

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Mole, M., 2016. Hidrološko modeliranje potoka Mačkov graben s programoma Flo-2D in Hec-HMS. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Šraj, M., somentor Rusjan, S.): 62 str.

Datum arhiviranja: 27-07-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Mole, M., 2016. Hidrološko modeliranje potoka Mačkov graben s programoma Flo-2D in Hec-HMS. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Šraj, M., co-supervisor Rusjan, S.): 62 pp.

Archiving Date: 27-07-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
HIDROTEHNIČNA SMER

Kandidat:

MARKO MOLE

**HIDROLOŠKO MODELIRANJE POTOKA MAČKOV
GRABEN S PROGRAMOMA FLO-2D IN HEC-HMS**

Diplomska naloga št.: 3473/HS

**HYDROLOGICAL MODELING OF MAČKOV GRABEN
USING FLO-2D AND HEC-HMS**

Graduation thesis No.: 3473/HS

Mentorica:

doc. dr. Mojca Šraj

Somentor:

doc. dr. Simon Rusjan

Član komisije:

Ljubljana, 08. 07. 2016

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

IZJAVE

Spodaj podpisani študent MARKO MOLE, vpisna številka 26109035, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Hidrološko modeliranje potoka Mačkov graben s programoma Flo-2D in HEC-HMS

IZJAVLJAM

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

a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

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

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

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V: _____

Datum: _____

Podpis študenta:

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 532.57:627.133(497.4)(043.2)
Avtor: Marko Mole
Mentorica: doc. dr. Mojca Šraj
Somentor: doc. dr. Simon Rusjan
Naslov: Hidrološko modeliranje potoka Mačkov graben s programoma Flo-2D in HEC-HMS
Tip dokumenta: Dipl. nal. - UNI
Obseg in oprema: str. 62, pregl. 14, sl. 42, en 16
Ključne besede: padavine, hidrogram, hidrološko modeliranje, koeficient Nash-Sutcliffe

Izvleček

Diplomska naloga obravnava padavinsko prispevno območje Mačkovega grabna, ki leži v severozahodnem delu porečja Gradaščice in je eno od eksperimentalnih porečij Katedre za splošno hidrotehniko UL FGG. Za namen hidrološkega modeliranja Mačkovega grabna sta uporabljena dva različna programa, Flo-2D in HEC-HMS. Predstavljen je opis njunega razvoja, delovanja ter postopek izdelave modela. V nadaljevanju je predstavljeno merjenje pretokov v naravnih vodotokih s poudarkom na metodi razredčenja ter instrumentu Flo-tracer.

Glavni del rezultatov predstavlja izdelava hidrološkega modela v programih Flo-2D in HEC-HMS za porečje Mačkovega grabna. Pri modelu Flo-2D je poudarek na določitvi topografije, vnosu padavin, izbiri metode izgub ter nastavitvi kontrolnih prametrov. Izdelava modela v HEC-HMS zahteva izdelavo modela povodja ter meteorološkega in kontrolnega modela. Sledilo je umerjanje obeh modelov na izbranih merjenih padavinskih dogodkih in pripadajočih hidrogramih odtoka.

Prikazana je primerjava modeliranih in izmerjenih hidrogramov za izbrane padavinske dogodke, s pomočjo koeficienta Nash-Sutcliffe pa ovrednotena natančnost obeh modelov v primerjavi z izmerjenimi vrednostmi. Za bolj natančnega se izkaže model v programu HEC-HMS, ki v povprečju dosega višje vrednosti koeficienta.

BIBLIOGRAFIC – DOKUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDK: 532.57:627.133(497.4)(043.2)
Author: Marko Mole
Supervisor: Assist. Prof. Mojca Šraj. Ph.D.
Cosupervisor: Assist. Prof. Simon Rusjan. Ph.D.
Title: Hydrological modeling of Mačkov graben using Flo-2D and HEC-HMS
Document type: Graduation Thesis – University studies
Notes: p. 62, tab. 14, fig. 42, eq. 16
Keywords: precipitation, hydrograph, hydrological modeling, Nash-Sutcliffe coefficient

Abstract

The theme of this thesis is a basin of torrent Mačkov graben which is located in northwestern part of Gradaščica River basin and is one of the experimental catchments of the Chair of hydrology and hydraulic engineering at UL FGG. With a goal to develop hydrologic model of Mačkov graben two different programs are used: Flo-2D and HEC-HMS. In the first part the development and functioning of both models is presented. It is followed by presentation about measuring water flows in natural torrents with emphasis on dilution method and Flo-tracer instrument.

The main part of results includes hydrological modeling using both programs. For the model in Flo-2D is important to correctly determine topography, rain data, loss method and control parameters. The model in HEC-HMS demands the basin, meteorological and control model. In the next step comparison of modeled hydrographs with measured ones was conducted for selected rainfall events.

At the end models were evaluated using Nash-Sutcliffe coefficient. The model in HEC-HMS demonstrates higher values of Nash-Sutcliffe coefficient than model in Flo-2D.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. Mojci Šraj, somentorju doc. dr. Simonu Rusjanu in dr. Nejcju Bezaku za pomoč pri izdelavi diplomske naloge.

Zahvala gre družini in Evi za vso podporo med študijem.

KAZALO VSEBINE

Izjave.....	II
Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček.....	III
Bibliographic-documentalistic information and abstract.....	IV
Zahvala.....	V
1 UVOD	1
1.1 Cilj diplomskega dela	1
2 HIDROLOŠKO MODELIRANJE	2
2.1 Model v programu Flo-2D.....	2
2.1.1 Razvoj programa.....	2
2.1.2 Opis modela.....	2
2.1.2.1 Geometrija modela.....	3
2.1.2.2 Upoštevanje hrapavosti površine.....	4
2.1.2.3 Podatki o padavinah in definiranje izgub	6
2.1.2.4 Kontrolni parametri	7
2.1.3 Teoretično ozadje modela.....	7
2.2 Hidrološki model v programu HEC-HMS.....	9
2.2.1 Razvoj programa.....	9
2.2.2 Opis programa	9
2.2.3 Model povodja.....	9
2.2.4 Meteorološki model.....	14
2.2.5 Kontrolni model.....	15
2.3 Ugotavljanje natančnosti hidrološkega modela	16
2.3.1 Kriteriji natančnosti modela	16
2.3.2 Kriterij Nash-Sutcliffe	17
3 MERJENJE PRETOKOV V NARAVNIH HUDOURNIKIH IN MERSKA OPREMA	18
3.1 Splošno o hidrometriji	18

3.2	Splošno o pretoku.....	18
3.3	Metoda razredčenja	19
3.3.1	Opis metode.....	19
3.3.2	Postopek izvedbe meritev.....	23
3.3.3	Opis instrumenta Flo-Tracer in njegovega delovanja	24
4	REZULTATI	26
4.1	Porečje Gradašnice z Mačkovim grabnom.....	26
4.1.1	Podnebje.....	29
4.1.2	Topografija.....	30
4.1.3	Geologija in pedologija.....	31
4.1.4	Raba tal.....	35
4.1.5	Hidrološki podatki za porečje Mačkovega grabna	37
4.2	Meritev pretoka na Mačkovem grabnu	38
4.2.1	Izbira merilnega mesta ter izvedba meritev.....	38
4.2.2	Rezultati meritev	39
4.3	Rezultati hidrološko-hidravličnega modela Flo-2D	40
4.3.1	Vnos topografskih podatkov	40
4.3.2	Koeficient hrapavosti površine.....	41
4.3.3	Padavine in izgube	41
4.3.4	Kontrolni parametri	43
4.3.5	Umerjanje modela Flo-2D.....	44
4.4	Rezultati hidrološkega modela HEC-HMS	46
4.4.1	Vhodni podatki modela.....	46
4.4.2	Umerjanje in validacija modela HEC-HMS.....	48
5	ANALIZA REZULTATOV	52
5.1	Analiza rezultatov modela v Flo-2D	52
5.2	Analiza rezultatov modela v HEC-HMS.....	53
5.3	Primerjava rezultatov modelov Flo-2D in HEC-HMS.....	54
5.4	Ocena učinkovitosti modelov z Nash-Sutcliffovim koeficientom	56

6 ZAKLJUČKI	58
VIRI	60

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Velikost mrežnega sistema in trajanje simulacije (O'Brien, 2009c).....	3
Preglednica 2: Vrednost Manningovega koeficienta (prirejeno po O'Brien, 2009d).....	5
Preglednica 3: Začetne padavinske izgube glede na tip površja (prirejeno po O'Brien, 2009d)	6
Preglednica 4: Vrednosti <i>CN</i> glede na rabo tal in lastnosti zemljine za urbanizirane površine (USACE, 2000)	11
Preglednica 5: Vrednost <i>CN</i> glede na rabo tal in lastnosti zemljine za kmetijske površine (USACE, 2000)	12
Preglednica 6: SCS klasifikacija zemljin in infiltracijske izgube v odvisnosti od tipa zemljine (USACE, 2000)	13
Preglednica 7: Tehnični podatki instrumenta Flo-Tracer (Flow-tronic, 2003)	24
Preglednica 8: Šifre kamninske sestave porečja Gradaščice (Rusjan, 2016)	33
Preglednica 9: Šifre pedološke sestave porečja Gradaščice (Rusjan, 2016)	34
Preglednica 10: Šifre rabe tal na porečju Mačkovega grabna (Rusjan, 2016)	36
Preglednica 11: Izmerjene vrednosti pretoka in globine vode.	39
Preglednica 12: Koeficient <i>CN</i> za posamezne rabe tal porečja Mačkovega grabna	47
Preglednica 13: Vrednost koeficienta Nash-Sutcliffe (HEC-HMS).....	56
Preglednica 14: Vrednost koeficienta Nash-Sutcliffe (Flo-2D)	56

KAZALO SLIK

Slika 1: Grafični prikaz možnih elementov Flo-2D (prirejeno po O'Brien, 2009d)	4
Slika 2: Parametri posameznega elementa mrežnega sistema	5
Slika 3: Smeri hitrosti v celici (O'Brien, 2009c).....	8
Slika 4: Shema povodja z vnesenimi elementi	10
Slika 5: Prikaz vnosa podatkov v meteorološki model.....	15
Slika 6: Prikaz vnosa podatkov v kontrolni model	15
Slika 7: Prikaz vnašanja sledila pri metodi razredčenja (Brilly in Šraj, 2005).....	20
Slika 8: Prikaz potovanja sledila (Flo-tronic, 2003).....	21
Slika 9: Prikaz spreminjanja koncentracije sledila s časom (Flo-tronic, 2003).....	22
Slika 10: Diagram C/EP z umeritveno premico (HMZ, 1999).....	22
Slika 11: Instrument za merjenje pretoka Flo-Tracer (foto: Mole, 2014)	25
Slika 12: Lega porečja Gradaščice v osrednji Sloveniji (Rusjan, 2016)	26
Slika 13: Porečje Gradaščice (Mačkov graben spada v šifrant 1481) (Rusjan, 2016).....	27
Slika 14: Porečje Mačkovega grabna (vir podlage: Google Earth, 2016)	28
Slika 15: Severozahodna smer Mačkovega grabna (vir podlage: Geopedia, 2016)	28
Slika 16: Povprečna letna količina padavin (črni kvadratik označuje lego Mačkovega grabna) (ARSO, 2016).....	29
Slika 17: Povprečna letna temperatura zraka (črni kvadratik označuje lego	30
Slika 18: Mačkov graben - pogled proti jugozahodu (foto: Mole, 2016).....	30
Slika 19: Povirni del reke Gradaščice z s porečjem Mačkovega grabna (označen s številko 2) (Rusjan, 2016).....	31
Slika 20: Geološka karta povirnega dela porečja Gradaščice (Rusjan, 2016)	32
Slika 21: Pedološka karta povirnega dela porečja Gradaščice (Rusjan, 2016).....	34
Slika 22: Površino v večini prekriva gozd, ostali tipi rabe tal so bolj skoncentrirani ob pozidanih zemljiščih (foto: Mole, 2016)	35
Slika 23: Prikaz rabe tal Mačkovega grabna (Rusjan, 2016).....	36
Slika 24: Tlačna sonda, locirana v toku sosednjega Kuzlovca blizu iztoka v Božno (foto: Mole, 2014)	37
Slika 25: Lokacija merilnega mesta (vir podlage: Geopedia, 2016).....	38
Slika 26: Del vodotoka, kjer smo izvajali meritve (foto: Mole, 2014).....	39
Slika 27: Obravnavno območje v GDS	40
Slika 28: Interpolacija višinskih točk	41
Slika 29: Vnos padavin v programu – padavinski dogodek 19.-20. januar 2014	42
Slika 30: Vnos padavin v programu – padavinski dogodek 15.-16. november 2014	42
Slika 31: Vnos časa simulacije kontrolnih parametrov	43

Slika 32: Izmerjeni in modelirani hidrogram (Flo-2D) za padavinski dogodek 15.-16. november 2014	45
Slika 33: Izmerjeni in modelirani hidrogram (Flo-2D) za padavinski dogodek 19.-20. januar 2014 ...	45
Slika 34: Shema povodja Mačkovega grabna v modelu HEC-HMS	46
Slika 35: Izmerjeni in modelirani hidrogram za padavinski dogodek 29-30. julij 2013	48
Slika 36: Izmerjeni in modelirani hidrogram za padavinski dogodek 21.-22. april 2014	49
Slika 37: Izmerjeni in modelirani hidrogram za padavinski dogodek 15.-16. november 2014	49
Slika 38: Izmerjeni in modelirani hidrogram za padavinski dogodek 27.-28. avgust 2013, uporabljen za validacijo	51
Slika 39: Izmerjeni in modelirani hidrogram za padavinski dogodek 19.-20. januar 2014, uporabljen za validacijo	51
Slika 40: Zelo strmi predeli v SZ delu porečja Mačkovega grabna (foto: Mole, 2016)	53
Slika 41: Primerjava izmerjenega in modeliranih hidrogramov za padavinski dogodek januar 2014 ..	55
Slika 42: Primerjava izmerjenega in modeliranih hidrogramov za padavinski dogodek november 2014	55

»Ta stran je namenoma prazna.«

1 UVOD

Za ozemlje Slovenije je značilno veliko vodno bogastvo, del njega je tudi razpreden rečni sistem. Ker imajo vse večje reke razen Mure in Drave svoj povirni del prav na ozemlju Slovenije, lahko pri nekaterih pride ob obilnejših padavinah do obsežnih poplav na dolvodnih območjih. To običajno povzroči precejšnjo gospodarsko škodo. V zadnjih desetletjih je na udaru poplav vedno bolj tudi Ljubljana. Razlog je v postopnem širjenju glavnega mesta proti jugozahodu na območja, kjer ima poplavno ravnico hudourniška reka Gradaščica. Ta je na območju mesta razdeljena na manjšo Mestno Gradaščico ter večji Mali Graben. S povirjem v razgibanih Polhograjskih dolomitih je Gradaščica izredno nepredvidljiva, saj v primeru obilnih deževij njen pretok skokovito naraste. Zaradi slednjega, pa tudi zaradi slabe prevodnosti struge, Gradaščica v dolvodnih delih ne zmore odvajati celotne količine vode, razlivanje po okoliških ravninah pa je neizogibno. Poznavanje porečja Gradaščice se tako izkaže kot izredno pomembno. Pri obravnavi in analizah le-tega nam lahko zelo pomagajo hidrološki modeli.

Mačkov graben je manjši hudournik v severozahodnem povirnem delu porečja Gradaščice. Njegov hudourniški značaj se kaže v tem, da se njegov pretok hitro poveča ob močnejših padavinah, po zaključku padavin pa tudi hitro upade. Vzrok za to je velika razgibanost terena z visokim povprečnim padcem. Razumevanje obnašanja tega manjšega porečja je možno prenesti na širše območje povirnega dela Gradaščice, pa tudi na druga podobna porečja. Zato je hidrološka študija Mačkovega grabna več kot smiselna.

Mačkov graben spada med eksperimentalna porečja v Sloveniji. Ta so izbrana z namenom, da se na njih izvajajo različne dalj časa trajajoče meritve hidroloških količin, ki nam omogočajo bolj detajlne analize obnašanja samega porečja. Te analize nam prinesejo nova spoznanja o samih hidroloških procesih, kar prispeva k razvoju hidrologije kot znanosti. Na območju Mačkovega grabna in njegovi bližini je tako nameščenih več merskih instrumentov, s katerimi se izvajajo meritve pretokov, padavin, spremlja kakovost vode itd. (Bezák in sod., 2014)

1.1 Cilj diplomskega dela

Cilj diplomskega dela je v programu Flo-2D ter HEC-HMS izdelati hidrološka modela hudournika Mačkov graben. Oba modela bomo umerili in validirali ter nato primerjali modelirane hidrograme z merjenimi, natančnost modelov pa ocenili s koeficientom Nash-Sutcliffe. Za namen diplomske naloge so bile v jesenskem in zimskem obdobju v primerih obilnejših padavin izvedene meritve pretoka Mačkovega grabna, ki nam skupaj z že izvedenimi meritvami služijo kot vhodni podatki v model.

2 HIDROLOŠKO MODELIRANJE

Hidrološko modeliranje zajema izdelavo modelov, glaven namen modeliranja pa je želja po kvalitetni predstavitvi procesov v naravi, povezanih s hidrološkim krogom. Hidrološki modeli nam omogočajo predvidevanje določenih hidroloških dogodkov, obseg njihovih posledic v okolju ter tudi, kako bi jih lahko učinkovito preprečili. Ker so hidrološki procesi v osnovi dokaj zapleteni, v modelih zajamemo najbolj bistvene. Z dovolj natančnimi vhodnimi podatki kot so podatki o padavinah, pretokih, infiltraciji, evapotranspiraciji in podobno, pa tudi s pravilnim umerjanjem samega modela, nam lahko hidrološki modeli ponudijo uporabne rezultate. V osnovi ločimo fizične in matematične modele. Z razvojem računalništva v zadnjih desetletjih se je modeliranje v hidrologiji prestavilo na novo raven. Drage in zahtevne fizične modele so v marsikaterem primeru zamenjali cenejši in lažje izvedljivi matematični modeli, ki pa za delovanje zahtevajo dovolj zmogljive računalnike. V množični uporabi so tako enodimenzijski hidrološki in hidravlični modeli, v zmeraj večji meri pa se uporabljajo tudi dvodimenzijski, nekoliko redkeje trodimenzijski (DHD modeliranje, 2010).

2.1 Model v programu Flo-2D

2.1.1 Razvoj programa

Program FLO-2D je bil v svoji prvi obliki predstavljen leta 1988 pod imenom Mudflow. Podprt je bil s strani ameriške agencije za nezgode FEMA (ang. *Federal Emergency Management Agency*). Originalni model Mudflow je bil napisan v programskem jeziku Fortran, omejen je bil na 250 mrežnih elementov. Preračunavanje šest urnega hidrograma je vzelo dvanajst ur časa na XT računalniku. Od prvotnega koncepta DHD (ang. *Diffusive Hydrodynamic model*) sicer ni ostalo praktično nič. V današnji obliki Flo-2D vsebuje različne procesorske programe, bolj pregledno je grafično urejanje, nima več zgornje meje števila mrežnih elementov, obravnava površinski tok v osmih smereh (O'Brien, 2009a).

2.1.2 Opis modela

Flo-2D pa spada med posebne dvodimenzijske modele, saj vključuje tudi enodimenzijski tok. Slednji se upošteva v samem vodotoku, medtem ko se po poplavnem območju upošteva dvodimenzijski tok. Delovanje modela Flo-2D temelji na fizikalnih procesih. Sistem modela Flo-2D sestoji iz treh različnih procesorskih programov, ki jih potrebujemo za grafično urejanje in kartiranje ter za nastavitve raznih komponent struge in prispevne površine (O'Brien, 2009a). Prvi od predprocesorskih programov je program GDS (ang. *The Grid Developer System*), s katerim urejamo vhodne podatke mrežnega sistema. Slednji je potreben, ker z njim predstavimo topografijo, preko njegovih kvadratnih

celic pa program simulira površinski odtok. Drugega predstavlja program FLOENVIR, ki omogoča orodja za urejanje mrežnih elementov. Tretji izmed njih je program PROFILES, ki omogoča urejanje padca ter prečnih prerezov struge vodotoka. Post-procesorske programe MAXPLOT, MAPPER in HYDROG (ta se uporablja za prikaz hidrogramov) uporabimo za grafični prikaz rezultatov simuliranja poplavnega vala (O'Brien, 2009a).

