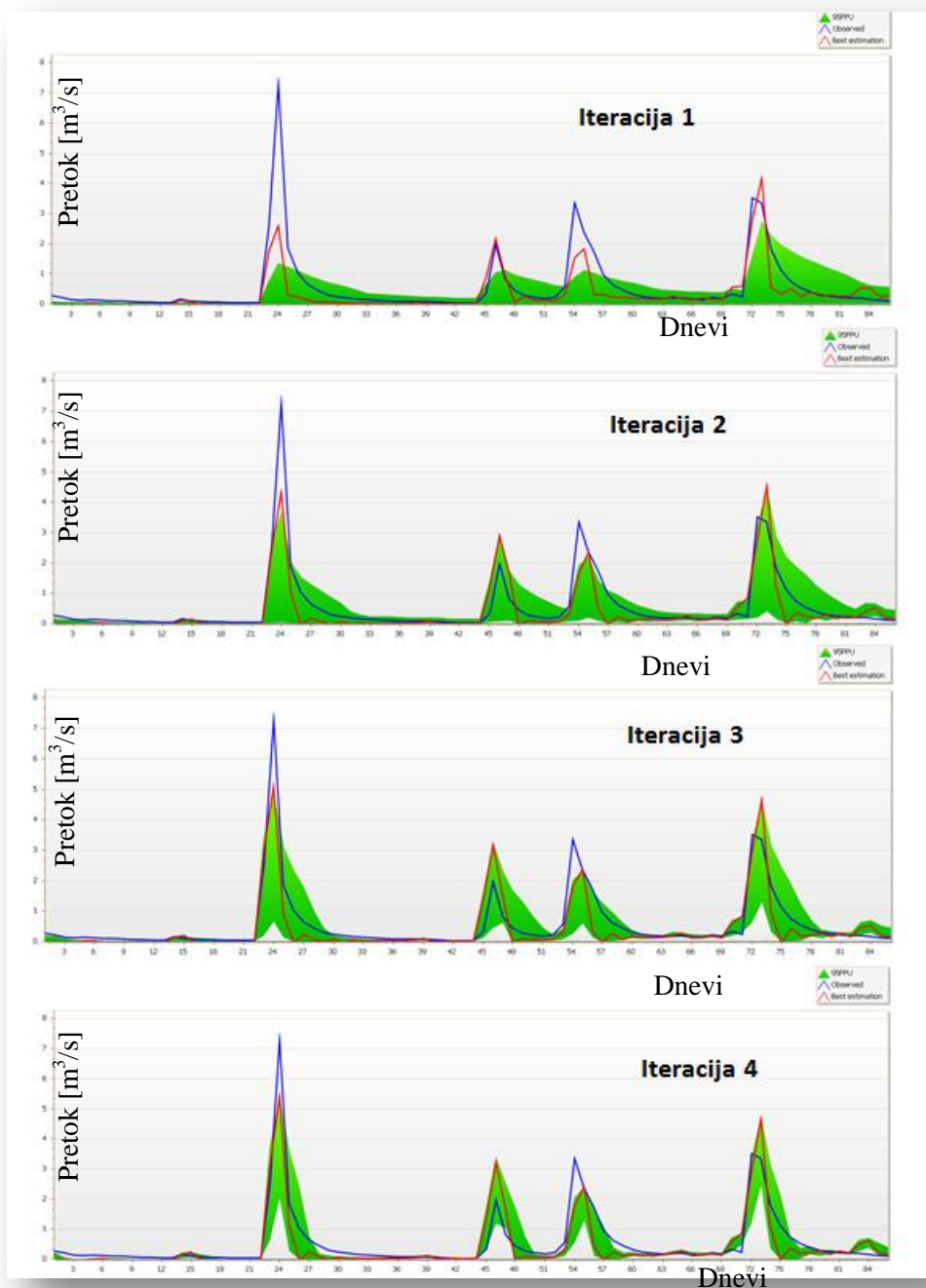


Slika 47: »One-at-a-time« analiza občutljivosti, detajl

7.2 Uporaba Muskingumove metode

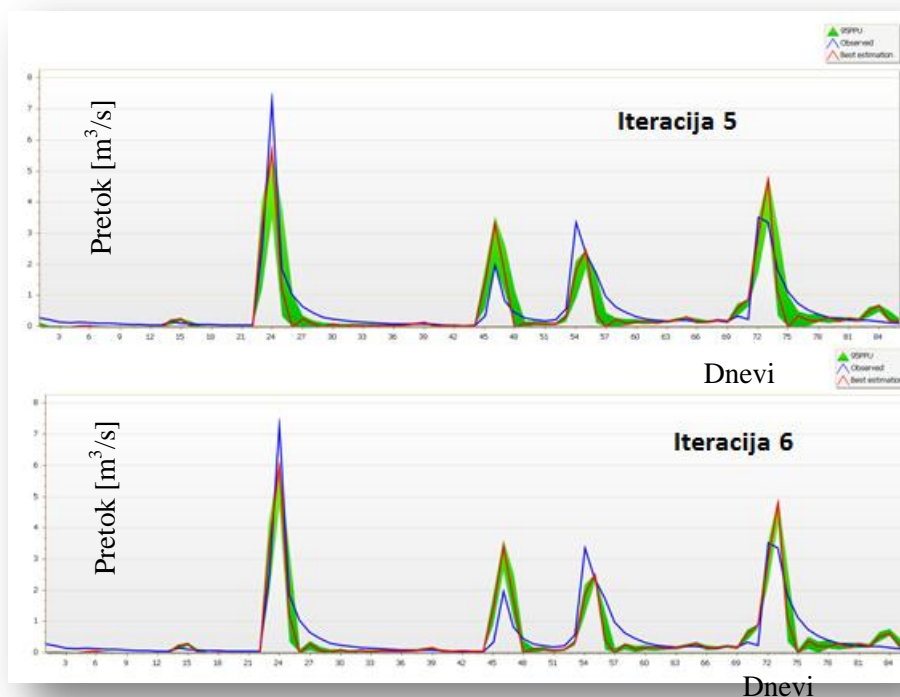
7.2.1 Zagon 3

Na sliki 48 je prikazan proces umerjanja modela z uporabo Muskingumove metode skladiščenja in prenosa vode. Opravljenih je bilo 6 iteracij z skupno 6000 simulacijami.



se nadaljuje...

...nadaljevanje slike 48



Slika 48: Proces umerjanja modela, z uporabo Muskingumove metode skladiščenja in prenosa vode

Trend simuliranega pretoka 6. iteracije umerjenega modela z Muskingumovo metodo je na prvi pogled zelo podoben pretoku, simuliranemu z metodo spremenljivega koeficienta skladiščenja. Vrh prvega vala je v primerjavi z drugo metodo časovno ustrežnejši in tudi manj podcenjen. Drugi in četrti val sta precenjena, medtem ko je tretji val podcenjen. Padajoči deli valov in bazni odtok, ki je večino časa podcenjen, so simulirani slabše. Bazni odtok je »nemiren«, skozi celotno simulacijo se pojavlja valovanje baznega odtoka.



Slika 49: Statistični podatki ujemanja merjenega in simuliranega pretoka in kazalcev P vrednost in R vrednost, za 6. iteracijo

Statistični podatki ujemanja za 6. iteracijo (slika 49) so boljši od podatkov ujemanja pri metodi spremenljivega koeficienta skladiščenja. Nash-Sutcliffeov koeficient znaša 0.79, koeficient determinacije pa 0.81, kar pomeni, da je rezultat relativno dober.

Preglednica 17: Statistični podatki ujemanja po 6. iteraciji 3. zagona

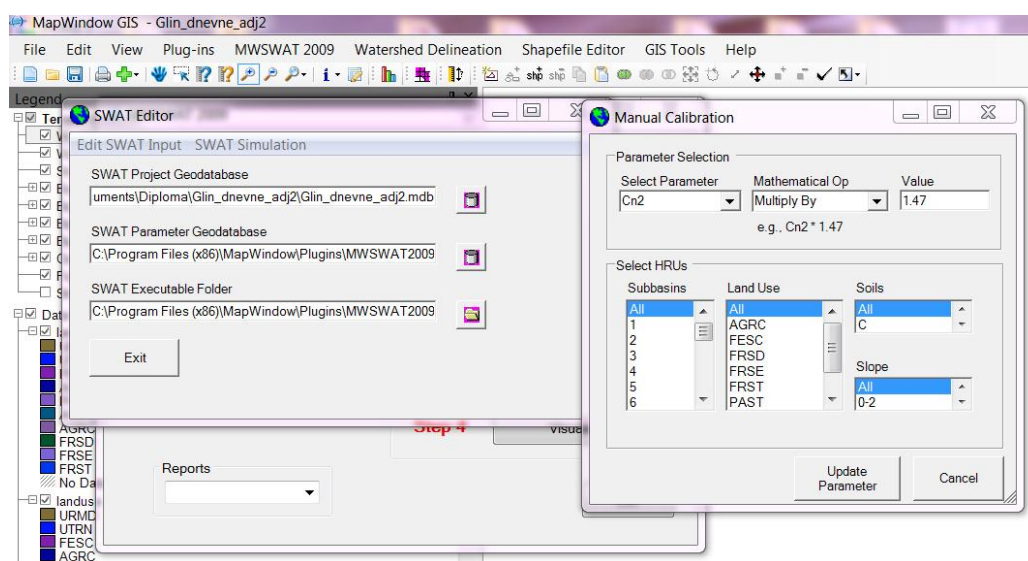
P vrednost	0.30
R vrednost	0.26
Koeficient determinacije (R^2)	0.81
Nash-Sutcliffe koeficient (NS)	0.79