2.1.2.1 Geometrija modela

Za začetek izdelave modela v programu Flo-2D potrebujemo podatke o terenu, ki bo vključen v model. Za to uporabimo digitalni model terena (ang. DTM), za boljšo predstavbo pa lahko vnesemo tudi orto-foto posnetek obravnavanega območja. Paziti je potrebno le, da so koordinate ustrezne glede na DTM. Ko imamo vnesene geometrijske podatke o obravnavanem območju, je potrebno oceniti velikost celice systemske mreže, s katero prekrijemo območje. Izbira velikosti kvadratne celice je precejšnjega pomena, saj odločilno vpliva na hitrost simulacij, ki jih bomo izvajali (O'Brien, 2009b). Manjši elementi bolje opišejo topografske značilnosti površja (še posebej, če je ta zelo razgiban), a hkrati to račun močno podaljša. Za pomoč pri določitvi velikosti elementa upoštevamo sledečo enačbo (O'Brien, 2009c):

$$\frac{Q_{\text{peak}}}{A_{\text{surface}}} < 10 \text{ cfs/ft}^2 \text{ [m}^3\text{/s/m}^2\text{]}. \quad (1)$$

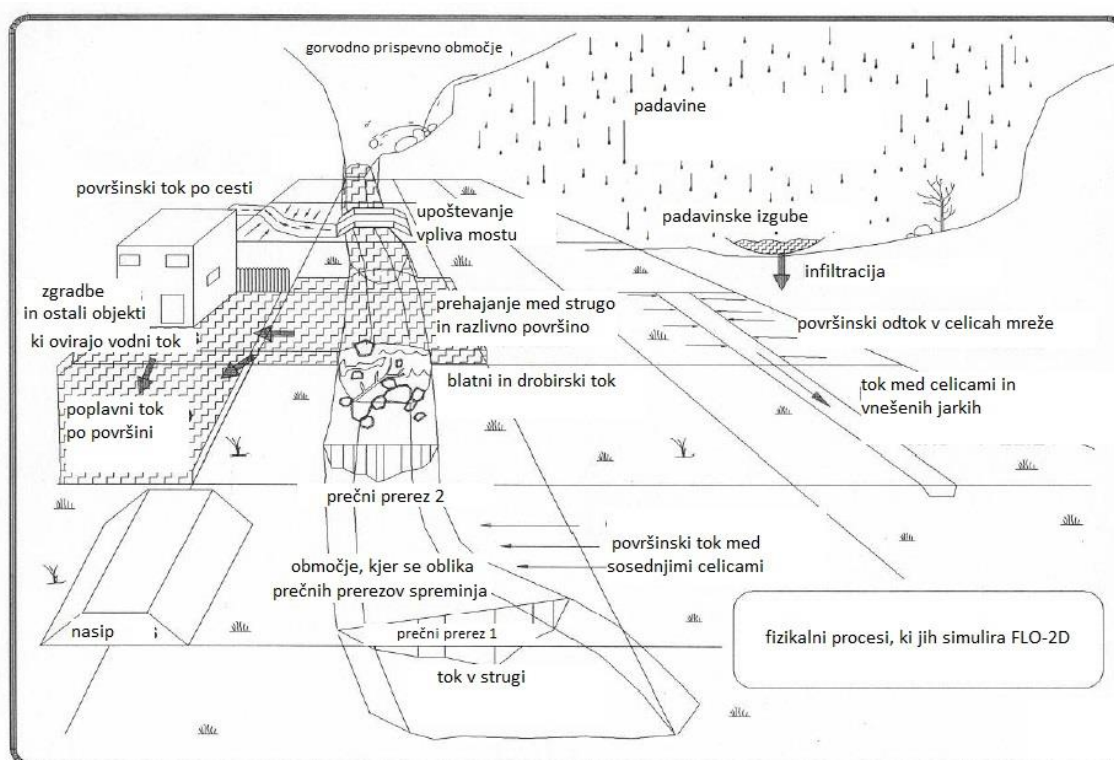
Če $Q_{\text{peak}}/A_{\text{surface}}$ znaša več kot 10 [m³/s/m²], bo to pomenilo precej počasnejše izvajanje računov modela (O'Brien, 2009c).

Preglednica 1: Velikost mrežnega sistema in trajanje simulacije (O'Brien, 2009c)

Velikost mrežnega sistema	
Število mrežnih elementov	Hitrost simulacij modela
< 50,000	Hitro (minute)
50,000 – 100,000	Srednje (cca ura)
100,000 – 1,000,000	Počasno (ure)
> 1,000,000	Zelo počasno (dan in več)

Ko določimo mrežni sistem, z rdečimi celicami označimo mejo računskega območja. Ko imamo to določeno, je potrebno na mrežnem sistemu znotraj računskega območja izvesti interpolacijo višin., s čimer vsaka celica dobi svojo nadmorsko višino. Pri tem velja opozoriti, da se kot težava izkaže, ko imamo na precej razgibanem terenu mrežo s prevelikimi celicami. Izračun je sicer precej hitrejši, a je topografija terena precej površno predstavljena, skriti so morebitni hitri višinski dvigi ali spusti terena, kar pomeni, da so dobljeni rezultati omejeno uporabni.

V mrežni sistem lahko vnesemo različne komponente, od struge, raznih objektov, ceste, hidravlične objekte, nasipe itd., odvisno od našega obravnavanega območja (slika 1).



Slika 1: Grafični prikaz možnih elementov Flo-2D (prirejeno po O'Brien, 2009d)

2.1.2.2 Upoštevanje hrapavosti površine

Vsaka celica mrežnega sistema vsebuje zaporedno številko, podatek o nadmorski višini ter tudi vrednost koeficienta hrapavosti (slika 2). Hrapavost površine pomembno vpliva na napredovanje toka vode. Bolj kot je hrapavo površje, počasnejši je tok vode in obratno (O'Brien, 2009b). Za določitev hrapavosti posamezne celice uporabimo Manningov koeficient hrapavosti, pri tem si lahko pomagamo s preglednico 2 (O'Brien, 2009c):

Preglednica 2: Vrednost Manningovega koeficienta (prirejeno po O'Brien, 2009d)

Tip površja	n_g
gosta ruša	0.17 - 0.80
gosta trava	0.17 - 0.48
grmovje in gozna podrast	0.30 - 0.40
običajna travnata površina	0.20 - 0.40
ne povsem zaraščena travnata površina	0.20 - 0.30
nizka trava	0.10 - 0.20
redka vegetacija	0.05 - 0.13
z drobirjem prekrite površine	
0% pokritost	0.09 - 0.34
20% pokritost	0.05 - 0.25
polje	0.008 - 0.47
izpostavljene površine z drobirjem	0.10 - 0.20
urbane površine	0.05
gozd	0.15 - 0.25
cesta	0.003 - 0.02
njiva	0.40 - 0.58

Attributes of Grid Element Number 2668

Floodplain elevation (meters): 501.3621

Manning coefficient: 0.2

Limiting Froude number: 0.0

Element size (meters): Delta X: 20, Delta Y: 20

Buttons: Reduction Factors..., Multiple Channel..., Levee..., Street Element..., Infiltration..., MODFLO-2D..., Do not share discharge with the floodplain (checkbox), OK, Cancel

Slika 2: Parametri posameznega elementa mrežnega sistema

2.1.2.3 Podatki o padavinah in definiranje izgub

Hidrološki podatki pri simulacijah z modelom Flo-2D vključujejo tako podatke o padavinah kot o pretokih. Padavine so lahko dejanski padavinski dogodek, lahko pa uporabimo tudi sintetične histograme, če se meritve na obravnavanem območju niso izvajale. Flo-2D ponuja več različnih razporeditev padavin:

- uporabniško določena porazdelitev padavin,
- brezdimenzijska SCS porazdelitev,
- šest-urna Maricopa porazdelitev (pet različnih možnosti),
- 24-urni SCS tip porazdelitve tipa II in IIA,
- porazdelitve NRCS tipa II-60, 65, 70, 75 in 45.

Če izberemo prvo možnost, podatke o padavinah vnašamo v oknu »Rain«, program nam sproti tudi izriše graf odstotka celotnih padavin v odvisnosti od trajanja padavin. Ker k površinskemu odtoku prispevajo samo učinkovite padavine, je potrebno definirati tudi delež izgub. Flo-2D simulira padavinske izgube, ki zajemajo začetne izgube ter infiltracijo, simulira pa tudi izhlapevanje, pri katerem pa ne upošteva izhlapevanja iz vegetacije poplavnega območja. Flo-2D nam ponuja možnost uporabe metode Greena in Ampta ter metode SCS. Slednja je predstavljena pri opisu programa HEC-HMS v poglavju 2.2.3.1. V preglednici 3 so navedene vrednosti izgub glede na tip površja.

Preglednica 3: Začetne padavinske izgube glede na tip površja (prirejeno po O'Brien, 2009d)

TIP POVRŠJA	IZGUBE (mm)
Naravno	
• Puščava	8.89
• Gorata puščava	3.81
• Gorato območje z rastjem	6.35
Urbane površine	
• Travnate površine	5.08
• Puščavsko površje	2.54
• Asfaltne površine	1.27
Njive	12.70
Iglavci	0.25 – 9.14
Listavci	0.03 – 2.03
Grmovje	0.25 – 2.03
Travnik	1.02 – 1.52
Gozd	0.51 – 11.18

2.1.2.4 Kontrolni parametri

Pred izvedbo simulacij je potrebno nastaviti vrednosti kontrolnih parametrov računa. Določimo časovne kontrolne spremenljivke, to so čas izvajanja simulacije ter interval izpisa rezultatov. Odvisno od modela nastavljam tudi parametre v razdelku globalne podatkovne modifikacije (prilagoditev vrednosti koeficienta hrapavosti n_g ter njegove vrednosti za plitev tok, omejitev Froudovega števila, vrednost faktorja reduciranja površine...). V naslednjem razdelku je pomembno odključati fizikalne procese, ki jih bomo vključili v sam račun. Na voljo so padavine, infiltracija ter izhlapevanje, vključimo pa lahko tudi transport sedimentov. Zelo pomembna je nastavev štirih numeričnih stabilnostnih parametrov. Prvi od njih je »Surface Detention«, ki označuje najmanjšo globino površinskega toka vode, ki je še upoštevana v samem računu. Ostali trije so koeficient dinamične valovne stabilnosti (ang. *Dynamic Wave Stability Coefficient*), parameter glede dopuščenih vrednosti višine vode med celicami (ang. *Percent Change in Flow Depth*) ter parameter, ki obravnava računski korak (ang. *Courant Number*). Med izvajanjem simulacij, ko umerjamo model, je potrebno med drugim ustrezno prilagajati vrednosti stabilnostnih parametrov, da dobimo uporabne rezultate.

2.1.3 Teoretično ozadje modela

Delovanje modela Flo-2D temelji na principu ohranjanja volumna tekočine. Model simulira potovanje vode preko kvadratnih mrežnih elementov kot površinski tok ali kot tok po strugi vodotoka. Na napredovanje poplavnega vala po prispevnem območju najbolj vpliva topografija samega območja ter hrapavost površine, upoštevajo pa se lahko tudi druge posebnosti območja. Račun poplavnega vala v dveh dimenzijah je omogočen z numerično integracijo enačb gibanja in ohranjanja volumna (Pestotnik, 2011).

Osnovni enačbi modela sta kontinuitetna in dinamična enačba (O'Brien, 2009d):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hV}{\partial x} = i \quad \text{in} \quad (2)$$

$$S_f = S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \quad , \quad (3)$$

kjer je:

h globina toka,

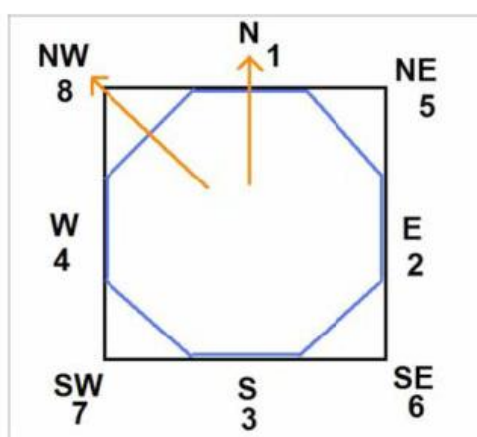
V po globini povprečna hitrost toka v eni od osmih smeri x ,

i intenziteta padavin ,

S_f padec gladine (odvisna od Manninga),

S_0 padec dna struge.

Enačba 2 predstavlja ohranjanje volumna vode, enačba 3 pa tok po strugi, ki je globinsko enodimenzijsko povprečen. Z dinamično enačbo v modelu se torej izračunava povprečna hitrost vodnega toka preko mej kvadratnih mrežnih elementov. Flo-2D omogoča potovanje toka v različne smeri. Možnih je osem različnih smeri (slika 3), vsaka od teh hitrosti je enodimenzionalna, njen izračun pa ni povezan s preostalimi smerni (Pestotnik in sod., 2012).



Slika 3: Smeri hitrosti v celici (O'Brien, 2009c)

Več podrobnosti o samem programu Flo-2D in njegovem delovanju je predstavljenih v O'Brien (2009a; 2009b; 2009c; 2009d), Pestotnik (2011) in Pestotnik in sod. (2012).

2.2 Hidrološki model v programu HEC-HMS

2.2.1 Razvoj programa

Program HEC-HMS (ang. *Hydrologic Modeling System*) je zasnovan za izvajanje simulacij padavinskega odtoka s porečij ter za simulacije poplav. Program je produkt hidrološkega inženirskega centra, ki je del ameriškega vojaškega korpusa inženirjev. Začetek razvoja programa sega v leto 1992, ko je bil HEC-HMS predviden kot zamenjava programa HEC-1, ki je pred tem veljal za standardno programsko opremo za izvajanje hidroloških simulacij. HEC-HMS je glede na predhodnika naprednejši, večino izboljšanih lastnosti pa omogoča večja zmogljivost današnjih namiznih računalnikov. Za lažjo uporabo ima razvit tudi uporabniški vmesnik, preko katerega se vodi celotno modeliranje. Program se danes široko uporablja tako v praksi kot v izobraževalne namene na univerzah.

2.2.2 Opis programa

HEC-HMS se uporablja za modeliranje padavinskega odtoka s porečij, uporaben pa je tudi pri simulaciji poplav. Z njim lahko napovedujemo odtok s porečij za poljubne padavinske dogodke, analiziramo vplive tipa površja na odtok (vpliv urbanizacije, gozda, zakraselega površja itd.), napovedujemo obseg škode zaradi poplav, omogoča nam izvedbo simulacij pregrad itd. Model HEC-HMS je sestavljen iz treh glavnih komponent (Brilly in Šraj, 2006):

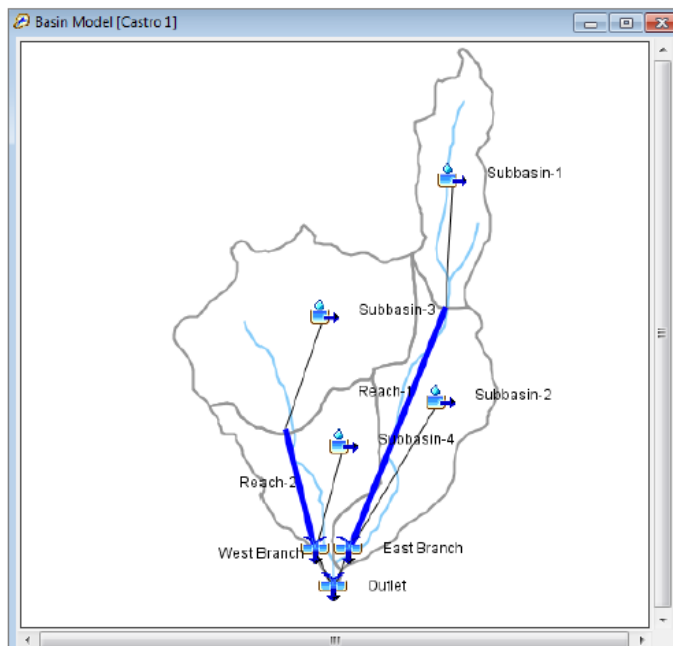
- modela povodja,
- meteorološkega modela in
- kontrolnega modela.

2.2.3 Model povodja

Model povodja predstavlja obravnavano porečje. Model sestavimo iz naslednjih hidroloških elementov (slika 4):

- podpovodje (ang. *subbasin*),
- odsek (ang. *reach*),
- vozlišče (ang. *junction*),
- izvir (ang. *source*),
- ponor (ang. *sink*),
- zadrževalnik (ang. *reservoir*),

- razcep (ang. *diversion*).



Slika 4: Shema povodja z vnesenimi elementi

Pomembna je ustrezna povezanost posameznih elementov, da bo model kot celota ponazarjal dejansko obravnavano porečje. Element »podporečje« kot že pove ime, ponazarja posamezno podporečje. Za propagacijo vala po strugi od enega do drugega podporečja uporabimo element »odsek«, ki ga povežemo na element »vozlišče«, ki ponazarja skupen iztok iz dveh ali več padavinskih območij. V kolikor se vodotok na neki točki ponovno razcepi, uporabimo element »razcep«. Element »zadrževalnik« pa pride v poštev v primerih, ko želimo analizirati vpliv pregrade na vodotoku (USACE, 2008).

2.2.3.1 Padavinske izgube

Ko imamo sestavljeno shemo povodja (slika 4), začnemo z vnašanjem podatkov. Ti se nanašajo na padavinske izgube, transformacijo padavin v odtok ter bazni pretok. Za padavinske izgube je v programu HEC-HMS na voljo sedem različnih metod (USACE, 2010):

- metoda deficita in enakomernih izgub,
- metoda Greena in Ampta,
- mrežna metoda SCS,
- mrežna metoda stalnega računa vlažnosti zemljine,
- metoda začetnih in enkomernih izgub,
- SCS metoda,

- metoda stalnega računa vlažnosti zemljine (SMA model).

V nalogi bomo uporabili metodo SCS (ang. *The Soil Conservation Service*). Ta model je razvila Agencija ameriškega ministrstva za kmetijstvo. V modelu so lastnosti zemljine opisane z brezdimenzijskim koeficientom *CN*, ki zajema pedološke vplive, pokrovnost tal in predhodno vlažnost zemljine.

Preglednica 4: Vrednosti *CN* glede na rabo tal in lastnosti zemljine za urbanizirane površine (USACE, 2000)

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

Preglednica 5: Vrednost *CN* glede na rabo tal in lastnosti zemljine za kmetijske površine (USACE, 2000)

Raba tal	Hidrol. pogoji	Vrednosti <i>CN</i> glede na odtočni potencial			
		A	B	C	D
Pašnik, prerija	slabi	68	79	86	89
	povprečni	49	69	79	84
	dobri	39	61	74	80
Travnik, košen	-	30	58	71	78
Grmičevje	slabi	48	67	77	83
	povprečni	35	56	70	77
	dobri	30	48	65	73
Gozd v kombinaciji s travo (plantaže, sadovnjaki)	slabi	57	73	82	86
	povprečni	43	65	76	82
	dobri	32	58	72	79
Gozd	slabi	45	66	77	83
	povprečni	36	60	73	79
	dobri	30	55	70	77
Kmetija s poslopjem, podeželsko cesto in okoliškimi parcelami	-	59	74	82	86

Skupen koeficient *CN* za celotno povodje določimo po enačbi:

$$CN_{skupen} = \frac{\sum A_i \times CN_i}{\sum A_i}, \quad (4)$$

kjer A_i predstavlja površino pripadajočega podpovodja. Pred določitvijo skupnega *CN* je potrebno določiti *CN* za vsak tip rabe tal porečja posebej. Pri tem je potrebno upoštevati tudi odvisnost koeficienta *CN* od odtočnega potenciala. Zemljine iz skupine A imajo nizek odtočni potencial, tiste v skupini B imajo povprečnega, za C in D pa je značilen visok odtočni potencial (Brilly in Šraj, 2006).

Začetne izgube I_a so izgube padavin, preden se začne infiltracija vode v zemljino. Določimo jih po sledeči enačbi (Brilly in Šraj, 2006):

$$I_a = 0,2 \times S = 0,2 \times \frac{25400 - 254 \times CN}{CN}. \quad (5)$$

Preglednica 6: SCS klasifikacija zemljin in infiltracijske izgube v odvisnosti od tipa zemljine (USACE, 2000)

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

2.2.3.2 Efektivne padavine

Za površinski odtok so pomembne efektivne padavine. To je tisti delež padavin, ki se ne infiltrira in ne izhlapi, temveč po površini odteče do struge vodotoka. Program HEC-HMS ponuja sedem različnih metod transformiranja efektivnih padavin v neposredni odtok. Na voljo so:

- sintetični Clarkov HE,
- sintetični Snyderjev HE,
- sintetični SCS HE,
- metoda kinematičnih valov,
- model ModClark,
- uporabniško določena S-krivulja,
- uporabniško določen HE.

Ker je prispevno območje Mačkovega grabna zelo razgibano ter z velikim nakloni, bomo v nalogi uporabili Snyderjev HE. Tega je leta 1938 razvil Snyder in sicer z analizo odtoka s povodij visokogorij v ZDA, za katera ni imel meritev.

Od empiričnih izpeljank Snyderjevega HE v nadaljevanju uporabimo metodo Tulsa District. Ta je bila razvita na podlagi izvedenih poskusov v ZDA s strani ameriškega vojaškega korpusa inženirjev.

Metoda velja predvsem za naravna podeželska povodja. Pomemben podatek je čas zakasnitve T_p , ki ga dobimo po enačbi (Brilly in Šraj, 2006):

$$T_p = 0,708 \times \left(\frac{L \times L_c}{\sqrt{S}} \right)^{0,39}, \quad (6)$$

kjer je:

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

Čas zakasnitve pomeni čas med težiščem histograma efektivnih padavin in težiščem hidrograma (Brilly in Šraj, 2006). Določiti je potrebno tudi koeficient C_p , ki predstavlja (Brilly in Šraj, 2006):

$$C_p = \frac{q_p \times T_p}{6,992}. \quad (7)$$

Maksimalni specifični pretok q_p [$\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$] dobimo po enačbi (Brilly in Šraj, 2006):

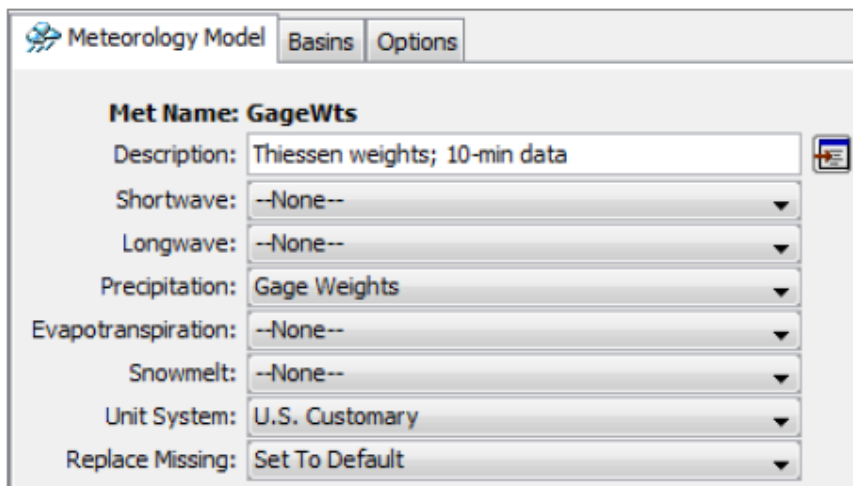
$$q_p = 4,1515 \times T_p^{-0,92}. \quad (8)$$

2.2.4 Meteorološki model

Meteorološki model preračunava padavinske vnose za posamezno podporečje (slika 5). Uporabi lahko tako točkovne kot prostorsko razporejene padavine, možen pa je vnos tako snežnih kot dežnih padavin (Brilly in Šraj, 2006). Vključuje tudi številne metode, ki upoštevajo evapotranspiracijo.

Na izbiro imamo sedem načinov vnosa padavin:

- padavine, ki jih definira uporabnik,
- uporabniško določena utežna shema,
- metoda uteži obratne vrednosti kvadrata razdalje,
- metoda mrežnih padavin,
- padavine z določeno povratno dobo,
- SCS hipotetična nevihta,
- standarde projektne padavine.



Meteorology Model Basins Options

Met Name: GageWts

Description: Thiessen weights; 10-min data

Shortwave: --None--

Longwave: --None--

Precipitation: Gage Weights

Evapotranspiration: --None--

Snowmelt: --None--

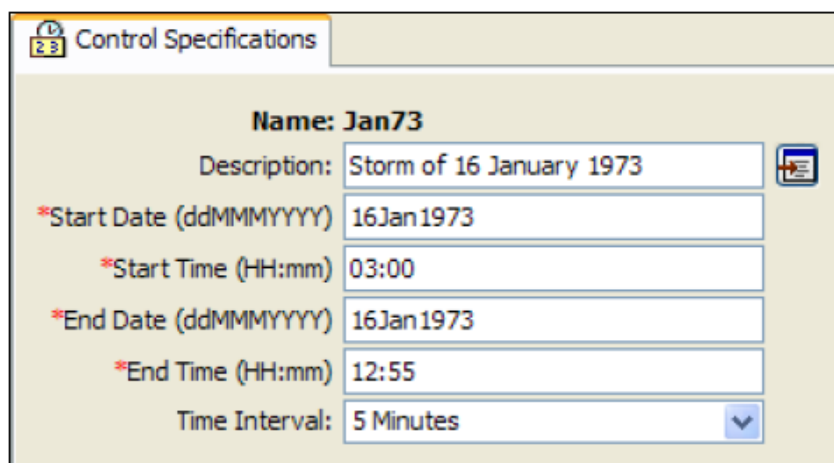
Unit System: U.S. Customary

Replace Missing: Set To Default

Slika 5: Prikaz vnosa podatkov v meteorološki model

2.2.5 Kontrolni model

Kontrolni model (slika 6) služi za nastavljanje začetnega in končnega časa simulacije, v njem pa tudi določimo časovni korak izračuna (US Army Corps of Engineers, 2008).



Control Specifications

Name: Jan73

Description: Storm of 16 January 1973

*Start Date (ddMMMYYYY): 16Jan1973

*Start Time (HH:mm): 03:00

*End Date (ddMMMYYYY): 16Jan1973

*End Time (HH:mm): 12:55

Time Interval: 5 Minutes

Slika 6: Prikaz vnosa podatkov v kontrolni model

2.3 Ugotavljanje natančnosti hidrološkega modela

Pri modeliranju odtoka z določenega prispevnega območja nas vsekakor zanima, kolikšno je odstopanje modela od realnosti. Neumerjen oziroma slabo umerjen model nam ne daje zadovoljivih rezultatov, da bi lahko iz njih zanesljivo napovedovali obnašanje obravnavanega prispevnega območja za izbrane padavinske dogodke. Sam proces umerjanja je običajno zahteven in dolgotrajen postopek, odvisen tudi od programske opreme, v kateri smo ustvarili hidrološki model. Učinkovito umerjenost modela dosežemo s spreminjanjem oz. prilagajanjem različnih parametrov ter s strukturnimi spremembami samega modela. Pri obravnavi modeliranih in opazovanih hidrogramov je pomemben tudi vizualni pregled, ko lahko z analizo ugotovimo, katere parametre je potrebno prilagoditi, da se modelirani hidrogram približa opazovanemu (Krause in sod., 2005).

2.3.1 Kriteriji natančnosti modela

Kriteriji natančnosti nam povedo, kako blizu so rezultati modela rezultatom opazovanj. V hidrologiji se uporablja več kriterijev natančnosti, med njimi se velikokrat uporabljajo predvsem naslednji (Krause in sod., 2005):

- koeficient Nash-Sutcliffe E ,
- koeficient determinacije r^2 (ang. *Coefficient of determination r^2*),
- indeks strinjanja d (ang. *Index of agreement*),
- Nash-Sutcliffe E , pri čemer je vrednost E logaritmirana,
- modificirane variante E in d ,
- relativni učinkovitostni kriterij E_{rel} in d_{rel} (ang. *Relative efficiency criteria E_{rel} and d_{rel}*).

S preizkušanjem različnih kriterijev je bilo ugotovljeno, da nobeden od njih ni idealen, torej, da se pri vsakem pojavijo določene prednosti in slabosti. Najpogosteje uporabljena kriterija Nash-Sutcliffe ter koeficient determinacije sta recimo zelo občutljiva na konice pretoka, se pa zato bolje obnese v primerih nižjih pretokov (Krause in sod., 2005). Podobno velja tudi za indeks strinjanja. Razlog za tako oceno je pri vseh treh ta, da njihov izračun temelji na kvadratih razlik opazovanih in merjenih pretokov. Konice pretoka torej precej poslabšajo vrednost ocene (Krause in sod., 2005).

Kriterij Nash-Sutcliffe, pri katerem je koeficient E logaritmiran, je bolj občutljiv za nizke pretoke, hkrati pa se odzove tudi na večje (Krause in sod., 2005). Relativni učinkovitostni kriterij E_{rel} in d_{rel} je

glede obravnave večjih pretokov precej manj odziven, zato je v primerih, ko imamo v veliki večini majhne pretoke, rezultat bolj natančen. Modificirane variante E in d so po učinkovitosti nekje vmes med prej omenjenimi. Velikokrat se tako priporoča, da se izbere kombinacija različnih kriterijev, da se izognemo večjim napakam pri določitvi natančnosti modela (Krause in sod., 2005).

2.3.2 Kriterij Nash-Sutcliffe

V nalogi bomo uporabili kriterij Nash-Sutcliffe, ki je najbolj splošno uporabljen. Definirala sta ga E. J. Nash in J. V. Sutcliffe leta 1970. Vrednost koeficienta E dobimo iz primerjave izmerjenih in modeliranih pretokov za določen padavinski dogodek. Definiran je z enačbo (McCuen in sod., 2006):

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \bar{Q}_0)^2}, \quad (9)$$

kjer je:

- Q_0^t izmerjen pretok v času t ,
- Q_m^t modeliran pretok v času t ,
- \bar{Q}_0 povprečje vrednosti izmerjenih pretokov.

Vrednost koeficienta E se giblje od minus neskončno do vrednosti 1. V primeru, da dobimo vrednost $E=1$, to pomeni, da se model povsem ujema z merjenimi vrednostmi. V primeru $E=0$ pomeni, da je natančnost modela natančna toliko kot povprečna vrednost izmerjenih vrednosti pretoka. Bolj kot je vrednost E manjša od 1, bolj model odstopa od izmerjenih vrednosti oz. bližje kot je vrednost E vrednosti 1, bolj je model natančen.

Kot omenjeno, se kot največja pomanjkljivost tega kriterija izkaže, da so vrednosti opazovanega in modeliranega pretoka v enačbi kvadrirane. Posledica tega so v preveliki meri upoštewane največje vrednosti pretokov, medtem pa so nižje vrednosti pretokov upoštewane v premajhni meri. Kriterij tako v času konic preceni obnašanje modela, pri nizkih pretokih pa podceni (Krause in sod., 2005).

3 MERJENJE PRETOKOV V NARAVNIH HUDOURNIKI IN MERSKA OPREMA

3.1 Splošno o hidrometriji

Hidrometrija je veja hidrološke znanosti, ki se ukvarja z meritvami lastnosti vode. Naloge hidrometrije so (Brilly in Šraj, 2005):

- izvajanje meritev lastnosti režima voda,
- razvoj metod in izdelava instrumentov za izvajanje meritev elementov režima voda,
- analiza in obdelava podatkov,
- določanje napak pri meritvah,
- učinkovito razporejanje merskih postaj ter izvajanje meritev v prostoru in času.

Hidrometrija zajema meritve globin, gladin in hitrosti vode, meritve pretokov ter zbiranje in obdelavo hidroloških podatkov. Ker se meritve velikokrat izvajajo v zahtevnih vremenskih razmerah (nizke ali visoke temperature, visoka vlažnost...) ter na zahtevnih terenih, mora biti oprema, ki jo uporabljamo pri izvajanju meritev, čim bolj zanesljiva (Brilly in Šraj, 2005).

3.2 Splošno o pretoku

Pretok je ena osnovnih hidroloških količin, ki je definirana kot količina vode, ki v časovni enoti steče skozi obravnavan prerez. Predstavlja jo enota kubični meter na sekundo (m^3/s), pri pretoku vodotokov se uporablja tudi liter na sekundo (l/s). Meritve pretoka ločimo na neposredne metode, pri kateri se vodo zajema neposredno, primerna pa je v primerih, ko merimo manjšo količino vode. Druga vrsta metod so posredne metode, pri katerih pa je pretok določen na osnovi funkcij pretoka, delimo pa jih na metode naklon-površina, površina-hitrost ter na metode, kjer uporabljamo merska korita in jezove (Cerar in sod., 2000).

Podatki o pretoku so velikokrat nujno potrebni, saj brez njih ne bi bilo možno ustrezno dimenzionirati novih vodnih objektov oz. sanirati starih, modelirati raznih hidroloških pojavov (analize površinskega odtoka s prispevnih območij, analize poplavne varnosti itd.), zagotavljati ustrezne količine vode v kmetijstvu ter industriji itd.

3.3 Metoda razredčenja

3.3.1 Opis metode

Ena izmed metod merjenja pretoka je metoda razredčenja (ang. *dilution method*). Ta metoda spada med posredne metode merjenja pretokov, uporablja pa se predvsem za manjše vodotoke oz. hudournike, za katere je v večini značilen velik padec, kar se odraža v hitrem in neenakomernem vodnem toku. Ker v tej diplomski nalogi obravnavamo hudournik Mačkov graben, je izbira te metode več kot ustrezna.

Za metodo razredčenja je značilno, da se za določitev pretoka uporabi različne disperzivne raztopine oz. sledila. Najpogosteje se uporablja sol, tudi barvila, zaradi potencialne škodljivosti pa redkeje tudi radioaktivne snovi (HMZ, 1999). Sledilo na določeni razdalji gorvodno od mesta izvajanja meritve injiciramo v vodotok, nato pa na mestu izvajanja meritev z ustreznim instrumentom ugotavljamo časovno spreminjanje koncentracije tega sledila, ko se je ta od mesta injiciranja enakomerno razporedil po celotnem prerezu obravnavanega vodotoka (HMZ, 1999).

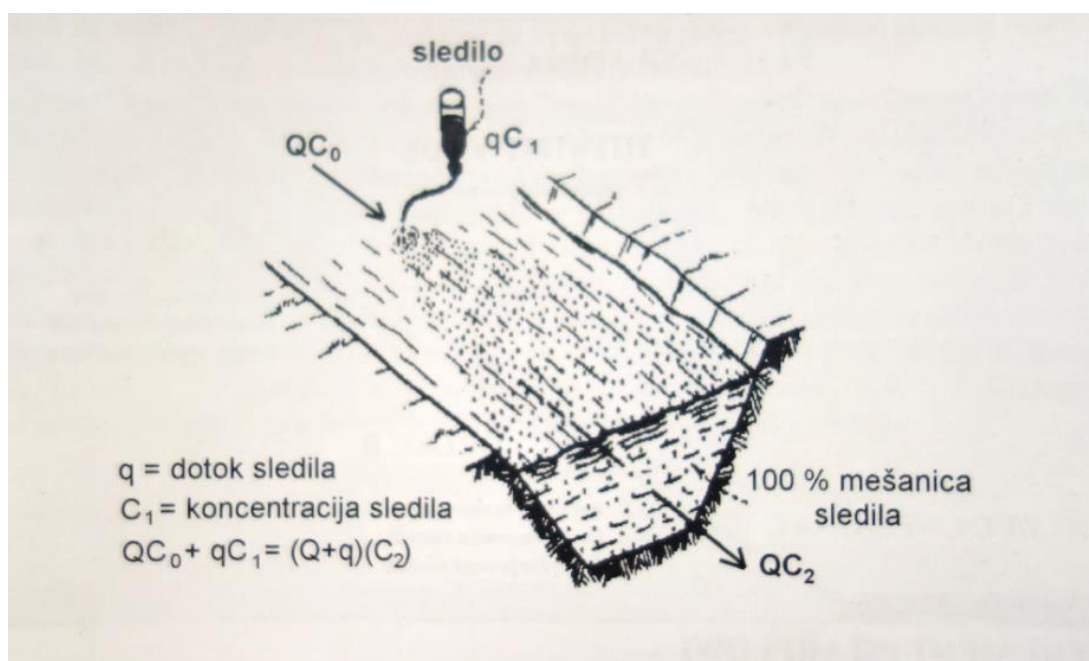
Pri izvajanju meritev z metodo razredčenja moramo biti zelo pozorni, da so izpolnjeni naslednji določeni pogoji. Pretok hudournika mora biti tekom izvajanja meritve konstanten. Slednje načeloma ni problematično, saj sama meritev ponavadi ne traja tako dolgo, da bi se pretok močno spremenil. Naslednji pogoj je, da mora skozi prečni profil hudournika, kjer izvajamo meritev, steči vsa količina vnesenega sledila. To se zagotovi tako, da preprečimo zastajanje sledila v posameznih delih vodotoka (primerna izbira mesta injiciranja). Pogoj pa je tudi popolna premešanost sledila v vsakem prečnem profilu od mesta injiciranja sledila dolvodno. Ta pogoj pa izpolnimo tako, da sledilo injiciramo v območju turbulentnega toka, ki poskrbi za dobro premešanost (HMZ, 1999).

Ločimo dve metodi injiciranja sledila in sicer *metodo konstantnega injiciranja* ter *metodo trenutnega injiciranja* (slika 7). Pri prvi se kot sledilo uporabi uranin, pri drugi pa navadna kuhinjska sol (HMZ, 1999).

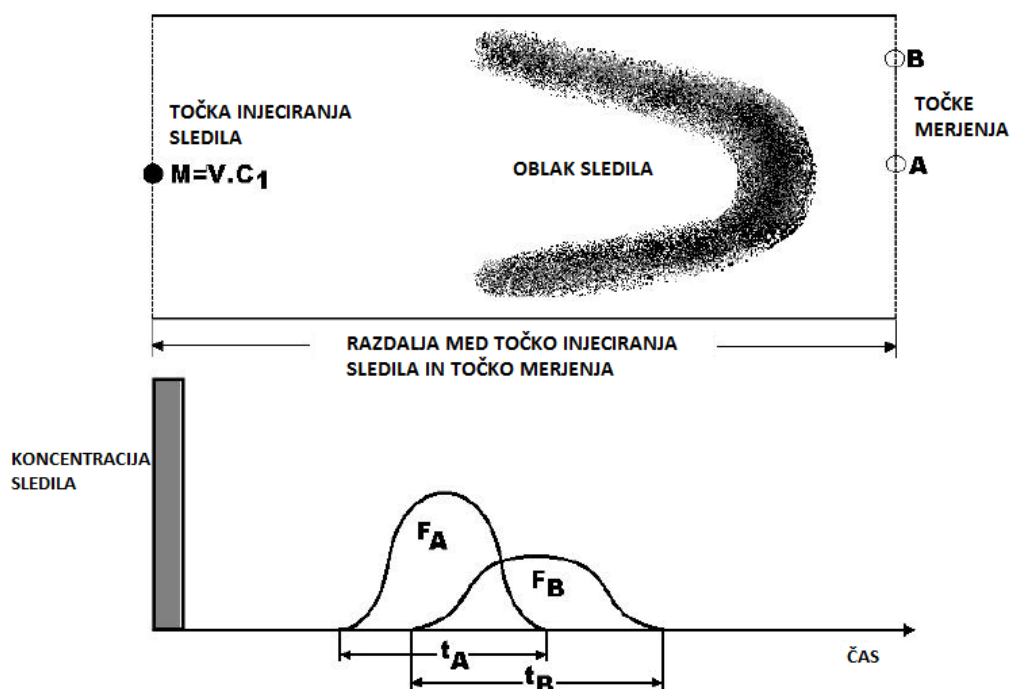
Instrumenti, ki se uporabljajo za merjenje časovno spreminjajoče se koncentracije sledila v določenem prečnem prerezu vodotoka, imajo posebno sondo, ki se jo potopi v vodotok, kjer le ta meri elektroprevodnost vode. Od sonde se pridobljeni podatki preko kabla prenesejo v elektronski ročni upravljalnik, s katerega smo izvajanje meritev predhodno zagnali.

Ker ima že sama naravna voda brez sledila določeno stopnjo mineraliziranosti, moramo to pri končnih rezultatih izvzeti, saj predstavlja moteč faktor. Zato je potrebno preveriti vrednost elektroprevodnosti vode pred vnosom sledila v vodotok ter tudi po času, ko je celotno sledilo že prešlo prečni profil, kjer izvajamo meritve (HMZ, 1999).

S slike 8 je razvidno, kako se oblikuje oblak injiciranega sledila. Ker je vodni tok v hudourniku najhitrejši v matici toka, tam sledilo potuje hitreje kot bližje bregu, kjer je zaradi trenja tok bolj upočasnen. Grafa, ki prikazujeta časovno spreminjanje koncentracije sledila v točki A in B, se razlikujeta v tem, da so pri merilnem mestu A, ki je pozicioniran v matici toka, koncentracije višje, pri merilnem mestu B, ki je bližje bregu, pa nižje. Zaradi večje hitrosti v matici toka je čas t_A krajši od časa t_B .



Slika 7: Prikaz vnašanja sledila pri metodi razredčenja (Brilly in Šraj, 2005)



Slika 8: Prikaz potovanja sledila (Flo-tronic, 2003)

Vrednost pretoka predstavlja ploščina med x-osjo ter grafom, ki prikazuje časovno spreminjanje koncentracije sledila (slika 9).

Enačba, po kateri določimo pretok, je (HMZ, 1999):

$$Q = \frac{M}{C \times t} = \frac{M}{F}, \quad (10)$$

kjer je:

Q pretok [l/s],

M količina sledila (injeciran) [g],

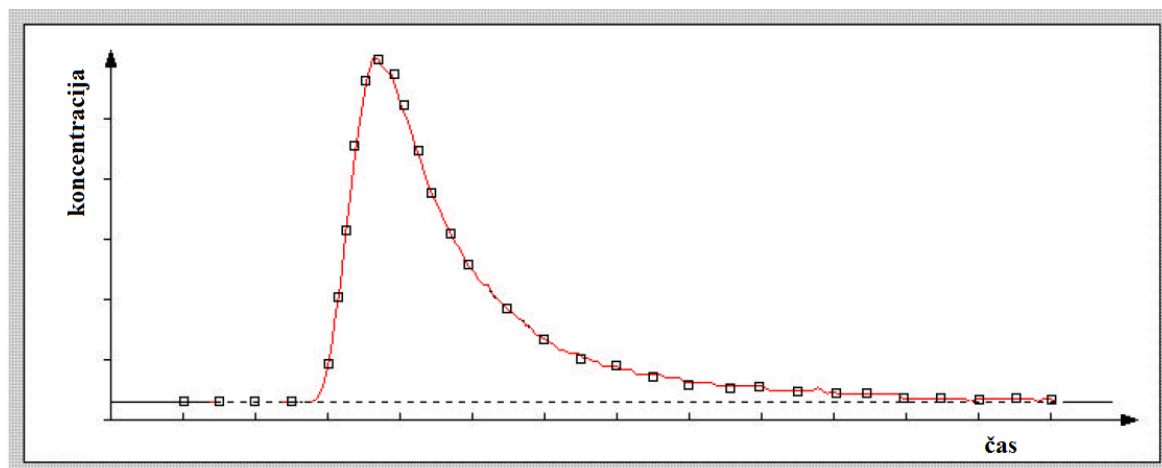
C koncentracija sledila (izmerjena) [g/l],

t čas [s],

F površina diagrama koncentracija sledila-čas skozi mersko točko.

Ker je potek časovnega spreminjanja koncentracije sledila krivulja (slika 9), ploščino pod grafom dobimo z integriranjem:

$$Q = \frac{M}{\int_t c(t)dt} \quad [\text{l/s}]. \quad (11)$$



Slika 9: Prikaz spreminjanja koncentracije sledila s časom (Flo-tronic, 2003)

Upoštevati je potrebno še umeritveni koeficient e , preko katerega se pretvarjajo pridobljeni podatki o elektroprevodnosti vode vodotoka z vnesenim sledilom v koncentracijo sledila. Dobimo ga s pomočjo enačbe (HMZ, 1999):

$$\tan \alpha = \frac{C}{EP} = e \quad . \quad (12)$$

EP predstavlja specifično elektroprevodnost vode [$\mu\text{S}/\text{cm}$], C pa kot že omenjeno koncentracijo sledila [g/l]. Kot alfa je naklon umeritvene premice na grafu odvisnosti specifične prevodnosti od koncentracije sledila (slika 10).