Za najbolj občutljiv parameter, se je izkazal Manningov koeficient hrapavosti glavnega kanala CH_N(2), kar je razumljivo, saj je pretok izračunan z Manningovo enačbo, ki je najbolj odvisna prav od Manningovega koeficienta hrapavosti.

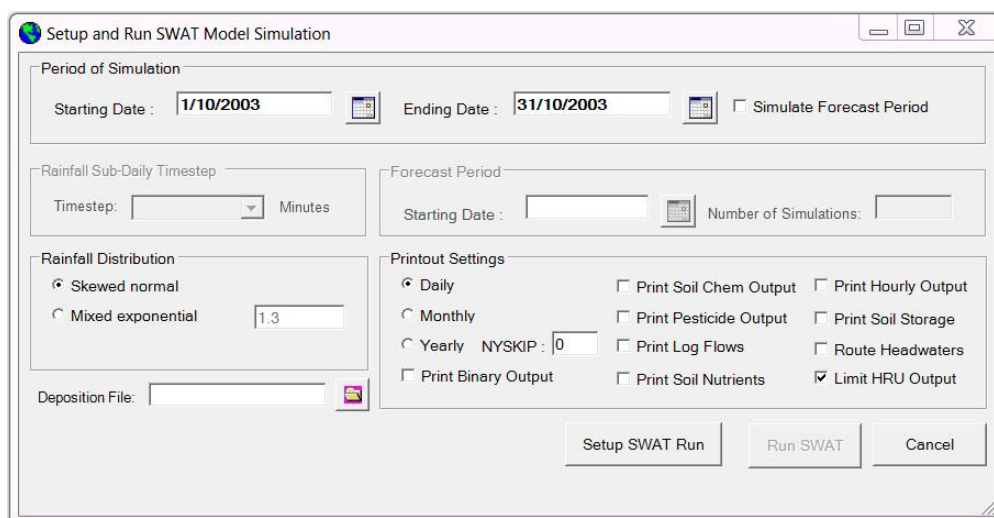
8 VALIDACIJA MODELA

Validacija je pomemben proces pri izdelavi hidrološkega modela, saj na ta način model preverimo in ovrednotimo njegovo uporabo v prihodnosti. Validacijo smo opravili v dveh mesecih in sicer v prvi polovici oktobra 2003 in februarju 2004, torej mesec pred in mesec po umerjanju modela.

Validacija je potekala na način, da smo 12 umerjenih parametrov iz 2. zagona (poglavje 7.1.2), dobljenih po analizi SUFI2 v programu SWAT-CUP4 s pomočjo SWT urejevalnika (angl. *Editor*), vnesli v model in model ponovno zagnali (sliki 50 in 51).