Slika 10: Diagram C/EP z umeritveno premico (HMZ, 1999)

Če pa upoštevamo pri računu še bazno elektroprevodnost, se koncentracijo določi po enačbi (HMZ, 1999):

$$C(t) = e \times (EP(T) - BEP(t)). \quad (13)$$

Pretok se potem izračuna na sledeč način:

$$Q = \frac{M}{e \times \int_0^t (EP(T) - BEP(t)) dt}. \quad (14)$$

Podatek o elektroprevodnosti je potrebno upoštevati na začetku in na koncu meritve, zato enačba dobi obliko:

$$Q = \frac{M}{e \times (\sum_{i=1}^n EP(i) - n \times \frac{EP(\text{začetek}) + EP(\text{konec})}{2}) \times \Delta t}, \quad (15)$$

kjer je:

Q	pretok [l/s],
M	količina sledila, ki smo ga injicirali [mg],
e	umeritveni koeficient,
n	število meritev,
Δt	časovni interval med meritvami [s],
$EP(i)$	elektroprevodnost podatka i [$\mu\text{S}/\text{cm}$],
$EP_{(\text{začetek})}$	elektroprevodnost v prvi minuti meritve [$\mu\text{S}/\text{cm}$],
$EP_{(\text{konec})}$	elektroprevodnost v zadnji minuti meritve [$\mu\text{S}/\text{cm}$].

3.3.2 Postopek izvedbe meritev

Postopek izvedbe meritev pretoka po metodi razredčenja se začne z izbiro in pripravo sledila. Izbrano sledilo (HMZ, 1999) ne sme biti toksično, saj bi s tem škodljivo vplivalo na ekosistem, topno mora biti v vodi pri normalni temperaturi, ga je možno enostavno in natančno stehtati, naj nebi že obstajal v samem vodotoku (razen če so količine zanemarljive), prav tako pa ne sme sprožiti nobenih reakcij z vodo in ostalimi elementi. Zaradi neškodljivosti, cene in primerne topnosti v vodi se najbolj pogosto uporablja kuhinjska sol. Količino le-te se določi glede na ocenjen pretok in sicer dva do dvanajst g/(l/s), upošteva pa se tudi dimenzije struge, dolžino meritvenega odseka, prisotnost turbulenc, bazno elektroprevodnost. Pomembno je, da zaradi zagotovitve zadovoljive točnosti meritev njeno težo določimo do enega odstotka natančno (HMZ, 1999).

V vodi raztopljeno sledilo injiciramo gorvodno od izvedbe meritev, ustreznost razdalja je med dvajset- in petdeset-kratnikom srednje širine profila oz. sto-kratnik najožjega profila. Za mesto injiciranja je najbolje, da izberemo območje turbulentnega toka, saj s tem zagotovimo dobro premešanost po celotnem profilu vodotoka. V nasprotnem pride do zastajanja sledila, kar pomeni, da ni enakomerno premešan, posledično rezultati meritev ne bodo merodajni. Preden pa injiciramo sledilo, je potrebno pripraviti merilni instrument. Njegov sestavni del, merilno sondo, se potopi v matico vodnega toka, pri čemer je obvezno potrebno zagotoviti, da je čez celoten potek meritev sonda popolnoma potopljena (HMZ, 1999).

3.3.3 Opis instrumenta Flo-Tracer in njegovega delovanja

Instrument, ki ga lahko uporabimo za merjenje pretoka po metodi razredčenja, se imenuje Flo-Tracer (slika 11). Je izredno natančen, zaradi robustnega ohišja pa tudi zanesljiv na dolgi rok. Njegov sestavni del je sonda, ki meri elektroprevodnost vodotoka ter podatke pošilja upravljavniku. V njem se po metodi razredčenja določi pretok za vsak časovni korak meritev (Flo-tronic, 2003). Tehnični podatki instrumenta so podani v preglednici 7.

Preglednica 7: Tehnični podatki instrumenta Flo-Tracer (Flow-tronic, 2003)

Parameter	Vrednosti
Razpon zaznave slanosti	0 – 2000 mg/l, z adapterjem je območje razširjeno do 5000 mg/l
Občutljivost na spremembo slanosti	0,1 mg/l
Natančnost merjenja slanosti	±1 % maksimalno
Razmerje prevodnost/slanost	1780
Razpon zaznave temperature	0 – 40 °C
Natančnost merjenja temperature	±0,2 °C

Pred začetkom uporabe Flo-Tracerja je potrebno le tega pravilno kalibrirati, saj to ključno vpliva na natančnost meritev pretoka (Flow-tronic, 2003). Ko prižgemo Flo-Tracer, izberemo možnost »Acquisition«. Nato podamo interval meritev v sekundah, ponujene vrednosti so 1, 2, 4, 8, 16 ali 32. Izbira intervala je zelo pomembna, saj z ustrezno izbiro kar najbolje ujamemo prehod oblaka sledila mimo merilnega mesta. Hitrejši kot je tok ter krajša kot je razdalja od mesta injiciranja sledila od merilnega mesta, krajši naj bi bil časovni interval ter obratno. Pomembno je, da mora Flo-Tracer do zaznave sledila izvesti vsaj sto meritev (pri intervalu 1 sekunda to pomeni 1min in 40s do zaznave sledila, pri intervalu 32 sekund pa 53min in 20s) (Flow-tronic, 2003). Nato določimo vremensko stanje v času izvedbe meritve (sončno, oblačno itd.), kar pa na samo meritev nima vpliva. Sledi vnos višine

vodostaja vodotoka, ki omogoča njegovo povezavo s kasnejšim izmerjenim pretokom. Vpišemo še do grama natančno izmerjeno količino soli. Priporočena je količina od dva do dvanajst gramov na l/s pretoka vodotoka, odvisno je predvsem, kako daleč je mesto injiciranja (večja oddaljenost pomeni večjo količino soli) (Flow-tronic, 2003). Vnesti je potrebno še razdaljo do mesta injiciranja v metrih. To določimo glede na obravnavan vodni tok, da je od mesta injiciranja do merilnega mesta zagotovljena popolna premešanost sledila po prečnem prerezu. K dobri premešanosti pripomorejo območja turbulentnega toka, kar pa pri hudournikih zaradi njihove narave običajno ni težava.

Ko poženemo izvedbo meritev, se nam glede na izbran časovni interval na ekranu izpiše trenutna izmerjena slanost. Ko instrument zazna, da je oblak sledila v celoti prešel merilno mesto, se meritve slanosti zaključijo, na ekranu pa se izpiše izmerjeni pretok (Flow-tronic, 2003).

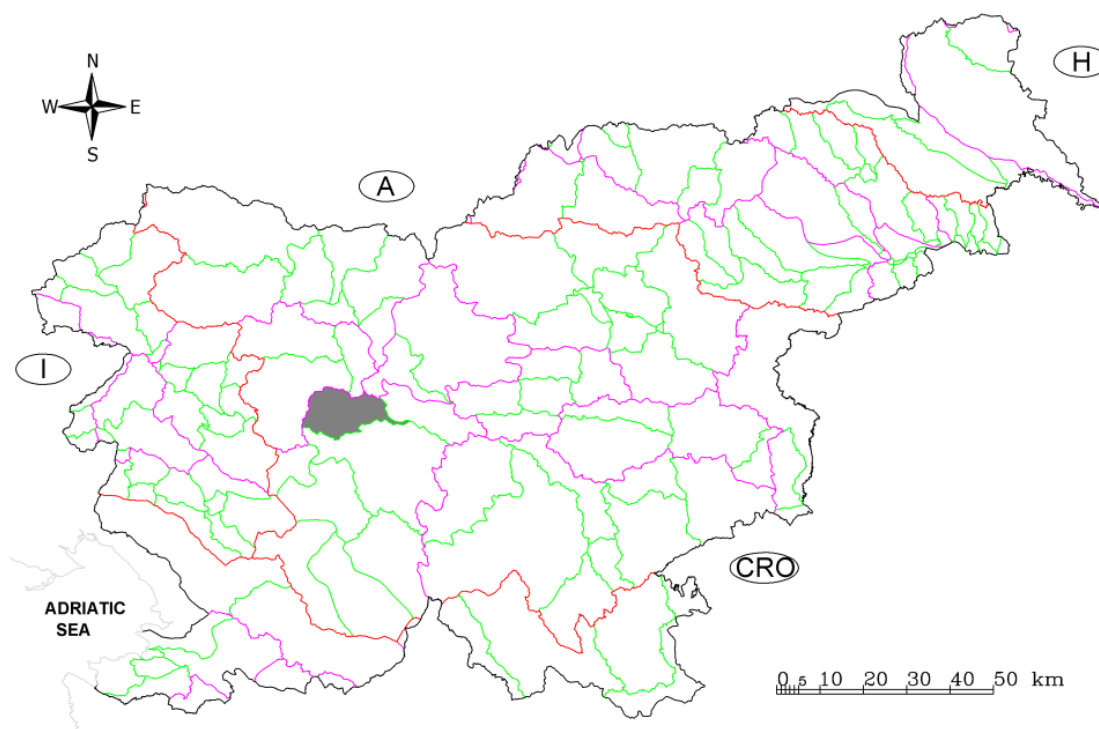


Slika 11: Instrument za merjenje pretoka Flo-Tracer (foto: Mole, 2014)

4 REZULTATI

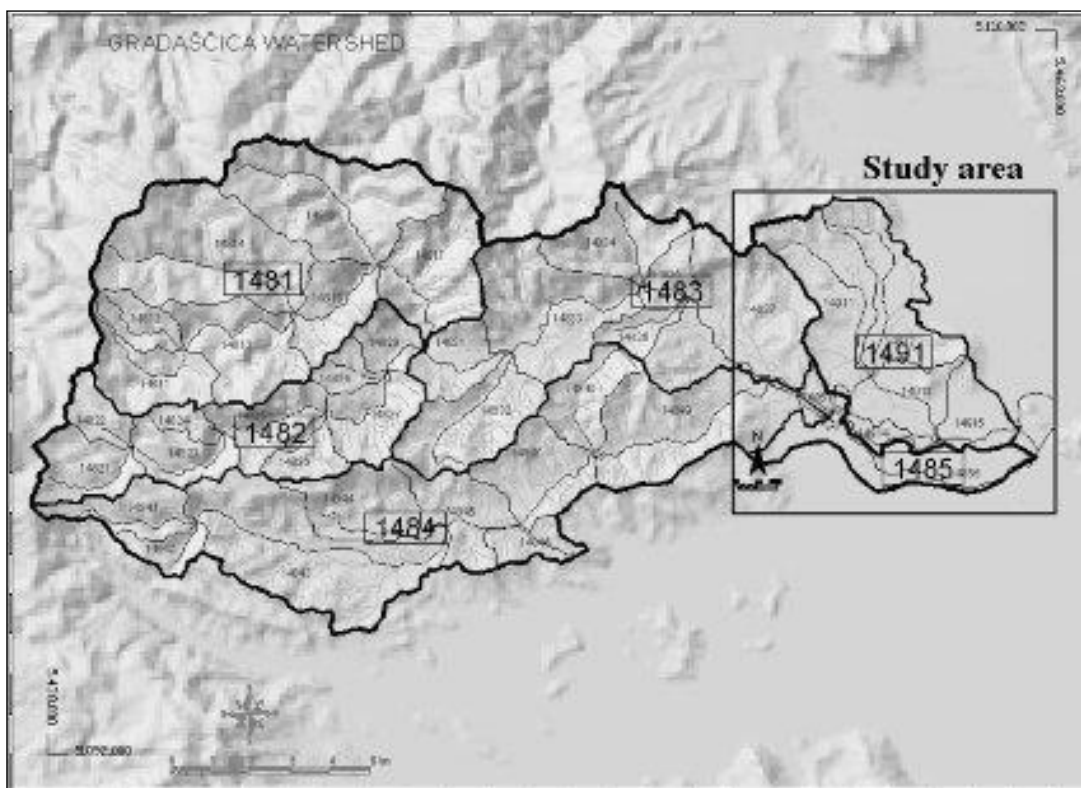
4.1 Porečje Gradaščice z Mačkovim grabnom

Mačkov graben kot del porečja reke Gradaščice leži v osrednjem delu Slovenije, na stičišču dinarskega in alpskega sveta (slika 12). Z lego vzhodno od razvodnice z Jadranskim povodjem porečje Gradaščice spada v Črnomoško povodje. Na značaj reke Gradaščice odločilno vpliva lega njenega povirnega dela v hribovju Polhograjskih dolomitov. Velika razgibanosti terena ter obilne padavine posledično pomenijo tipičen hudourniški odziv reke Gradaščice in njenih pritokov. V časih suše njeni pretoki znašajo le okoli 1 m³/s, v času obilnejših padavin pa lahko narastejo tudi prek 60,0 m³/s (Rusjan, 2016). 18. Septembra 2010 je bila tako izmerjena vrednost kar 65,4 m³/s (ARSO, 2010). Gradaščica je znana, da v dolvodnih delih porečja poplavlja. Zaradi širjenja pozidanih površin Ljubljane na območju Viča proti jugozahodu v zadnjih desetletjih, torej na poplavno območje Gradaščice, prihaja v primerih večjih poplav do zmeraj večje gospodarske škode.



Slika 12: Lega porečja Gradaščice v osrednji Sloveniji (Rusjan, 2016)

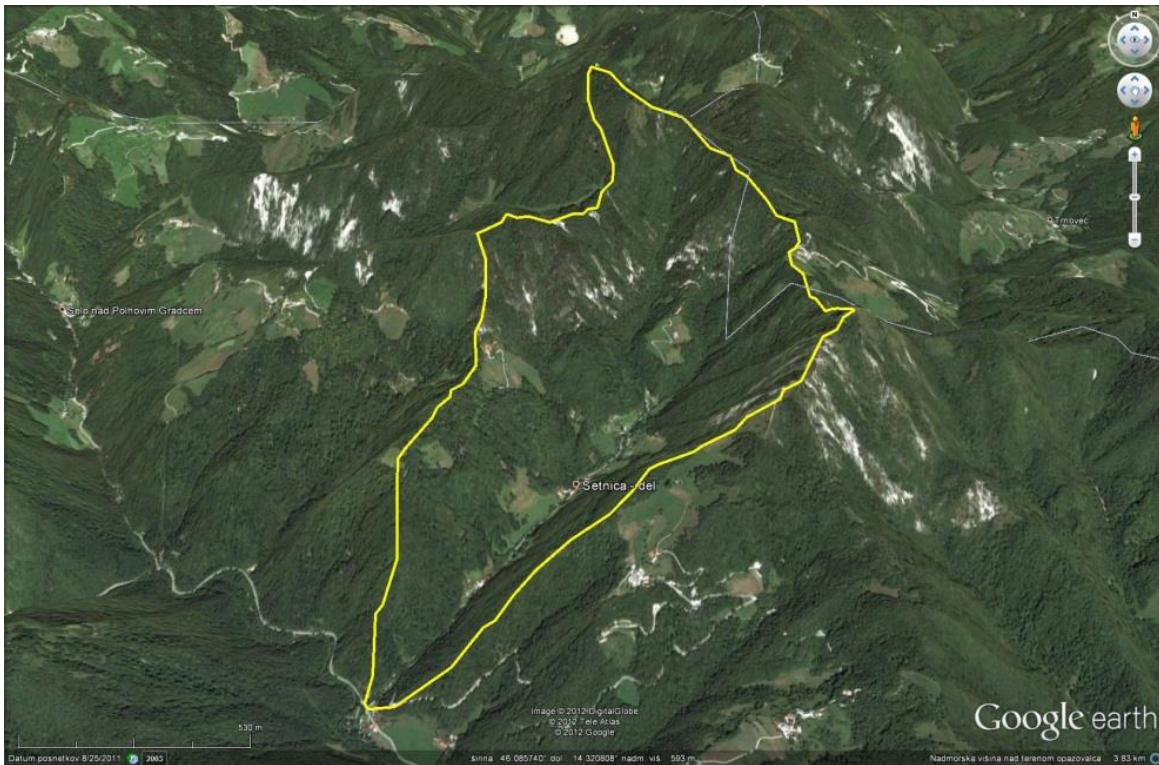
Prispevna površina porečja Gradaščice znaša 158,82 km² (slika 13), dolžina glavne struge je 26,1 kilometrov (Rusjan, 2016).



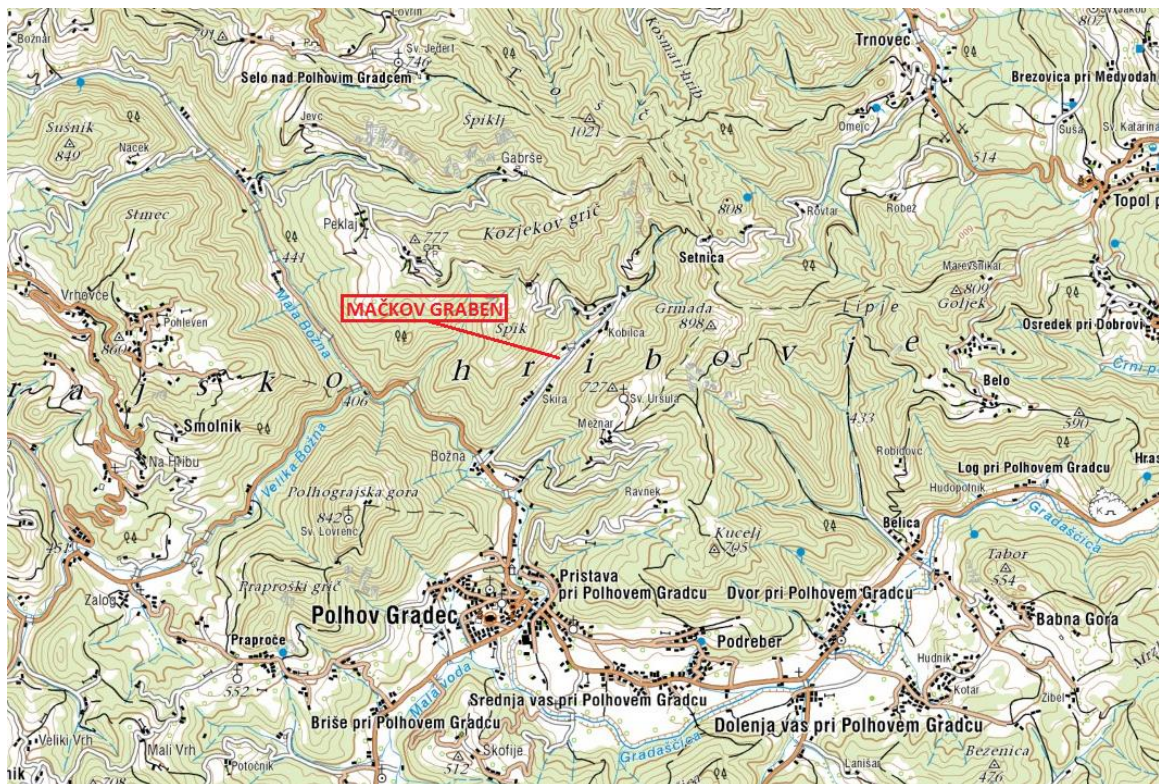
Slika 13: Porečje Gradaščice (Mačkov graben spada v šifrant 1481) (Rusjan, 2016)

Mačkov graben je levi pritok hudournika Božna (sliki 14 in 15). Slednja se po sotočju z Malo vodo južno od naselja Polhov Gradec združi v reko Gradaščico. Za hudournik Mačkov graben velja, da pretok tekom leta, tudi v sušnih obdobjih, nikoli ne upade povsem na nič. Za sam pretok hudournika so značilne hitro dosežene konice v času močnejših padavinskih dogodkov, ki pa tudi hitro upadejo (Bezjak in sod., 2014)

Prispevna površina Mačkovega grabna znaša 2,33 kvadratnega kilometra, kar predstavlja odstotek in pol celotnega prispevnega območja reke Gradaščice. Dolžina glavne struge do izliva v Božno meri 1780 metrov, njen naklon pa ima povprečno vrednost 9,3 odstotka (Rusjan, 2016).