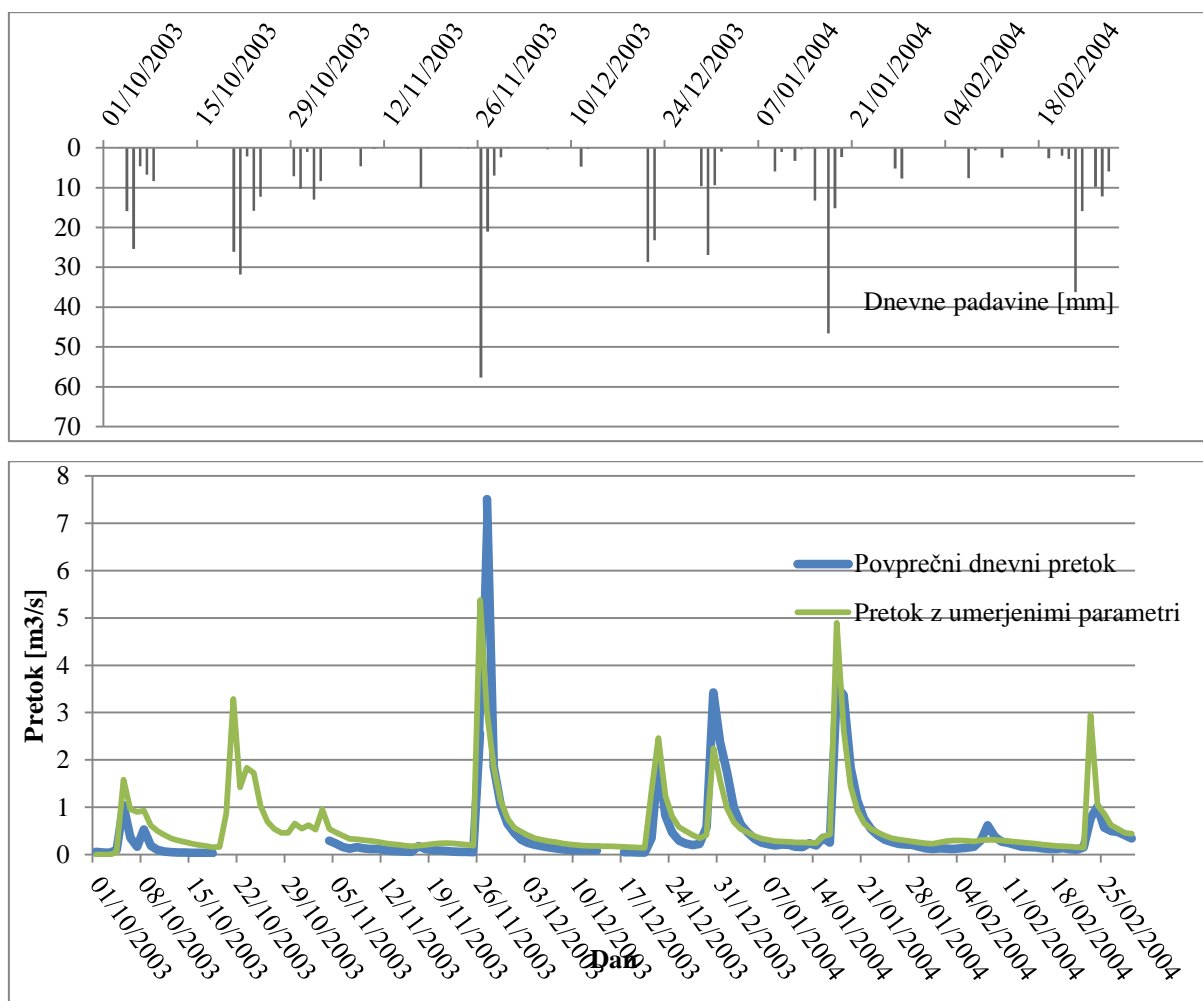


Slika50: Funkcija ročnega vnosa parametrov («Manual Calibration») s programom SWAT urejevalnik («Editor»).



Slika 51: Ponovni zagon simulacije po spremembi parametrov

Rezultati validacije so slabši od rezultatov umerjanja, razlogov za to je več. Obdobje umerjanja traja 3 mesece, kar po našem mnenju ni dovolj, da bi vsi fizikalni procesi prisotni na porečju, bili v celoti upoštevani tudi na končnih vrednostih parametrov. Model je bil umerjen na 3 zimske mesece, ki so imeli v povprečju precej padavin in pretok je bil v tem času relativno visok, kar se odraža v tem, da je pretok validacijskega obdobja konstantno precenjen. Trend opazovanega in simuliranega pretoka je sicer ustrezen.



Slika 52: Primerjava povprečnega dnevnega pretoka in simuliranega pretoka v obdobju umerjanja in validacije

Na sliki 52 je prikazana primerjava merjenega pretoka in pretoka z 12 umerjenimi parametri v obdobju umerjanja in validacije. Merjeni podatki o pretoku, od 15. 10. 2003 do 4. 11. 2003 niso bili na voljo.