Slika 14: Porečje Mačkovega grabna (vir podlage: Google Earth, 2016)

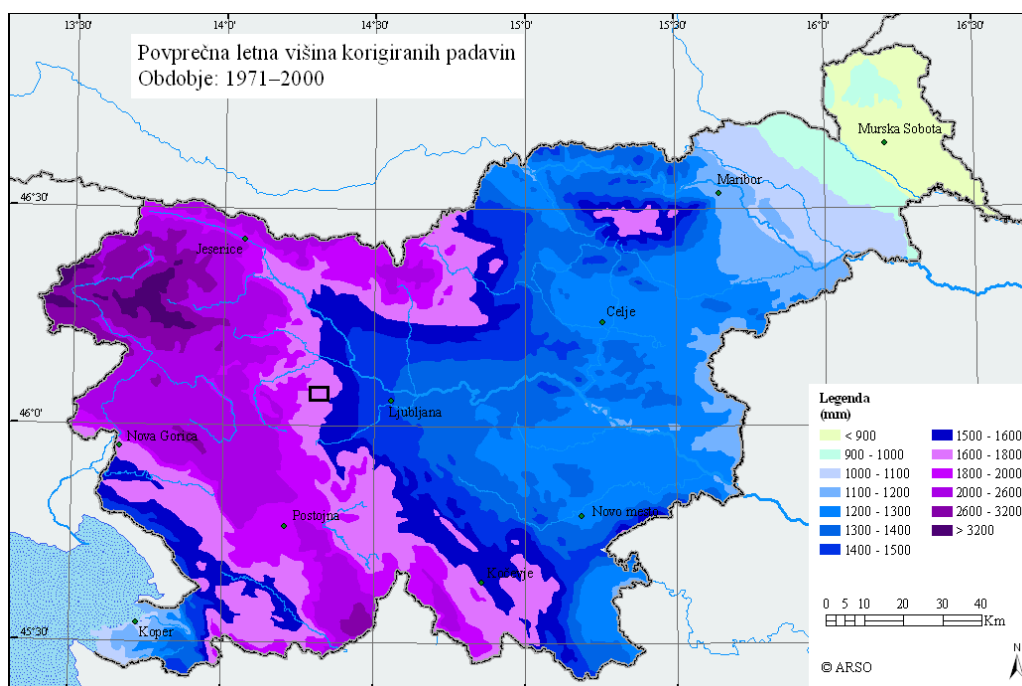


Slika 15: Severozahodna smer Mačkovega grabna (vir podlage: Geopedia, 2016)

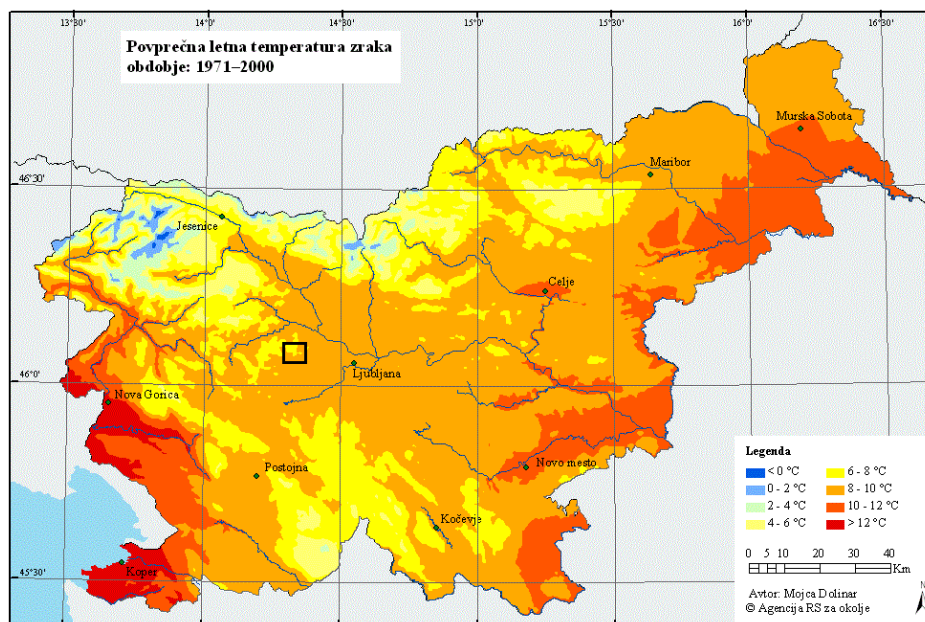
4.1.1 Podnebje

Porečje Gradaščice spada v zmerno celinsko podnebje. Vpliv sredozemskega podnebja se kaže v obsežnejših količinah padavin v jesenskih mesecih, vpliv celinskega podnebja pa v večjih količinah padavin poleti. Zaradi lege med alpskim in dinarskim svetom je letna količina padavin kar obilna. Povprečna letna vrednost za obdobje 1971-2000 se giblje med 1600 in 1800 mm (slika 16), leta 1965 je bila izmerjena do zdaj največja količina, to je 2750 mm (ARSO, 2016).

Povprečna temperatura najhladnejšega meseca v letu znaša od 0 do -3 °C, najtoplejšega meseca pa od 15 do 20 °C (ARSO, 2016). Kot je razvidno iz slike 17, znaša povprečna letna temperatura zraka za območje Mačkovega grabna med 6 – 8 °C v severovzhodnem delu (najvišji del) ter 8 – 10 °C v preostalem delu. Pomembno je upoštevati tudi splošno značilnost v Polhograjskem hribovju, da se na prisojnih pobočjih med 600 in 800 metri nadmorske višine v pozni jeseni ter pozimi pojavi pas toplega zraka kot posledica temperaturnega obrata. Takrat so ta prisojna pobočja toplejša od nižje ležečih dolinskih delov (Rusjan, 2016).



Slika 16: Povprečna letna količina padavin (črni kvadrček označuje lego Mačkovega grabna) (ARSO, 2016)



Slika 17: Povprečna letna temperatura zraka (črni kvadrček označuje lego Mačkovega grabna) (ARSO, 2016)

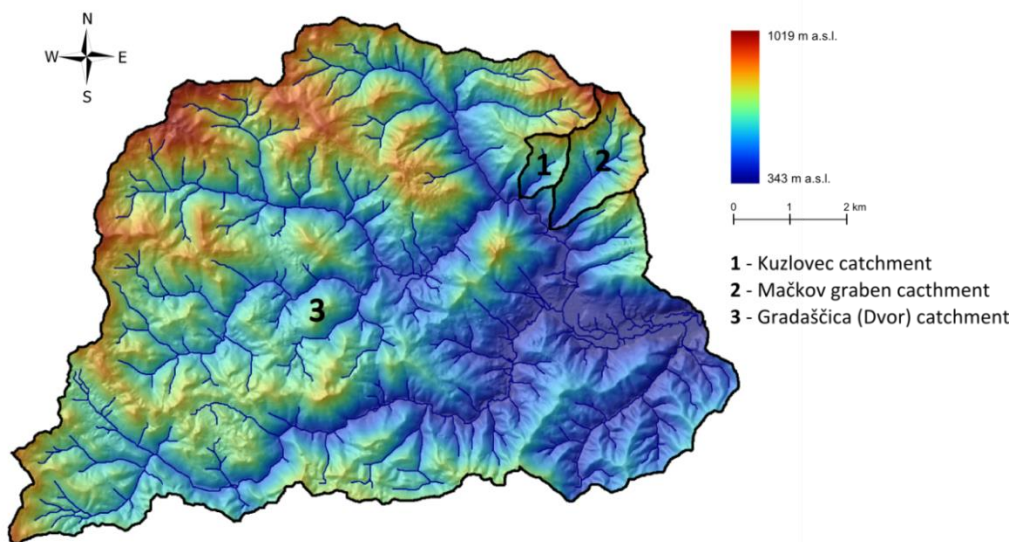
4.1.2 Topografija

Za porečje reke Gradaščice je značilen razgiban povirni del s številnimi strmimi dolinami, dolvodno pa se teren počasi spušča proti vzhodu k izravnani Ljubljanski kotlini. Mejo porečja Gradaščice na severu predstavljajo vrhovi Pasja ravan, Tošč in Grmada. Na jugu meja poteka po vrhovih na južnem robu doline Horjul-Dobrova. Na zahodu mejo predstavljata vrhova Kovček in Sivka. Velika razgibanost terena se dobro pokaže v razliki med najnižjo in najvišjo višinsko koto. Najnižja tako znaša 343 metrov, najvišja 1019 metrov, v povprečju 616 metrov. Značilni so tudi veliki nakloni, maksimalno 215 odstotkov, v povprečju pa 40,4 odstotkov (Rusjan, 2016).



Slika 18: Mačkov graben - pogled proti jugozahodu (foto: Mole, 2016)

Mačkov graben je ujet v severni del porečja Gradaščice, mejo njegovega porečja predstavljajo s severa vrhovi Grmada in Tošč ter z vzhoda in zahoda hrbta v smeri severozahoda. Kot že omenjeno, je prav za ta del porečja Gradaščice značilen velik povprečni naklon površja ter precejšnje višinske razlike (slika 18 in 19). Največja višina znaša 1015 metrov, najmanjša 384 metrov ter srednja 649 metrov nad morjem. Naklon porečja Mačkovega grabna je v povprečju 30,5 stopinj, največja vrednost pa znaša kar 58,5 stopinj (Rusjan, 2016).



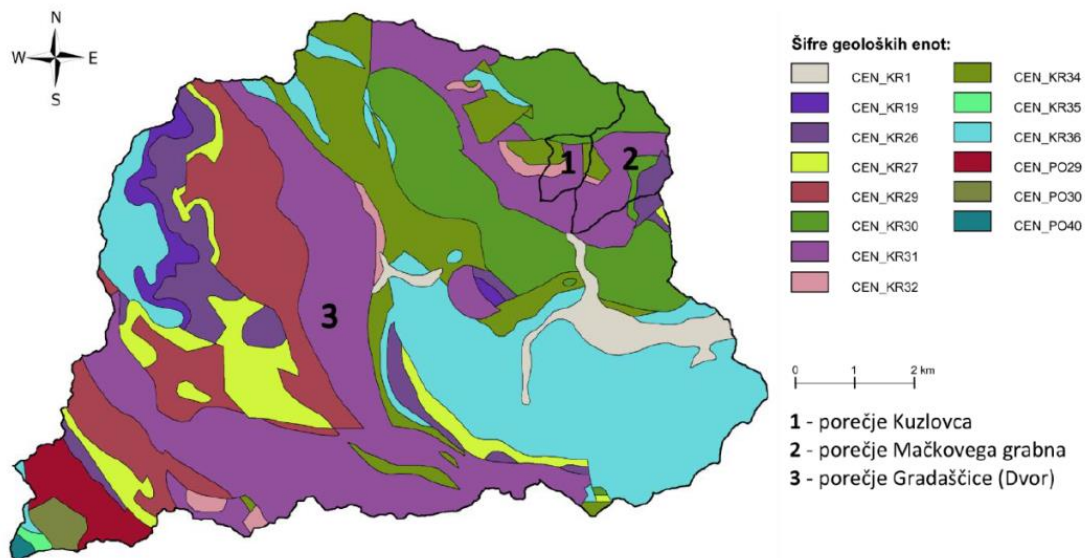
Slika 19: Povirni del reke Gradaščice z s porečjem Mačkovega grabna (označen s številko 2) (Rusjan, 2016)

4.1.3 Geologija in pedologija

Z vidika geologije je porečje reke Gradaščice zelo pestro (slika 20). Najdemo tako rečne kot kraške značilnosti površja. V Polhograjskem hribovju se pogosto izmenjuje karbonatna in nekarbonatna osnova, v kateri pa se pojavljajo tudi mlajše kamnine, večinoma iz obdobja kvartar. Okoli petdeset odstotkov karbonatnih kamnin predstavlja dolomit. Peščenjaki in glinavci so glavni predstavniki nekarbonatnih kamnin, izvirajo pa iz geološkega obdobja paleozoik. Vzhodno od mesta, kjer se združita Božna in Mala voda, se nahajajo najstarejši agregati kot so glinasti melj, alevroliti, peščenjaki in konglomerati. V največji zastopanosti so kamnine iz obdobja trias, njeni predstavniki so dolomiti, laporni apnenci in peščeni skrilavci. Rečne nanose pričakovano najdemo v dolinah, v večji meri so zastopane dolvodno od sotočja reke Božne in Male vode (Cvetko, 2013).

Če se osredotočimo na porečje Mačkovega grabna (na sliki 20 je označen s številko dve), lahko iz geološke karte porečja Gradaščice ugotovimo njegovo geološko sestavo, ki je glede na majhnost

porečja izredno pestra. Prevladuje vijolično obarvan laporni apnenec, skrilavec, dolomiti in oolitni apnenec. Na vzhodnem delu najdemo tudi kristalast dolomit, na zahodnem delu pa v manjši meri tudi temno siv apnenec, dolomit-žazarske plasti, neplastovit dolomit, rdeč peščenjak, alevrolit, prehodi v skrilavec in konglomerat (glej preglednico 8).

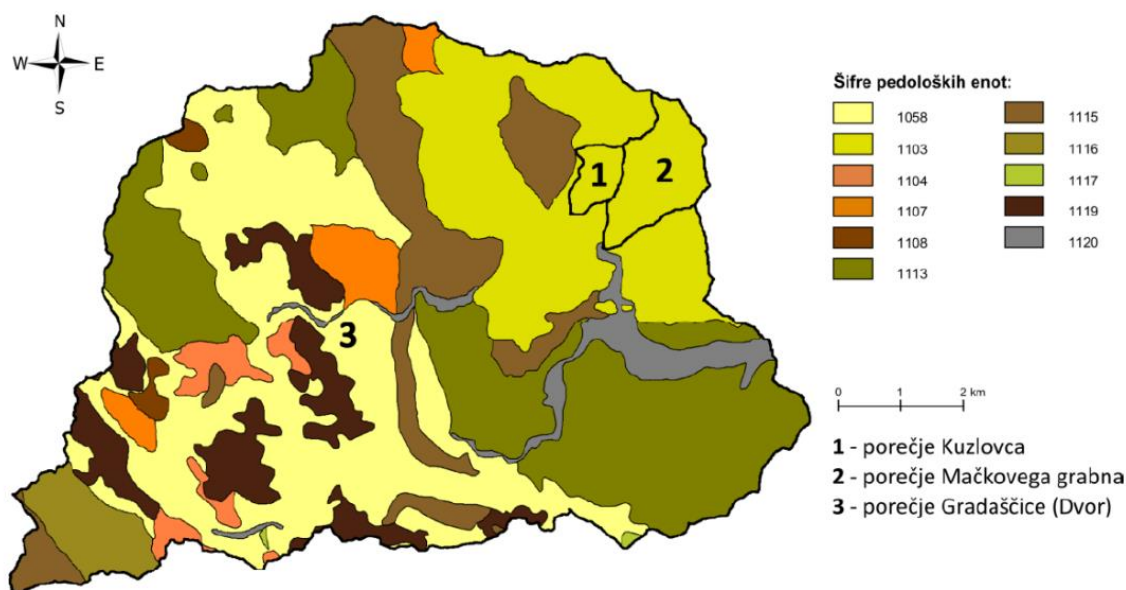


Slika 20: Geološka karta povirnega dela porečja Gradašče (Rusjan, 2016)

Preglednica 8: Šifre kamninske sestave porečja Gradaščice (Rusjan, 2016)

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

Tako kot z vidika geologije, je porečje Gradaščice pestro tudi z vidika pedologije (slika 21). Kot je razvidno iz slike 21, prevladujejo pedološka enota 1058, 1113 ter enota 1103, ki pokriva tudi celotno porečje Mačkovega grabna (na sliki 21 označen s številko 2).



Slika 21: Pedološka karta povirnega dela porečja Gradaščice (Rusjan, 2016)

Preglednica 9: Šifre pedološke sestave porečja Gradaščice (Rusjan, 2016)

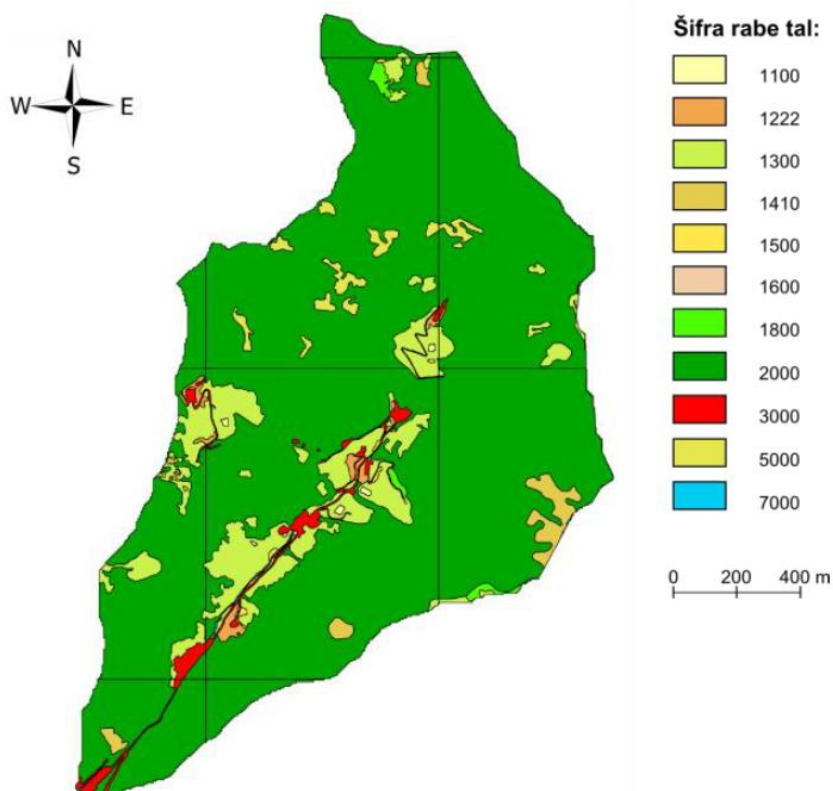
Šifra	Opis šifre
1058	Rendzina, na apnencu in dolomitu, sprsteninasta 80%, rendzina, na apnencu in dolomitu, prhninasta 20%
1103	Rendzina, na apnencu in dolomitu, prhninasta 50%, rendzina, na apnencu in dolomitu, sprsteninasta 50%
1104	Rendzina, na apnencu in dolomitu, sprsteninasta 70%, rjava, pokarbonatna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

4.1.4 Raba tal

Površino porečja Mačkovega grabna v skoraj 85 % pokriva gozd, od tega v štiridesetih mešani ter v osemnajstih odstotkih listnati gozd (sliki 22 in 23). Pozidanih zemljišč ni veliko, njihov delež znaša le slaba dva odstotka, najdemo jih v večini ob strugi Mačkovega grabna (slika 22). Trajni travniki, ki predstavljajo drugi največji delež površine (9,4 %), se največ nahajajo prav ob pozidanih zemljiščih. Vodne površine predstavljajo delež 0,1 %, kar vključuje Mačkov graben z vsemi stranskimi pritoki.



Slika 22: Površino v večini prekriva gozd, ostali tipi rabe tal so bolj skoncentrirani ob pozidanih zemljiščih (foto: Mole, 2016)



Slika 23: Prikaz rabe tal Mačkovega grabna (Rusjan, 2016)

Preglednica 10: Šifre rabe tal na porečju Mačkovega grabna (Rusjan, 2016)

Šifra	Opis rabe tal	Površina (km ²)	Delež (%)
2000	Gozd	1.966	84.8
1300	Trajni travnik	0.217	9.4
1410	Kmetijsko zemljišče v zaraščanju	0.033	1.4
1500	Drevesa in gmičevje	0.004	0.2
1222	Ekstenzivni travniški sadovnjak	0.014	0.6
3000	Pozidano in sorodno zemljišče	0.039	1.7
1100	Njive	0.002	0.1
5000	Odprto zemljišče s posebnim rastlinskim pokrovom	0.029	1.3
1800	Kmetijsko zemljišče poraslo z gozdnim drevjem	0.011	0.5
7000	Vodne površine	0.003	0.1

4.1.5 Hidrološki podatki za porečje Mačkovega grabna

Na območju severozahodnega dela porečja Gradaščice je bila v preteklih letih s strani Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani nameščena različna merska oprema, ki je namenjena merjenju hidroloških količin. Pred izlivom v hudournik Božna je na potoku Mačkov graben ter na njegovem sosednjem potoku Kuzlovec nameščena tlačna sonda, ki v deset-minutnih intervalih beleži višino vodostaja obeh potokov, hkrati pa meri tudi temperaturo vode. Po prispevnem območju Mačkovega grabna in Kuzlovca je razporejenih tudi šest dežemerov, ki na dvajset minut avtomatsko beležijo količino padlih padavin. Intenziteto padavin ter spremljanje fizikalnih lastnosti padavinskih delcev beleži tudi disdrometer, ki je postavljen ne daleč stran od porečja Kuzlovca in Mačkovega grabna, v vasi Črni vrh (Bezak in sod., 2014).

Pri modeliranju porečja Mačkovega grabna smo uporabili podatke, pridobljene s prej omenjenimi instrumenti. Za umerjanje hidrološkega modela smo izbrali nekaj izmerjenih padavinskih dogodkov. Da bi model čim bolje preverili, smo padavinske dogodke izbirali v različnih letnih časih. Tako smo izbrali padavinski dogodek iz spomladanskega in jesenskega deževja, ko so padavine razporejene na več ur. Iz poletnega obdobja pa smo izbrali tipično nevihto, ko v kratkem času intenziteta padavin močno naraste in tudi hitro oslabi. Za umerjanje modela smo uporabili tudi pripadajoče merjene pretoke izbranih padavinskih dogodkov. Dobro umerjen hidrološki model bi moral dovolj natančno podati obliko hidrograma ter vrednostni razred pretokov v obravnavanem profilu na prispevnem območju. Čim bolj točno pa mora določiti tudi konico pretoka (velikost pretoka ter časovni okvir), saj je to velikokrat podatek, ki nas zanima.