Pretok v mesecu oktobru je konstantno precenjen, prav tako bazni odtok. Temperature so bile v primerjavi z meseci umerjanja relativno visoke, saj temperatura nikoli ni padla pod 0 °C, kar je bila v mesecih umerjanja stalna praksa. To bi lahko pomenilo, da upoštevanje parametrov taljenja snega

SMFMX.bsn, SMFMN.bsn in parametra SFTMP.bsn v obdobju validacije ni pripomoglo k izboljšanju rezultata.

Podobno kot v mesecu oktobru 2003, je tudi v mesecu februarju 2004 simuliran pretok v obdobju validacije precenjen, z izjemo konice na dan 8. 2. 2004, kjer je pretok podcenjen. Ujemanje baznega odtoka je ustrezno, tudi padajoči del hidrograma po padavinah 23. 2. in 24. 2. 2004 je simuliran ustrezno. Odstopanje je precejšnje dne 24. 2. 2004, ko je simulirana konica pretoka precenjena.

Rezultati validacije so bili pričakovani. Vsekakor bi bili boljši, če bi pretok umerili v daljšem časovnem obdobju. Na ta način bi upoštevali več naravnih dejavnikov, razlike ob menjavi letnih časov, pojav ekstremnih padavinskih dogodkov idr. in fizični procesi ki se vršijo na porečju bi bili bolj celostno zajeti v umerjenih parametrih. Običajno privzeta obdobja umerjanja z modelom SWAT trajajo več let, saj je potrebna t.i. »warm-up perioda« (Neitsch in sod., 2005; Faramarzi in sod., 2008; Schoul in sod., 2008). SWAT je kontinuirni model, narejen za simulacijo daljših obdobj in manj za simulacijo posameznih poplavnih valov (Neitsch in sod., 2005). Ker je bil cilj naloge spoznavanje delovanja programa SWAT in njegovih s hidrologijo povezanih komponent ter analiza možnosti uporabe modulov programa, ki se nanašajo na filzikalne pojave gibanja vode pri oblikovanju površinskega odtoka, je seveda naš namen dosežen.

9 ZAKLJUČKI

Intenziteta poplavnih dogodkov in njihova pogostost na spremembe prostora, ki jih povzroči človek, so glavni vzroki hujših poplav, ki so v zadnjih letih vse večkrat prisotne. Površinski odtok padavinskih vod je odvisen od številnih dejavnikov in značilnosti prispevne površine. Na velikost odtoka, zadrževanje in pronicanje vode pod zemljo, njeno izhlapevanje in ostale hidrološke procese vplivajo lega in topografija terena, pokrovnost tal oz. poraščenost tal, lega ulic, način odvodnjavanja meteornih vod, podnebne in številne druge značilnosti. Tako je pri modeliranju odtoka, pomembno dobro analizirati obravnavano območje in v izračun zajeti čim več fizikalnih in fizičnih parametrov, ki vplivajo na padavinski odtok po površini.

Pri modeliranju simulacij procesov s SWAT-om, ki je v osnovi namenjen napovedovanju in oceni različnih naravnih in človeških vplivov na vodo, donosov sedimentov in transporta hranil s kmetijskih površin in je zasnovan za večje prispevne površine in daljše simulacije, pa ima ključno vlogo pravilna izbira parametrov, kateri v empiričnih enačbah predstavljajo fizične procese v naravi. Z modelom SWAT, delujočim v programskem okolju MapWindow, smo vzpostavili model porečja Glinščice na osnovi vhodnih podatkov, ki so za izračun potrebni in model umerili na merjene vrednosti treh mesecev.

Razgibanost zemeljskega površja v program vnesemo z digitalnim modelom višin (DMV), ki predstavlja zvezne ploskve, določene s končno množico višin, izmerjenih glede na srednji nivo morja. Na osnovi DMV in vnešenega vodotoka, program avtomatsko določi razvodnico in porečje razdeli na podporečja. Digitalni model višin prekrijemo z mrežo celic, ki predstavljajo rabo tal in talne tipe, na osnovi katerih program tvori hidrološke odzivne enote (HRU). HRU so osnovna enota modeliranja v SWAT-u in predstavljajo območja z enotnim tipom, rabo tal ter naklonom terena. Umerjanje rezultatov smo opravili s programom SWAT-CUP4.