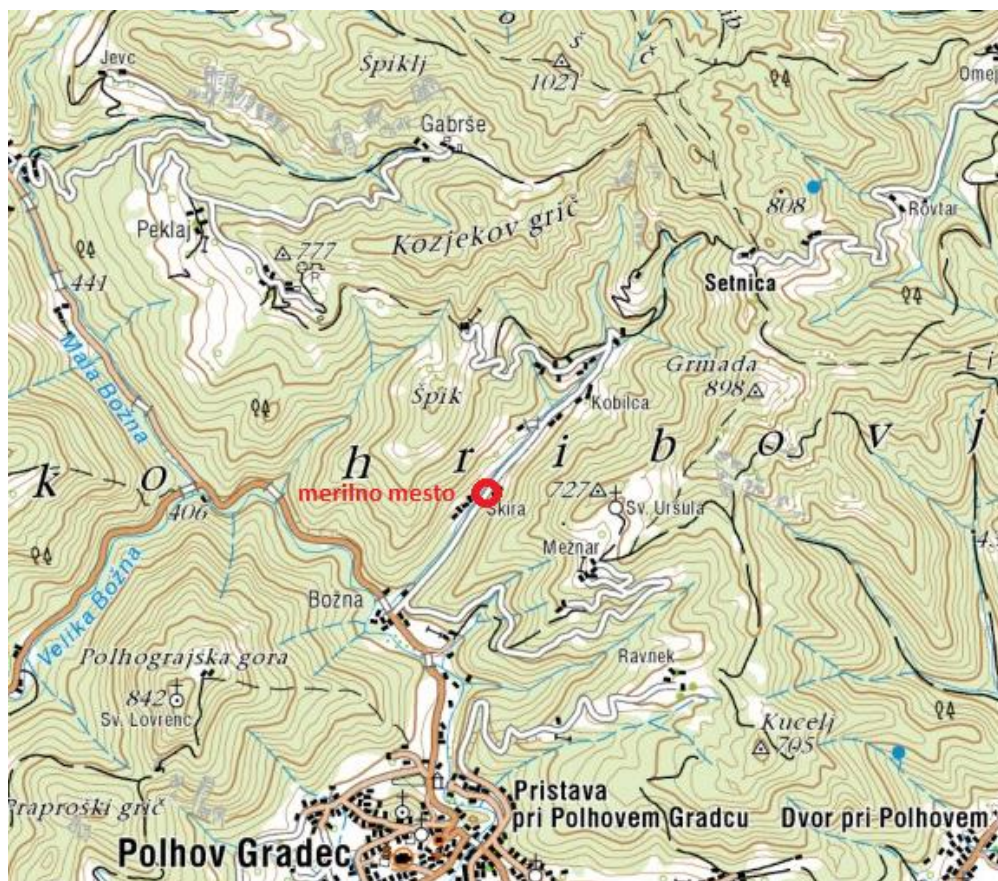


Slika 24: Tlačna sonda, locirana v toku sosednjega Kuzlovca blizu iztoka v Božno (foto: Mole, 2014)

4.2 Meritev pretoka na Mačkovem grabnu

4.2.1 Izbira merilnega mesta ter izvedba meritev

Izbira merilnega mesta je lahko pri hudournikih zaradi težje dostopnosti, velikih padcev struge in okoliškega terena ter običajnega spreminjanja oblike struge kar težavna. Mačkov graben ima v zadnjem delu toka, preden se pridruži reki Božni (slika 25), nekaj manjših hudourniških pregrad, ki so povsem zasute s prodom. Tam ima hudournik precej manjši padec (slika 26), struga pa je bolj stabilna. Zato smo merilno mesto izbrali pred eno izmed teh pregrad, gledano gorvodno je to približno 600 metrov od mesta, kjer se Mačkov graben zliva v Božno (slika 25). Merilno mesto je zaradi lege ob cesti dobro dostopno, kar je omogočilo lažjo izvedbo meritev.



Slika 25: Lokacija merilnega mesta (vir podlage: Geopedia, 2016)

Meritve so se izvajale v jesenskih mesecih ter proti koncu zime, ko so bile napovedane obilnejše padavine. Zaradi majhnosti porečja Mačkovega grabna je nujna hitra odzivnost, da uloviš pretok, ki je vsaj blizu konice, saj v primeru močnejšega naliva pretok v času približno ene ure po začetku naliva hitro naraste ter po zmanjšani intenziteti padavin v času dobre ure tudi strmo upade.



Slika 26: Del vodotoka, kjer smo izvajali meritve (foto: Mole, 2014)

Izvedba meritev se je začela s pripravo sledila. Glede na ocenjen pretok smo določili primerno količino kuhinjske soli (približno 1000 g) ter jo raztopili v vedru vode. Sledila je priprava merskega instrumenta Flo-tracer. Potrebno je vnesti časovni interval meritev, vrednost vodostaja, točno izmerjeno težo soli ter razdaljo od mesta injiciranja. Sledi potopitev sonde v matico vodnega toka. Nato smo začeli z izvajanjem meritve, na razdalji približno 30 metrov pa smo v vodotok izlili celotno količino vode z raztopljeno soljo. Ko celotno sledilo steče mimo merilnega mesta, se meritev zaključi.

4.2.2 Rezultati meritev

Po zaključku meritev instrument Flo-Tracer na ekranu izpiše vrednost pretoka. Rezultati meritev so podani v preglednici 11.

Preglednica 11: Izmerjene vrednosti pretoka in globine vode.

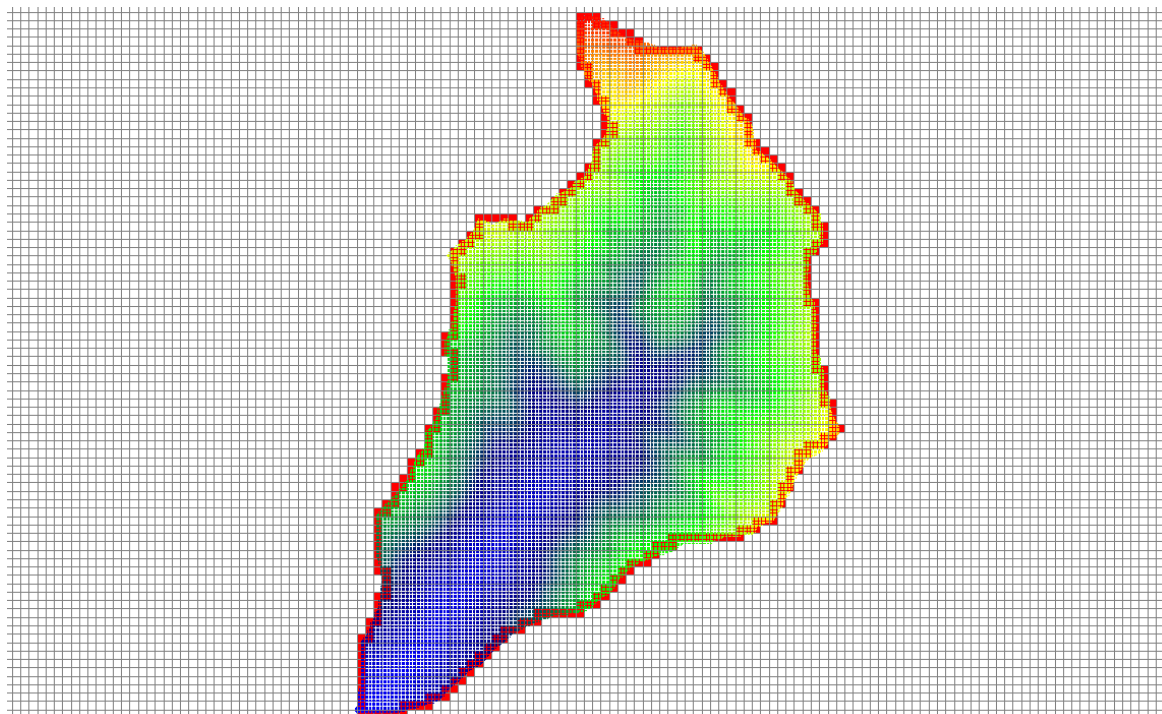
Datum meritve	Izmerjen pretok [l/s]	Globina [cm]
05.11.2013	265	25
06.01.2014	295	27
20.01.2014	166	20

4.3 Rezultati hidrološko-hidravličnega modela Flo-2D

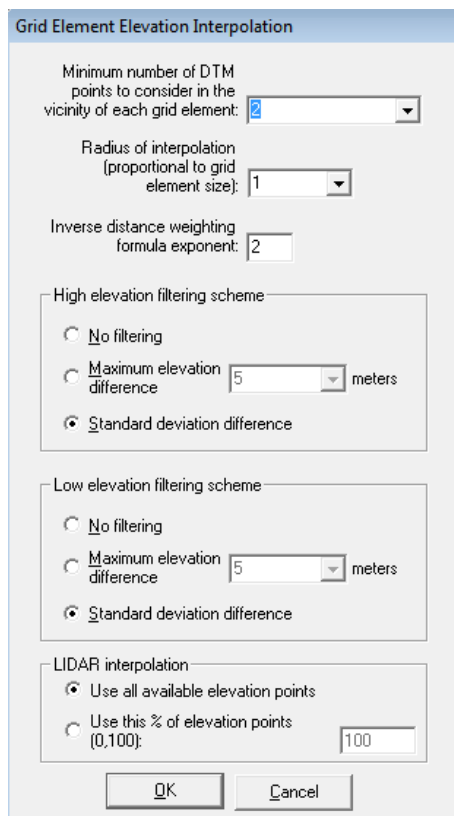
4.3.1 Vnos topografskih podatkov

Izdelavo hidrološkega modela v programu Flo-2D začnemo z vnosom geometrijskih podatkov. Z vnosom datoteke .DEM dobimo višinske točke prispevnega območja Mačkovega grabna. Točke so razporejene po mreži z medsebojno razdaljo 5 metrov. Sledi določitev velikosti elementa sistema mreže, s katero prekrijemo obravnavano območje. Ker je površje Mačkovega grabna zelo razgibano, je izbira ustrezne velikosti celice zelo pomembna. S prevelikim elementom preslabo predstavimo realno površje v modelu, s premajhnim elementom pa precej podaljšamo čas simulacije. Izberemo velikost elementa s stranico 15 metrov, za katero smo ugotovili, da dovolj dobro prikaže topografijo, hkrati pa pomeni ugoden čas izračuna oz. simulacije modela.

Sledi označitev računskega območja tj. z rdečimi celicami omejimo območje (slika 27), ki je vključeno v sistem računa. Nato je potrebno interpolirati višinske točke (slika 28). Tako vsaka celica mreže dobi svoj podatek o nadmorski višini.



Slika 27: Obravnavno območje v GDS



Slika 28: Interpolacija višinskih točk

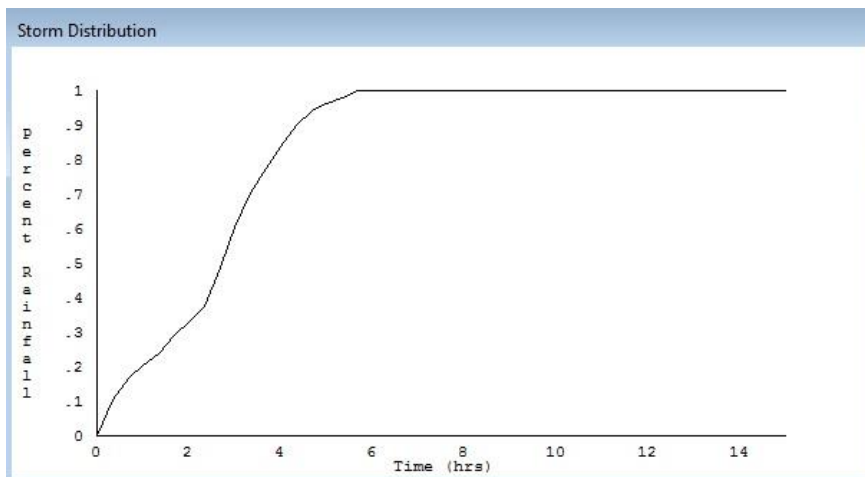
4.3.2 Koeficient hrapavosti površine

Hrapavost površine poglavitno vpliva na napredovanje vodnega toka, zato je v modelu potrebno čim bolj točno oceniti vrednost Manningovega koeficienta hrapavosti za vsak tip rabe tal. Ker kar 85 odstotkov prispevnega območja Mačkovega grabna prekriva gozd, ima tako tolikšen delež celic podano vrednost koeficienta hrapavosti 0,30. Trajnim travnikom, ki predstavljajo slabih 10 odstotkov območja, smo določili vrednost koeficienta 0,03. Urbanim površinam, ki predstavljajo tretji največji delež, smo določili vrednost 0,05.

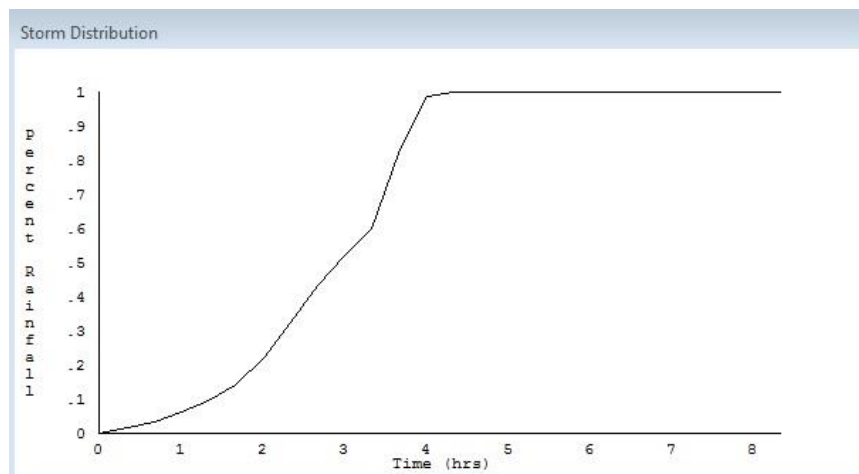
4.3.3 Padavine in izgube

Padavine vnesemo v razdelku »Rain«. Na voljo imamo petnajst različnih metod razporeditve padavin. Izberemo ročni vnos padavin, saj želimo modelirati točno določen padavinski dogodek. Padavinski podatki se shranijo v datoteki RAIN.DAT. Padavine so enakomerno razporejene po celotnem prispevnem območju.

Prvi padavinski dogodek, ki smo ga obravnavali, je iz januarja 2014, ko je v času 15 ur padlo 25,6 mm dežja. Podatke vnesemo na način, da za vsak časovni korak določimo, kolikšen odstotek kumulativne vsote padavin je padlo v njem. Strma krivulja (glej sliko 29) med začetkom in šesto uro padavinskega dogodka kaže, da so padavine skoncentrirane v tem časovnem obdobju. Drugi obravnavani dogodek je iz novembra 2014, ko je v času osmih ur padlo 13 milimetrov padavin (slika 30).



Slika 29: Vnos padavin v programu – padavinski dogodek 19.-20. januar 2014



Slika 30: Vnos padavin v programu – padavinski dogodek 15.-16. november 2014

Ker površinski odtok določajo učinkovite padavine, je potrebno definirati delež, ki se od vseh padlih padavin izgubi. Razliko v količini med padlimi in učinkovitim padavinami predstavljajo izhlapevanje, infiltracija, zadrževanje v kotanjah, določen delež pa prestreže tudi rastlinje. V modelu Flo-2D lahko upoštevamo začetne izgube, izgube zaradi infiltracije ter izgube zaradi izhlapevanja. Za izračun padavinskih izgub v programu smo izbrali metodo SCS. V uporabniškem vmesniku določimo začetno vrednost koeficienta CN za posamezen tip površja (vrednosti definirane pri modelu HEC-HMS).

4.3.4 Kontrolni parametri

Ko imamo pripravljene podatke o geometriji, hrapavosti, padavinah in padavinskih izgubah, je pred izračunom potrebno nastaviti kontrolne parametre modela (slika 31). Določimo čas simulacije ter časovni korak predstavljenih izpisov, kar prilagodimo izbranemu padavinskemu dogodku ter vhodnim podatkom. Ker imamo vnešene podatke o padavinah, odključamo v razdelku fizični procesi upoštevanje padavin in infiltracije v računu. Pomembno je določiti tudi numerične stabilnostne parametre, da izračun lahko poteka. Za »Surface Detention« (TOL) tj. minimalna globina, ki jo model še upošteva pri odtoku, izberemo začetno vrednost 0.01. Vrednost »Dynamic Wave Stability Coefficient« nastavimo na 1. Ostala dva parametra pustimo kot je prednastavljeno.

The screenshot shows the 'FLO-2D Control Variables' dialog box. It is organized into several sections:

- Time Control and Plot Variables:** Simulation Time (hrs): 15, Output Interval (hrs): 0.33, Graphics Display: Text Screen, Detailed Graphics, Metric, Backup File.
- Global Data Modification:** n-value Adjustment: 0, Floodplain Limiting Froude No: 0, Flow Depth for Depth Duration Analysis: 0, Shallow Flow n-value: 0.2, Bulking Concentration: 0, Encroachment Depth: 0, Area Reduction Factor: 0.
- System Component Switches:** Main Channel, Area Reduction Factors (ARF), Streets, Multiple Channels (Rill and Gullies), Levees.
- Physical Processes Switches:** Rainfall, Infiltration, Evaporation, Mud/Debris, Sediment Transport, None, MODFLO-2D Modelling.
- Conveyance Structure Switches:** Hydraulic Structures, Floodway Analysis, Debris Basin.
- Floodplain Display Options:** Print Options: Detailed Output, Create Supercritical Output File.
- Channel Display Options:** Check "Main Channel" to activate "Channel Print Options", Channel Print Options: No Channel Output.
- Time Lapse Output:** Time Lapse Output, Output Interval (hrs): 0.
- Graphics Display:** Select "Detailed Graphics" in "Time Control and Plot Variables" frame, Update Time Interval (hrs): 0.
- Numerical Stability Parameters:** Surface Detention: 0.004, Dynamic Wave Stability Coefficient: 1, Percent Change in Flow Depth: 0.2, Courant Number (range: 0.1 to 1.0): 0.8.

At the bottom, there are buttons for 'Animate Flow within GDS', 'Run FLO-2D (Save Files)', 'Run FLO-2D (Do not Save Files)', 'Save FLO-2D input files', and 'Close'.

Slika 31: Vnos časa simulacije kontrolnih parametrov

4.3.5 Umerjanje modela Flo-2D

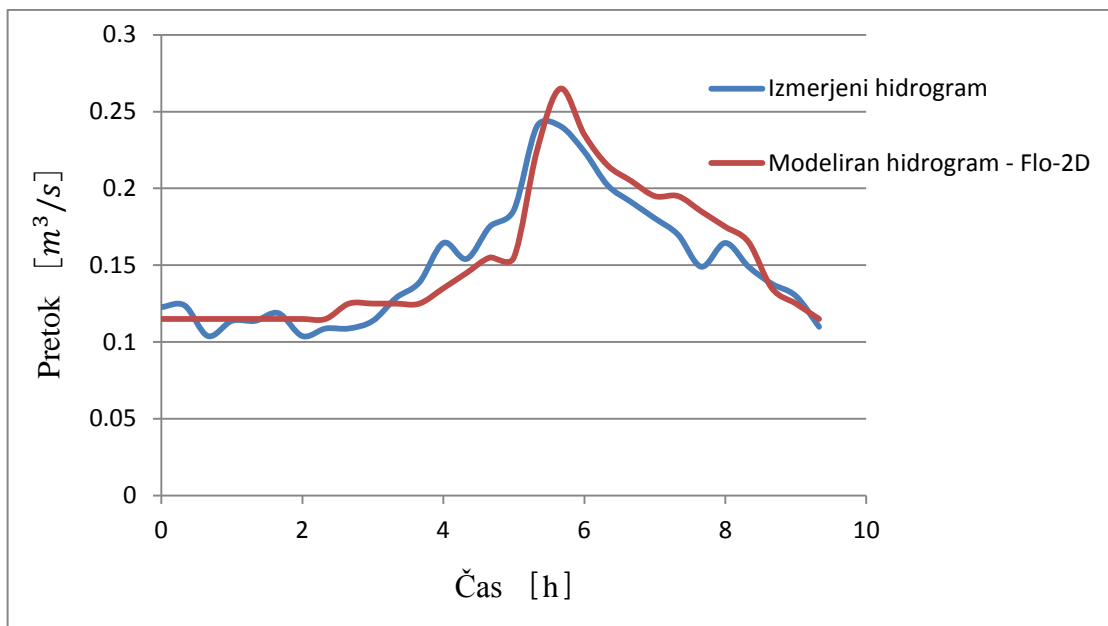
Z umerjanjem bomo dobili uporabno vrednost modela. Modeliran hidrogram na iztočni točki iz Mačkovega grabna bi moral biti za določen padavinski dogodek čim bolj podoben hidrogramu izmerjenih pretokov. Boljše ujemanje merjenega in modeliranega hidrograma dosežemo v Flo-2D na več načinov.

Kot se izkaže skozi izvajanje simulacij, lahko večje ujemanje dosežemo s korigiranjem Manningovega koeficienta hrapavosti. Večja kot je njegova vrednost za posamezno rabo tal, počasnejše je napredovanje površinskega toka in obratno. Ker praktično devetdeset odstotkov površine Mačkovega grabna predstavlja gozd, spreminjamo predvsem koeficient za ta tip pokrovnosti površja, saj najbolj vpliva na površinski odtok. Vrednost se tekom umerjanja iz začetnih 0,30 spremeni na vrednost 0,20.

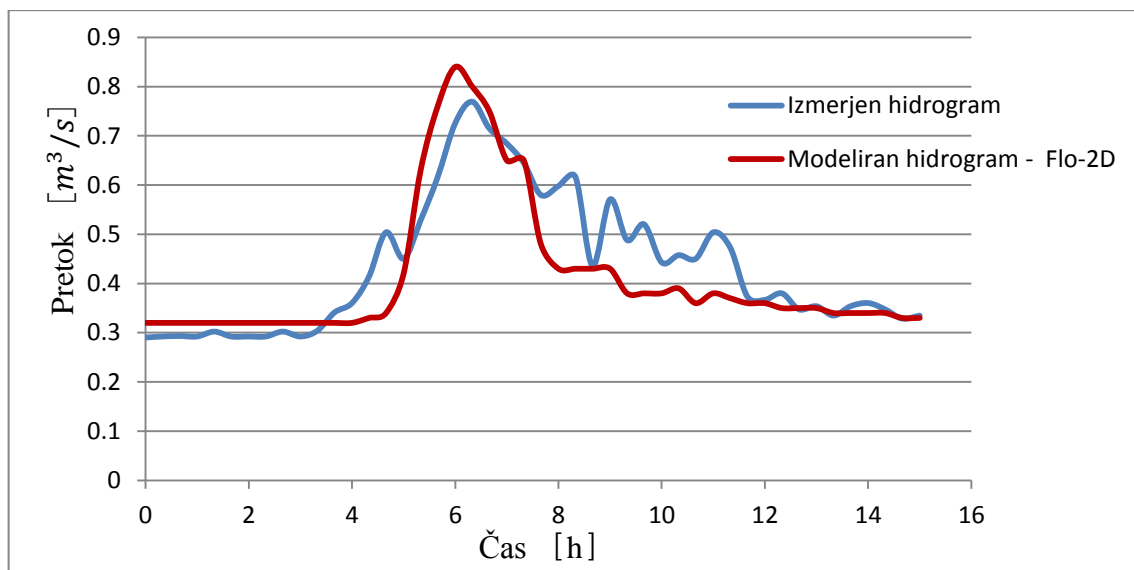
Pomemben vpliv na rezultate simulacij ima parameter TOL, ki določa debelino vodne plasti, ki jo model še obravnava v računu. Njegovo vrednost nastavljamo v oknu »Surface detention«. Začetna vrednost 0,01 se izkaže za občutno previsoko, saj model sploh ne zazna površinskega toka, ker je ta preplitev. S postopnim nižanjem smo prišli do vrednosti 0,004, pri kateri so rezultati modela kazali na dobro umerjenost.