SWAT omogoča simulacijo procesov upoštevajoč različne empirične metode. Izbira metode računa potencialne evapotranspiracije se je pokazala za neobčutljivo, tako je bila v vseh primerih uporabljena metoda Penman-Monteith. Infiltracijo vode oz. izgube SWAT računa z dvema metodama in sicer metodo SCS modela padavinskih izgub ter metodo Greena in Ampta. V danem primeru, se je metoda SCS izkazala za bolj primerno, saj je presežek padavin ocenjen kot funkcija celotnih padavin, pokrovnosti tal, rabe tal in predhodnih vlažnostnih pogojev, medtem ko metoda Greena in Ampta neposredno določi količino infiltracije kot funkcijo fronte vlaženja ter efektivne hidravlične prevodnosti (King in sod., 1999). Največji vpliv na rezultate, pa je imela izbira metode prenosa poplavnega vala. Obe metodi, sta dali zadovoljive rezultate, statistični koeficient korelacije, pa so bili pri uporabi Muskingumove metode ujemnejši. Nash-Sutcliffeov koeficient ujemanja umerjenega

pretoka z merjenim, je znašal 0.79. Oblika hidrograma, se po obeh izbranih metodah dobro ujema z merjenim. Največje odstopanje se pojavi pri vršnih pretokih, torej pri konicah poplavnega vala. Prvi in tretji poplavni val sta konstanto podcenjena, kar lahko predstavlja problem, saj to pomeni da nismo na varni strani. Podcenjenost oz. netočnost konic pretokov je lahko posledica različnih vzrokov. SWAT je model, namenjen daljšim, neprekinjenim simulacijam, zato je njegova uporaba na posameznih poplavnih dogodkih lahko vprašljiva (Neitsch in sod., 2005; Faramarzi in sod., 2008; Schoul in sod., 2008). Tudi velikost porečja Glinščice in raba tal na območju precej odstopata od velikosti praviloma kmetijskih porečij, ki jim je SWAT v osnovi namenjen (Neitsch in sod., 2005). Kljub temu so rezultati, upoštevajoč omenjena dejavnika, zelo dobri, na kar kažejo statistični parametri.

Validacijo smo opravili na dveh mesecih in sicer oktobra 2003 in februarja 2004. Trend ujemanja rezultatov validacijskega obdobja je ustrezen, problematične so konice pretokov, ki so v večini primerov precenjene. To je zagotovo posledica kratkega obdobja umerjanja in (pre)velikih razlik naravnih dejavnikov v obdobju umerjanja in obdobju validacije in dejstva, da je bil model umerjen v mesecih, ko je bilo padavin veliko in je bil pretok večji. Rezultate bi izboljšali z veliko daljšim obdobjem umerjanja in validacije.

Rezultati naloge so pokazali, da lahko na podlagi javno dostopnih podatkov o reliefu (digitalni model višin Geodetska uprava Republike Slovenije), podatkov o vremenu (Agencija republike Slovenije za okolje) in programske opreme odprtega vira (www.swatmodel.tamu.edu, www.waterbase.org, www.mapwindow.org, www.neprashtechology.ca), dobimo zadovoljive rezultate padavinskega odtoka. Uporaba programa je precej zahtevna in kompleksna, prav tako umerjanje, ključnega pomena pa so izkušnje modelerja, poznavanje prispevnega območja in povezava parametrov v SWAT-u s fizikalnimi procesi v naravi.

VIRI

Abbaspour, K. C., Johnson, C. A., Th. van Genuchten, M. 2004. Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. *Vadose Zone Journal* 3: 1340-1352.

Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., Srinivasan, R. 2006. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology* 333: 413-430.

Abbaspour, K. C. 2011. SWAT-CUP4: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual. Eawag: 103 str.

Arhiv agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO). 2009. Ljubljana, Urad za meteorologijo.

Arnold, J. G., Williams, J. R., Maidment D. R. 1995. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins. *Journal of Hydraulic Engineering* 121, 2: 171-183.

Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams J. R., Haney, E. B., Neitsch, S. L. 2011. Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation, Version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report No. 365. Texas, A&M University System College Station: 643 str.

Atlas okolja, 2011.

http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso (Pridobljeno 16. 11. 2011.)

Bajc, U. 2010. Pogreški pri meritvah in izračun popravka. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za okoljsko gradbeništvo (samozaložba U. Bajc): 198 str.

Bonacci, O. 1994. Oborine, glavna ulazna veličina u hidrološki ciklus. Split, Geing: 341 str.

Borah, D. K., Arnold, J. G., Bera, M., Krug, E.C., Liang, X. 2007. Storm event and continuous hydrologic modeling for comprehensive and efficient watershed simulations. *Transactions of the ASAE* 42, 4: 919-925.

Bouwer, H. 1969. Infiltration of water into nonuniform soil. Journal Irrigation and Drainage Div., ASCE 95, IR4: 451-462.

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

Brilly, M., Šraj, M. 2006. Modeliranje površinskega odtoka in navodila za program HEC-HMS. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 172 str.

Cesar, P. 2010. Meritve in izračun evapotranspiracije. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Vodarstvo in komunalno inženirstvo (samozaložba P. Cesar): 63 str.

Corine Land Cover 2000.

<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/> (Pridobljeno 18. 11. 2011.)

Chow, V. T., Maidment D. R., Mays, W. L. 1988. Applied Hydrology. New York, McGraw-Hill: 572 str.

DHD modeliranje, projektiranje in meritve v hidrotehniki d.o.o. 2012.

<http://www.dhd.si/model.html> (Pridobljeno 12. 3. 2012.)

Dirnbek, L. 2009. Vpliv histograma padavin na hidrogram odtoka. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba L. Dirnbek): 86 str.

Faramarzi, M., Abbaspour, K. C., Schulin, R., Yang. H. 2008. Modelling blue and green water resources availability in Iran. Hydrological processes 23: 486-501.

Fiering, M. B. 1967. Streamflow synthesis. Cambridge, Harvard University Press.

Geopedia, 2011.

<http://www.geopedia.si/> (Pridobljeno 16. 11. 2011.)

George, C., Leon, L. F. 2007. SWAT in an open source GIS. The open hydrology journal 1: 19-24.

George, C., Leon, L. F., Sharma, V. 2007. WaterBase: Prototype of open source toolkit for environmental modeling using SWAT in MapWindow. Praga, Isess: 9 str.

Glavan, M. 2007. Investigation of the Impact of Land Use Management Scenarios on Diffuse Source Nutrients in the River Axe Catchment. Research Thesis. Cranfield, Cranfield University, School of Applied Sciences. Natural Resources Department: 206 str.

Hershfield, D. M. 1961. Rainfall frequency atlas of the United States for durations from 30 minutes to 24 hours and return periods from 1 to 100 years. U.S.Dept. Commerce Tech. Paper No. 40.

Huber, W. C. and R. E. Dickinson. 1988. Storm water management model, version 4: user's manual. U.S. Athens, Environmental Protection Agency.

ICPVO. Atributni podatki pedokartografskih enot. Message to: Kovačec, M. 13. 12. 2011. Osebna komunikacija.

Jordan, J. 2010. Poskusne meritve infiltracije na različnih tipih tal z mini disk infiltrimetrom. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za okoljsko gradbeništvo (samozaložba J. Jordan): 132 str.

King, K. W., Arnold, J. G., Bingner, R. L. 1999. Comparison of Green-Ampt and curve number methods on Goodwin Creek watershed using SWAT. Transactions of American Society of Agricultural Engineers. ASAE 42, 4: 919-925.

Kovačec, M. 2011. Hidrološko modeliranje z modelom SWAT. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Vodarstvo in komunalno inženirstvo (samozaložba M. Kovačec): 74. str.

Lane, L. J. 1982. Distributed model for small semi-arid watersheds. Journal of the Hydraulics Division. American Society of Civil Engineers. ASCE 108, HY10: 1114-1131.

Lane, L. J. 1983. Soil Conservation Service. National engineering handbook. Sekcija 4: Hydrology. Poglavje 19: Transmission Losses. Washington, D. C., U. S. Government Printing Office: Str. 19-1–19-21.

Leonard, R. A., Knisel, W. G., Still, D. A. 1987. GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems. American Society of Agricultural Engineers. ASAE 30, 5: 1403-1428.

MapWindow, 2011.

<http://www.mapwindow.org/> (Pridobljeno 14. 6. 2011.)

Mikoš, M., Kranjc, A., Matičič, B., Muller, J., Rakovec, J., Roš, M., Brilly, M. 2002. Hidrološko izrazje = Terminology in hydrology. Acta hydrotehnica 20, 32.

ftp://ftp.cgs.si/Uporabniki/UrosZ/mike/a32_1.pdf (Pridobljeno 20. 2. .2012.)