Večje ujemanje lahko dosegamo tudi s spreminjanjem vrednosti koeficienta CN. Pri modelu HEC-HMS (glej poglavje 4.4) smo z umerjanjem za celotno porečje Mačkovega grabna določili vrednost koeficienta 78. Pri modelu Flo-2D določamo vrednost koeficienta CN za različne tipe pokrovnosti površja. Spreminjamo predvsem vrednost za tip pokrovnosti gozd, saj ima zaradi svojega večinskega deleža največji vpliv na rezultate. Začetna vrednost 78 se izkaže za prenizko, tekom umerjanja jo postopoma spremenimo na vrednost 85.

Po večkratnem spreminjanju vhodnih podatkov in parametrov ter ponavljanju simulacij dobimo za obravnavana padavinska dogodka naslednja umerjena hidrograma (sliki 32 in 33).



Slika 32: Izmerjeni in modelirani hidrogram (Flo-2D) za padavinski dogodek 15.-16. november 2014

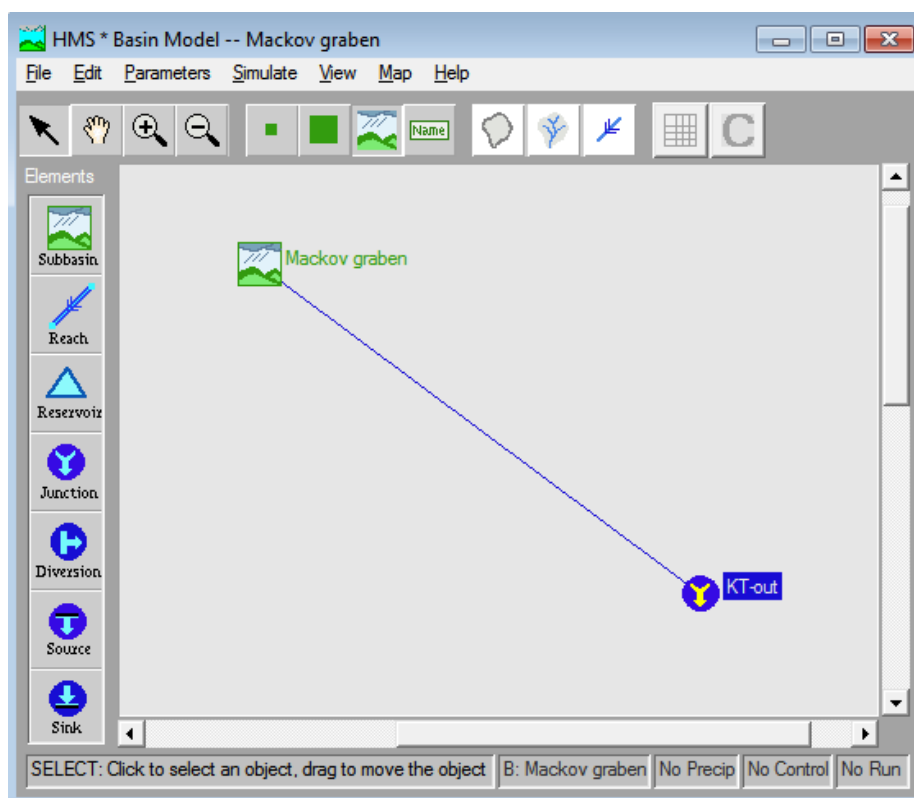


Slika 33: Izmerjeni in modelirani hidrogram (Flo-2D) za padavinski dogodek 19.-20. januar 2014

4.4 Rezultati hidrološkega modela HEC-HMS

4.4.1 Vhodni podatki modela

Za hidrološki model v programu HEC-HMS je potrebno najprej pripraviti model povodja. V primeru Mačkovega grabna je shema povodja sestavljena iz dveh elementov (slika 34). Z dvojnim klikom na element podpovodje vnesemo površino prispevnega območja. Sledi vnos podatkov v razdelek padavinskih izgub, kjer smo uporabili SCS model padavinskih izgub. Vnesemo vrednost začetnih izgub I_a , odstotek neprepustnih površin ter vrednost brezdimenzijskega koeficienta CN .



Slika 34: Shema povodja Mačkovega grabna v modelu HEC-HMS

Koeficient CN celotnega povodja Mačkovega grabna določimo s pomočjo enačbe (4), pred tem pa moramo definirati še vrednosti koeficienta CN za posamezen tip rabe tal. Na območju Mačkovega grabna prevladuje tip zemljine rendzina, zato ocenjujemo, da je odtočni potencial povprečen in upoštevamo razred B (glej preglednico 5). Hidrološke pogoje ocenimo za povprečne.

S pomočjo preglednic 3 in 4 določimo začetne vrednosti koeficienta CN za obravnavano porečje (preglednica 12).

Preglednica 12: Koeficient CN za posamezne rabe tal porečja Mačkovega grabna

Opis rabe tal	Površina [m ²]	Delež [%]	CN
Gozd	1.966	84.8	60
Trajni travnik	0.217	9.4	58
Kmetijsko zemljišče v zaraščanju	0.033	1.4	56
Drevesa in grmičevje	0.004	0.2	56
Ekstenzivni travniški sadovnjak	0.014	0.6	65
Pozidano in sorodno zemljišče	0.039	1.7	90
Njive	0.002	0.1	71
Odprto zemljišče s posebnim rastlinskim pokrovom	0.029	1.3	74
Kmetijsko zemljišče poraslo z gozdnim drevjem	0.011	0.5	65
Vodne površine	0.003	0.1	90

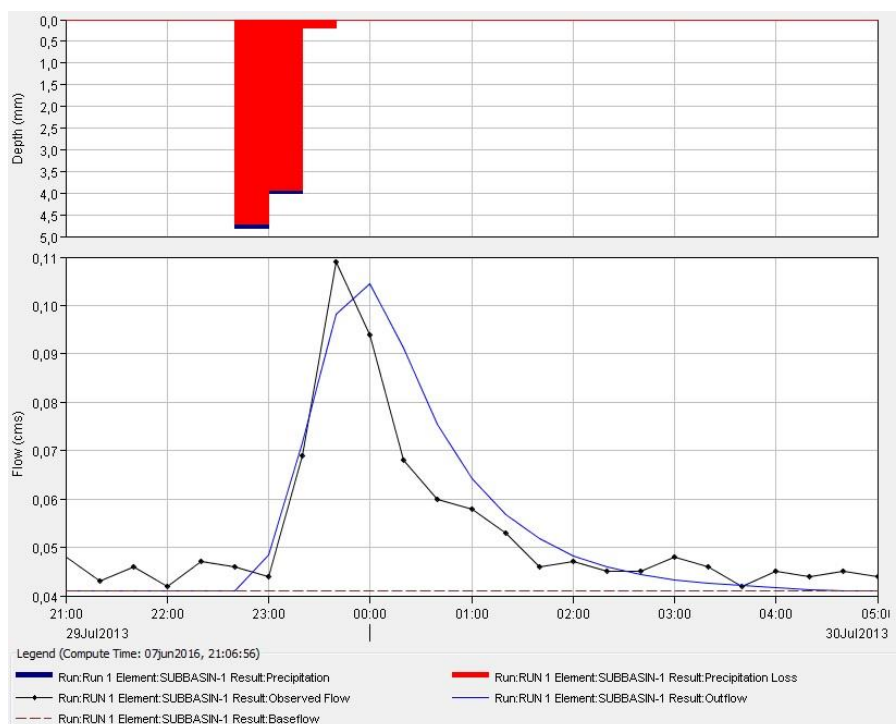
Vrednost koeficienta CN za celotno porečje Mačkovega grabna je tako ocenjeno na 60,56. Zdaj lahko določimo še vrednost začetnih izgub I_w , ki po izračunu znašajo 33,08 mm. Po metodi transformiranja efektivnih padavin v površinski odtok Tulsa District, ki je kot že omenjeno ena izmed izpeljank Snyderjevega HE, sledi določitev parametrov T_p in C_p .

$$T_p = 0.708 \times \left(\frac{1.78 \times 1.51}{\sqrt{590}} \right)^{0.39} = 0,60 \text{ h} \quad (16)$$

Po enačbah 7 in 8 (glej poglavje 2.2) določimo še maksimalni specifični pretok q_p , ki znaša 12,57 m³/s/km², iz njega pa dobimo še vrednost koeficienta $C_p = 0,539$. Ko vrednosti parametrov vnesemo v model, lahko začnemo z umerjanjem modela tj. prilagajanje vnesenih parametrov tako, da po izvedenem računu modeliran hidrogram odtoka čim bolj sovпада z izmerjenimi hidrogramom za določen padavinski dogodek (Heco, 2015).

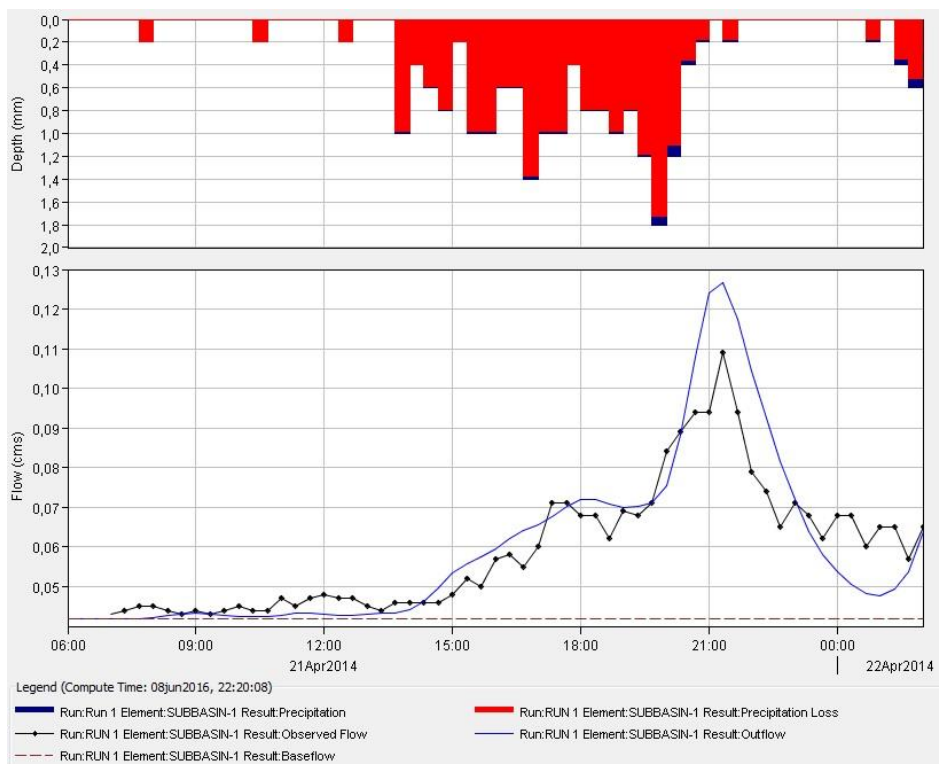
4.4.2 Umerjanje in validacija modela HEC-HMS

Umerjanje modela smo izvedli na treh padavinskih dogodkih različnih velikosti in trajanj. Prvi izmed njih je 40-minutni naliv konec julija leta 2014 (slika 35). Po začetku padavin ob 22:40 je padlo v naslednjih štiridesetih minutah nekaj manj kot 10 milimetrov padavin. Tak padavinski dogodek je zelo značilen za poletni čas, značilen je tudi hiter odziv hudournika. Če je pretok ob 23:00 še tipično poletno nizek, v času ene ure strmo naraste za skoraj 70 l/s, nato pa nekoliko počasneje upada tja do 02:00, ko se že umiri pri približno 45 l/s.

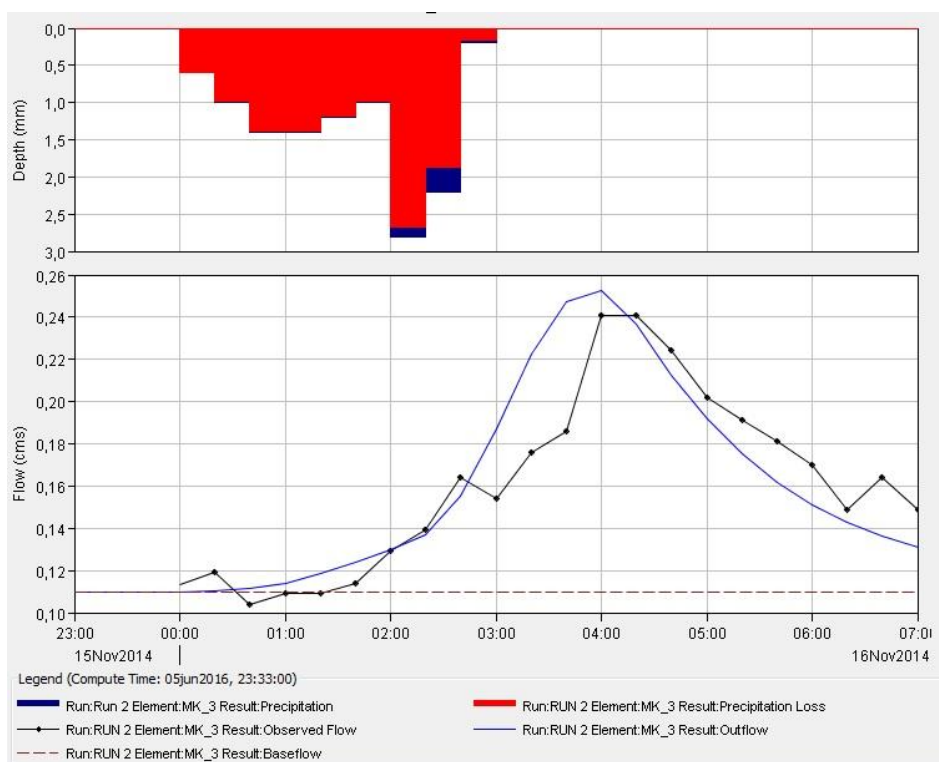


Slika 35: Izmerjeni in modelirani hidrogram za padavinski dogodek 29-30. julij 2013

Naslednji padavinski dogodek (slika 36) je dogodek iz spomladanskega deževja. V približno sedmih urah je padlo 22,6 milimetra padavin. Intenziteta padavin z nekaj vmesnimi padci v splošnem narašča do 20:00, nato pa se takoj zmanjša in po 21:00 sledijo štiri ure brez padavin. Manjša količina padavin se pojavi še pred tretjo uro zjutraj, a ne vpliva bistveno na povišanje pretoka. Pretok sicer sledi naraščanju količine padavin, povečevati se začne nekje okoli 15:00, to je uro in pol po začetku dežja. Konica merjenega pretoka je dosežena ob 21:20, kar je malo več kot ena ura kasneje od dvajset minutnega obdobja z največjo količino padavin (19:40-20:00). Ob prenehanju dežja pretok bolj strmo kot je pred tem naraščal, upade, med upadanjem pa se malenkost dvigne le še ob krajši plohi okoli tretje ure zjutraj.



Slika 36: Izmerjeni in modelirani hidrogram za padavinski dogodek 21.-22. april 2014



Slika 37: Izmerjeni in modelirani hidrogram za padavinski dogodek 15.-16. november 2014

Tretji padavinski dogodek (slika 37) je tri-urno jesensko deževje. Bazni odtok je jesenskemu času primerno višji in se giblje malo nad 100 l/s. Padavine so v prvih dveh urah dokaj enakomerne, v zadnji uri pa se enkrat povečajo. Naraščanje pretoka se začne uro in pol po začetku padavin. Naraščanje je najprej počasnejše, med 03:40 in 04:00 pa zelo hitro, najvišja vrednost pretoka znaša 240 l/s. Zaradi prenehanja padavin ob 03:00, se pretok po 04:00 začne zmanjševati in se počasi zniža do nivoja baznega pretoka.

Ko smo uspeli umeriti model na treh padavinskih dogodkih, opravimo še validacijo na dveh drugih padavinskih dogodkih.

Prvi padavinski dogodek se je zgodil avgusta 2013 (slika 38). To je poletna ploha okoli polnoči, ko v dvajsetih minutah pade skoraj 4,5 milimetra padavin, v naslednjih uri in pol pa še dodatna dva milimetra. Potok se hitro odzove na visoko intenziteto padavin in v času ene ure od konice padavin pretok potoka naraste iz vrednosti baznega odtoka pri 42 l/s do vrednosti 120 l/s. Tako strmo kot pred tem naraste, nato tudi upade. Ob 05:00 se vrednost pretoka že praktično približa baznemu odtoku.

Drugi padavinski dogodek, vključen v validacijo, je iz januarja 2014 (slika 39). Od 21:00 pa do 03:00 naslednjega dne je padlo 25,6 milimetrov dežja, najvišja intenziteta padavin je okoli druge ure zjutraj. Pretok je do 01:00 na ravni baznega pretoka 32 l/s, nato do 03:00 relativno hitro naraste in doseže vrh pri 76 l/s okoli 03:30. Zaradi prenehanja padavin ob 03:00 se pretok takoj po doseženi konici najprej bolj strmo, nato pa počasneje začne spuščati nazaj proti vrednosti baznega pretoka.

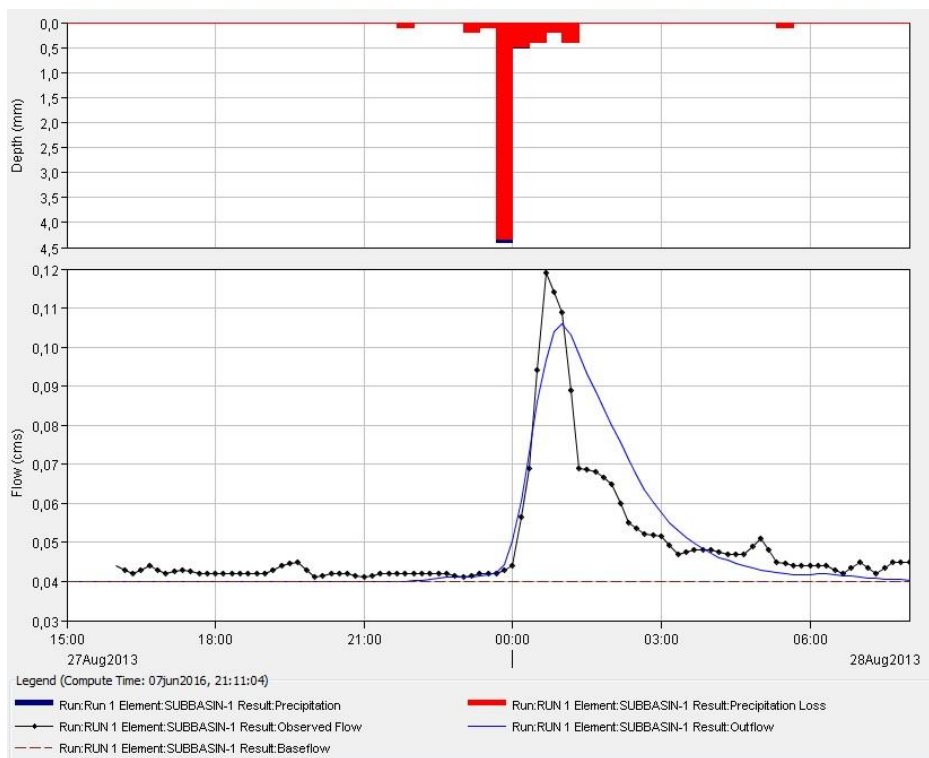
S kalibracijo hidrološkega modela v modelu HEC-HMS so bile določene naslednje, končne vrednosti vhodnih parametrov:

$$I_a = 14,33$$

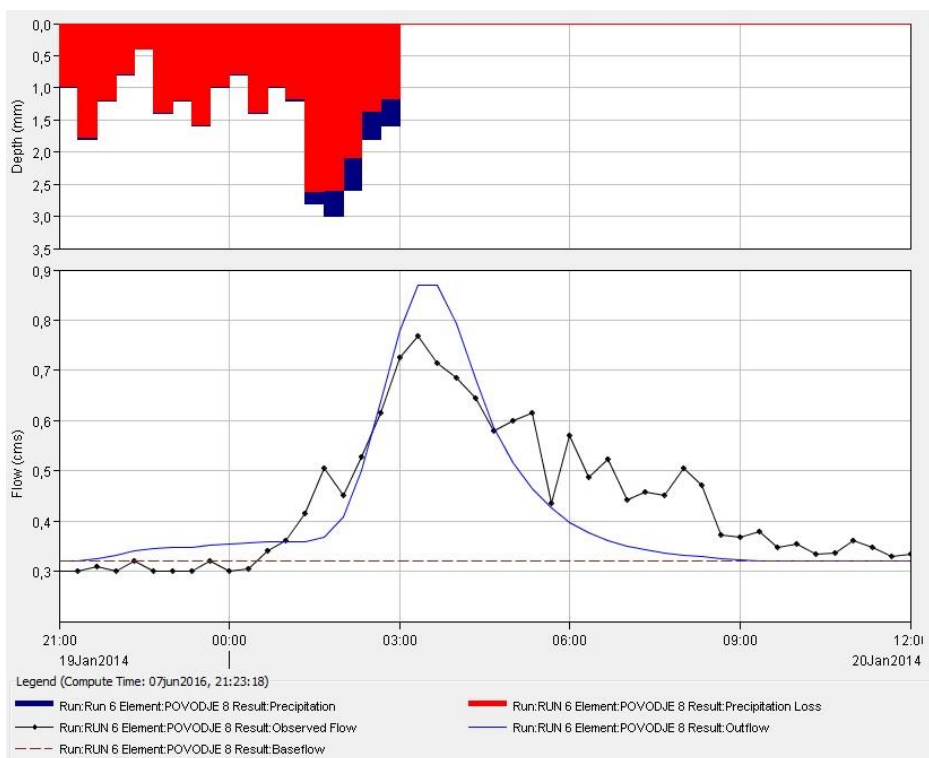
$$CN = 78,0$$

$$T_p = 1,1 \text{ h}$$

$$C_p = 0,598$$



Slika 38: Izmerjeni in modelirani hidrogram za padavinski dogodek 27.-28. avgust 2013, uporabljen za validacijo



Slika 39: Izmerjeni in modelirani hidrogram za padavinski dogodek 19.-20. januar 2014, uporabljen za validacijo

5 ANALIZA REZULTATOV

5.1 Analiza rezultatov modela v Flo-2D

Umerjanje modela v programu Flo-2D na dveh padavinskih dogodkih nam kot rezultat poda dva hidrograma. Če se najprej osredotočimo na prvi padavinski dogodek tj. dogodek iz 15. na 16. november 2014, ugotovimo, da se oblika modeliranega hidrograma dobro prilega izmerjenemu. V prvih treh urah se vrednosti pretoka pri obeh gibljejo okoli 120 l/s. Izmerjeni pretok začne naraščati nekoliko pred modeliranim, okoli 5.00 se krivulji praktično ujameta, dokler izmerjeni kot prvi doseže konico. Konica modeliranega pretoka je za 13 % višja (znaša 265 l/s), dosežena z zamikom približno 20 minut. Modelirani pretok upade kasneje kot izmerjeni, a približno enako hitro. Po 9.30 se vrednosti obeh pretokov praktično izenačita. Z vidika volumna odtoka je modelirani pretok (4548 m^3) zelo blizu izmerjeni vrednosti (4477 m^3). Razlika med njima je 1,6 %.