Pedološka karta. Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano. 2011.

<http://rkg.gov.si/GERK/> (Pridobljeno 15. 11. 2011.)

Natural Resources Conservation Service Soil Survey Staff. 1996. National soil survey handbook, title 430-VI. Washington D. C., U. S. Government Printing Office.

Nearing, M. A., B. Y. Liu, L. M. Risse, and X. Zhang. 1996. Curve number and Green-Ampt effective hydraulic conductivities. Water Resources Bulletin 32: 125-136.

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R. 2011. Soil and water assesment tool. Input/output file documentation. Version 2009. Texas, Texas Water Resources Institute Technical Report No. 365, Texas A&M University Sistem, College Station: 644 str.

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R. 2011. Soil and water assesment tool theoretical documentation. Version 2009. Texas, Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406, Texas A&M University Sistem, College Station: 618 str.

Nicks, A. D. 1974. Stochastic generation of the occurrence, pattern, and location of maximum amount of daily rainfall. Proceedings Symposium. Statistical Hydrology. Tuscon AZ, U.S. Department of Agriculture, Publ. No. 1275. Aug.-Sept. 1971: 154-171.

Pestotnik, S. 2011. Hidrološki model Glinščice s programom Flo-2D. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Vodarstvo in komunalno inženirstvo (samozaložba S. Pestotnik): 82 str.

Prus, T. Pedološke značilnosti prispevnega območja Glinščice. Osebna komunikacija, (15.1.2012).

Rallison, R. E., Miller, N. 1981. Past, present and future SCS runoff procedure. V: Singh, V. P. (ur.). Rainfall runoff relationship. Water resources publication, Littleton, CO8: str. 353-364.

Rawls, W. J. and D. L. Brakensiek. 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. V: Jones, E. B. (ur.), Ward T. J. (ur.). Watershed management in the 80's. ASCE, New York, N. Y.: str. 293-299.

Ritchie, J. T. 1972. A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. Water Resources Research 8: 1204-1213.

Rusjan S. 2003. Sonaravno urejanje vodotokov - primer ureditve odseka Glinščice na območju Viča, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva (samozaložba S. Rusjan): 83 str.

Schuol, J., Abbaspour, K. C., Yang, H., Srinivasan, R., Zehnder, A. J. B. 2008. Modeling blue and green water availability in Africa. Water resources research 44, W07406: 18 str.

Schuol, J., Abbaspour, K. C., Srinivasan, Yang, H. 2008. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model. Journal of Hydrology 352: 30-49.

Stepančič, D., Lobnik, F., Prus, T. 1982. Pedološke raziskave melioracijskega objekta Laboratorijsko polje. Biotehniška fakulteta v Ljubljani, Ljubljana, VTOZD za agronomijo: 8 str.

SWAT: Soil and Water Assessment Tool.

<http://swatmodel.tamu.edu/> (Pridobljeno 14.6.2011.)

SWAT-CUP4.

<http://www.neprashtechology.ca/Default.aspx> (Pridobljeno 20.2.2012.)

Škrbec, G. 2005. Hidrološki model Glinščice z Gradaščico. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva (samozaložba G. Škrbec): 99 str.

Šraj, M. 2000. Uporaba šifranta padavinskih območij vodotokov RS za pripravo hidroloških modelov. Magistrski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 109 str.

Štajdohar, M. 2005. Analiza vpliva urbanizacije na režim odtoka Glinščice. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva (samozaložba M. Štajdohar): 92 str.

USDA Soil Conservation Service. 1983. National Engineering Handbook. Washington D. C.: Sekcija 4 Hydrology, Poglavlje 19.

USDA 2001. Rangeland Soil Quality – Infiltration.

<http://soils.usda.gov/sqi/management/files/RSQIS5.pdf> (Pridobljeno 8.6.2011.)

Waterbase projekt 2011.

<http://www.waterbase.org/> (Pridobljeno 8.6.2011.)

Williams, J. R. 1969. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. Transactions of ASAE 12, 1: 100-103.

Williams, J. R., Jones, C. A., Dyke, P. T. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. Transactions of American Society of Agricultural Engineers ASAE 27, 1: 129-144.

Williams, J. R. 1995. The EPIC Model. In Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications. Highlands Ranch: str: 909-100.

Winter, T. C. 1981. Uncertainties in estimating the water balance of lakes. Water Resources Bulletin 17: 82-115.