Pri drugem padavinskem dogodku (19.-20. januar 2014) se model izkaže malo slabše. Modelirani pretok začne naraščati približno uro za izmerjenim, v eni uri pa že doseže konico pri 840 l/s. Izmerjeni pretok doseže konico dvajset minut za modeliranim, konica je nižja za približno 60 l/s oz. 10 %. Modelirani pretok nato hitreje upada proti vrednosti pretoka 400 l/s, pri kateri pa se začne počasi umirjati. Krivulja padanja je pri modelu precej manj skokovita kot pri izmerjenem pretoku. Po dvanajsti uri se pretoka ujameta in skupaj počasi upadata proti 300 l/s. V primerjavi s prejšnjim padavinskim dogodkom je tu razlika med volumnoma odtoka nekoliko večja. Izmerjeni volumen je znašal 23378 m^3 , modelirani pa 22662 m^3 , kar znaša 3,1% razlike.

Umerjanje modela v programu Flo-2D se izkaže za zahtevno ter časovno zamudno. V prvi vrsti je to zaradi večje kompleksnosti modela, saj v računu upošteva topografijo terena. Več je parametrov, ki jim lahko spreminjamo vrednost pred izvedbo simulacije. Na obliko modeliranega hidrograma sicer v največji meri vplivata parameter TOL ter Manningov koeficient hrapavosti. Čas izvajanja simulacij je razmeroma dolg, zaradi podanega sistema mreže s celicami 15 x 15 metrov vzame od osem do deset minut. Zaradi zelo razgibanega terena, predvsem v severozahodnem delu Mačkovega grabna, kjer so razlike v nadmorski višini med več sosednjimi celicami večje od 10 metrov, bi bila mogoče izbira manjše celice priporočljiva. A tudi z manjšo celico ne bi povsem optimalno predstavili najbolj strmih predelov (glej sliko 40), pa še čas izvajanja simulacij bi se zaradi večjega števila celic več kot podvojil.



Slika 40: Zelo strmi predeli v SZ delu porečja Mačkovega grabna (foto: Mole, 2016)

5.2 Analiza rezultatov modela v HEC-HMS

Model v programu HEC-HMS smo umerili na treh padavinskih dogodkih in dodatno validirali še na dveh. Od petih izbranih padavinskih dogodkov sta dva enaka kot pri modelu Flo-2D.

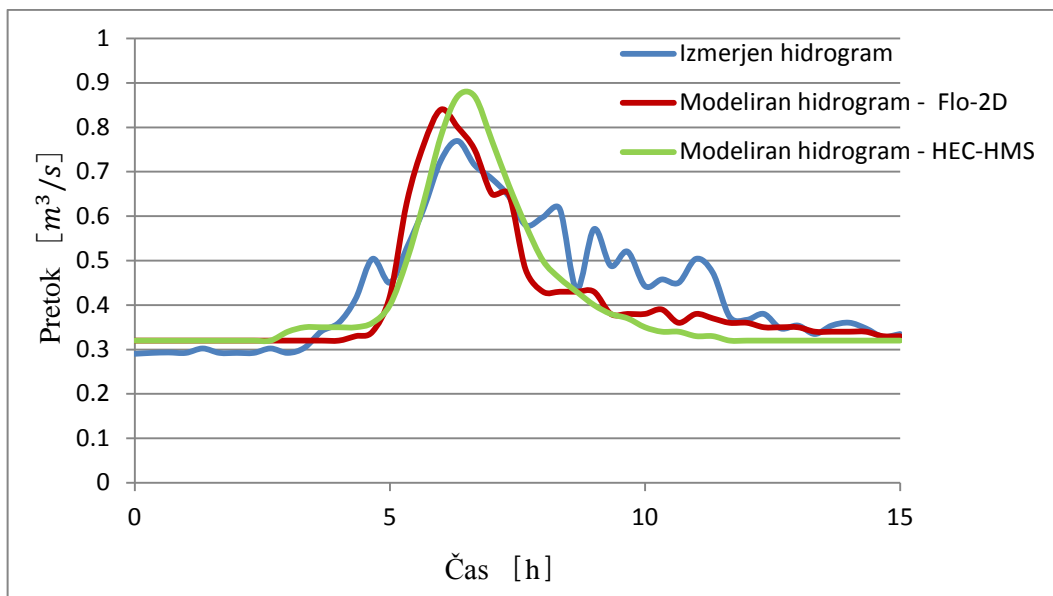
Če pogledamo padavinski dogodek iz avgusta 2013 (slika 38), lahko vidimo, da je oblika hidrograma za merjeni in modelirani pretok praktično enaka do približno 00:30, ko se ob strmem naraščanju modeliran pretok začne nekoliko prej umirjati. Konica modeliranega pretoka (105 l/s) je dosežena približno dvajset minut kasneje kot pri izmerjenem dogodku, poleg tega je za približno 15 l/s nižja. Ker se intenziteta padavin takoj po 00:00 močno zniža, tako modelirani kot izmerjeni pretok po doseženi konici hitro upadeta. Padanje pretoka je bolj izrazito pri merjenem pretoku, oba pretoka se ujameta potem okoli 04:30, ko se že približujeta vrednosti baznega odtoka 42 l/s. Volumen odtoka je pri obeh podoben, saj pri merjenem dobimo vrednost 2829 m³, pri modeliranem pa vrednost 2852 m³. Razlika znaša 0,8 %.

Primerjava hidrogramov za drugi padavinski dogodek iz januarja 2014 (slika 39) pokaže, da modelirani in merjeni pretok konico dosežeta hkrati, je pa pri modeliranem pretoku ta nekoliko višja. Ker je vsa količina padavin skoncentrirana med 21:00 19. januarja in 03:00 naslednjega dne, po tej uri pa upade praktično na vrednost nič, dobimo tudi pričakovano obliko hidrograma. Po strmem naraščanju v prvih urah, pretok takoj po doseženi konici (874 l/s) okoli 03:30 začne hitro upadati ter se po 09:00 počasi umirja. Upadanje pretoka je sicer nekoliko bolj izrazito pri modeliranem pretoku, posledično se pojavi razlika v volumnu odtoka. Ta pa ni izrazita, saj je modelirani pretok pred tem kot že omenjeno, dosegel višjo in dalj časa trajajočo konico. Merjeni volumen odtoka tako znaša 23378 m³, modelirani pa 22828 m³, kar predstavlja razliko 2,3 %.

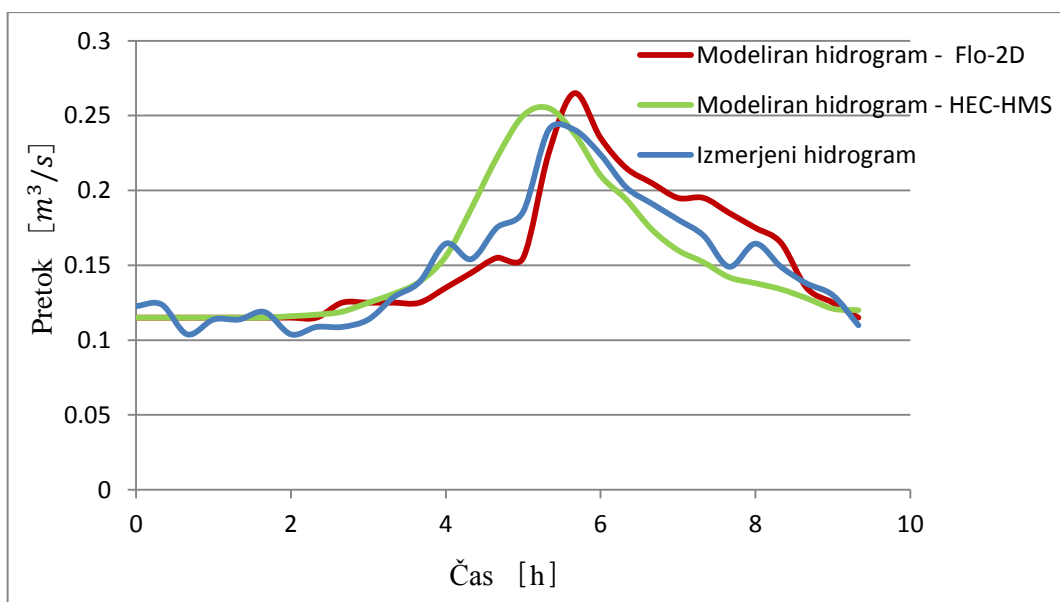
Izkaže se, da je v primerjavi z modelom Flo-2D umerjanje modela v programu HEC-HMS manj zahtevno ter tudi časovno manj zamudno. Je pa pri umerjanju potrebno biti pozoren, saj se pri različnih padavinskih dogodkih spreminjanje vhodnih parametrov ne odraža v enaki meri na obliki hidrograma. Določanje vrednosti vhodnih parametrov je tako iskanje kompromisa, da za vse obravnavane dogodke dobimo zadovoljivo podobnost hidrograma merjenega in modeliranega pretoka. Na podlagi analize modeliranih in izmerjenih hidrogramov za različne padavinske dogodke lahko potrdimo, da so vrednosti vhodnih parametrov zadovoljivo določene.

5.3 Primerjava rezultatov modelov Flo-2D in HEC-HMS

Ker smo z obema modeloma modelirali dva enaka dogodka, lahko naredimo primerjavo rezultatov. Najprej primerjamo modelirana hidrograma za padavinski dogodek v januarju 2014 (slika 41). V prvih treh urah sta krivulji praktično poravnani. Krivulja HEC-HMS začne kot prva naraščati, a se pri 5.00 ujame s krivuljo Flo-2D. Slednja je do dosega konice nekoliko bolj strma, jo pa doseže prej. Konica pretoka je pri modelu HEC-HMS za približno 40 l/s (6 %) višja. Obe modelirani konici pa precenjujeta izmerjeni pretok, in sicer model Flo-2D za 17 % in model HEC-HMS za 10 %. Modeliran pretok v modelu Flo-2D po dosegu konice upada enako hitro kot v modelu HEC-HMS, prehiteva pa ga za približno 30 minut. Upadanje pretoka pri modelu HEC-HMS je bolj enakomerno, medtem ko se pri modelu Flo-2D ob 7.20 pojavi manjši skok navzgor. Po deseti uri se oba pretoka umirjata, baznemu odtoku se prvi približa HEC-HMS okoli 11.30, Flo-2D pa ga doseže ob 14.30. Če oba hidrograma primerjamo z izmerjenim, lahko vidimo, da model HEC-HMS bolje sledi izmerjenim pretokom, kljub nekoliko višji konici. Večja natančnost modela HEC-HMS se pokaže tudi v količini odtoka, ki je bližje izmerjeni vrednosti kot pri modelu Flo-2D.



Slika 41: Primerjava izmerjenega in modeliranih hidrogramov za padavinski dogodek januar 2014



Slika 42: Primerjava izmerjenega in modeliranih hidrogramov za padavinski dogodek november 2014

Sledi primerjava modeliranih hidrogramov za padavinski dogodek v novembru 2014 (slika 42). Do 3.20 sta krivulji praktično poravnani, nato začne krivulja HEC-HMS hitreje naraščati. Krivulja Flo-2D se začne strmo dvigati po 5.00, ko HEC-HMS že doseže konico pri 252 l/s. Flo-2D doseže konico (265 l/s) približno pol ure za HEC-HMS, razlika v vrednosti konice znaša nekaj manj kot 5 %. Obe konici sta precenjeni glede na izmerjeno konico in sicer Flo-2D za 5,3 % in HEC-HMS za 2,5 %. Upadanje pretoka je hitrejše pri HEC-HMS, vendar se krivulje okoli 9.00 ponovno ujemata. Primerjava z merjenim hidrogramom pokaže, da merjenim vrednostim bolj sledi Flo-2D. Pri volumnu

odtoka so razlike majhne. Flo-2D ima za 1,6 % večji volumen odtoka kot je izmerjeni (glej poglavje 5.1), pri HEC-HMS pa je volumen večji za 2,9 % (znaša 4611 m³).

5.4 Ocena učinkovitosti modelov z Nash-Sutcliffovim koeficientom

V okviru modeliranja s programom HEC-HMS smo obravnavali tri padavinske dogodke (julij 2013, april 2014 in november 2014), za katere smo umerili. Z validacijo na dveh drugih padavinskih dogodkih (avgust 2013 in januar 2014) smo ugotovili, da so rezultati zadovoljivi, saj so oblike modeliranih hidrogramov v veliki meri dobro sledile obliki izmerjenih hidrogramov, volumni odtokov pa se bistveno ne razlikujejo.

Pri modeliranju v programu Flo-2D smo obravnavali dva padavinska dogodka (januar in november 2014), za katera smo model umerili. Pri prvem padavinskem dogodku je ujemanje slabše, pri drugem dogodku pa je ujemanje z izmerjenim hidrogramom zadovoljivo.

Odstopanje modeliranih vrednosti od izmerjenih smo ocenili s koeficientom Nash-Sutcliffe. Po enačbi 9 iz poglavja 2.3 smo za vse obravnavane padavinske dogodke preračunali modelirane in opazovane pretoke ter dobili vrednosti koeficienta E . Slednji je podan v preglednicah 13 in 14.

Preglednica 13: Vrednost koeficienta Nash-Sutcliffe (HEC-HMS)

Padavinski dogodek	Vrednost koeficienta Nash-Sutcliffe za model HEC-HMS
29.-30. julij 2013	0,785
21.-22. april 2014	0,737
15.-16. november 2014	0,780
27.-28. avgust 2013	0,801
19.-20. januar 2014	0,702

Preglednica 14: Vrednost koeficienta Nash-Sutcliffe (Flo-2D)

Padavinski dogodek	Vrednost koeficienta Nash-Sutcliffe za model Flo-2D
15.-16. november 2014	0,826
19.-20. januar 2014	0,661

Po izračunu se pokaže, da se vrednost koeficienta za obravnavane padavinske dogodke giblje v območju med 0.7 in 0.8 (preglednica 13) za model HEC-HMS ter med 0.66 in 0.83 za model Flo-2D (preglednica 14). Vrednost koeficienta E se teoretično lahko giblje od minus neskončno do vrednosti 1. Vrednost $E = 1$ pomeni, da se model povsem ujema z merjenimi vrednostmi. Izračunane vrednosti koeficienta E torej kažejo, da oba modela izkazujeta zadovoljive rezultate.

V splošnem se bolje izkaže model HEC-HMS, saj kljub svoji relativno enostavni zasnovi modela dosega v povprečju višje vrednosti koeficienta Nash-Sutcliffe. Model Flo-2D sicer dosega najboljšo vrednost pri enem dogodku, a se slabše izkaže pri drugem. Model Flo-2D je očitno bolj nepredvidljiv, kar se je pokazalo že v postopku umerjanja. Bolj kompleksna predstavitev topografije v modelu Flo-2D torej ne pomeni nujno večje natančnosti pri rezultatih. Sicer bi z manjšim elementom mreže mogoče dosegli nekoliko boljše rezultate, saj bi bila topografija bolj točno predstavljena v modelu, a bi se čas simulacij močno podaljšal.

6 ZAKLJUČKI

Povirje reke Gradaščice in Mačkov graben kot del njega, je zaradi svoje hudourniške narave precej komplicirano za hidrološko modeliranje. Možnost točnega predvidevanja obnašanja hudournika v strmi in razmeroma ozki dolini ob različnih padavinskih dogodkih pa se pokaže kot pomembno, saj lahko s tem bolje razumemo tudi dogajanje v širšem območju Polhograjskega hribovja, kot povirnega dela Gradaščice.

Z razvojem računalništva so nam na voljo številna programska orodja, s katerimi lahko izdelamo hidrološke modele. V diplomski nalogi smo obravnavali programa Flo-2D in HEC-HMS. Prvi od njiju je v osnovi kompleksnejši, saj po strugi upošteva enodimenzijski tok, po ostalem območju pa dvodimenzijski tok. Program HEC-HMS je enostavnejši, prispevno območje se predstavi z nekaj parametri, topografije pa se neposredno ne upošteva. V splošnem bi torej lahko predvidevali, da je kvazi-dvodimenzijski model Flo-2D natančnejši od modela HEC-HMS, a se po izvedenih analizah v obeh programih to ne potrди.

Za izdelavo hidrološkega modela so najprej potrebni hidrološki podatki. V nalogi smo potrebovali podatke o pretokih ter količini padavin na območju Mačkovega grabna za zadnjih nekaj let. Ker je porečje Mačkovega grabna eksperimentalno porečje Katedre za splošno hidrotehniko UL FGG, podatke o pretoku in padavinah zbira več avtomatskih instrumentov, ki so razporejeni po porečju, še vedno pa so potrebne posamezne terenske meritve pretokov in gladin za izris pretočnih krivulj. Meritve pretokov z instrumentom Flo-tracerjem, ki deluje na osnovi metode o razredčenju, so se izkazale za zanesljive, pomembno je le dosledno upoštevanje postopka izvajanja.

Pri izdelavi modela v programu Flo-2D je pomembno čim bolj predstaviti topografske značilnosti površja. Zaradi velike razgibanosti prispevnega površja Mačkovega grabna je izbira velikosti celice kot dela sistema mreže, s katero prekrijemo opazovano prispevno območje, odločilna. Z zelo majhnim elementom mreže je teren sicer bolj predstavljen, a se je to odražalo v precej daljšem času izvajanja simulacij, kar je tekom umerjanja modela zelo zamudno. Zato je bilo potrebno najti kompromis, da smo ob zmernem trajanju simulacij dobili čim bljše rezultate. Za račun površinskega odtoka je po določitvi sistema mreže potrebno vnesti še padavine, za vsako celico pa določiti še vrednost Manningovega koeficienta hrapavosti ter vrednost infiltracije (SCS metoda izgub). Pred računom je nujno pozornost posvetiti tudi določitvi vrednosti kontrolnih parametrov, predvsem parametru *TOL*.

Pri izdelavi modela v programu HEC-HMS smo morali določiti model povodja, meteorološki ter kontrolni model. Glede na značilnosti prispevnega območja je bilo potrebno primerno izbrati metodo izgub ter metodo transformacij padavin v površinski odtok.

Umerjanje hidrološkega modela predstavlja najbolj zahteven in zamuden del izdelave modela. Pri modelu Flo-2D je bil pri umerjanju poudarek predvsem na prilagajnju vrednosti Manningovega koeficienta ter nastavitvi parametra *TOL*. Pri modelu HEC-HMS pa nastavljammo vrednost parametra *CN* in časa zakasnitve. Program Flo-2D se izkaže za bolj zahtevnega in časovno zamudnejšega od programa HEC-HMS, saj je potrebno tekom umerjanja prilagajati večje število parametrov, pa tudi časi simulacij so nekajkrat daljši.

Primerjava rezultatov pokaže, da se oba modela zadovoljivo približata izmerjenim vrednostim, konice modeliranih pretokov so sicer nekoliko višje, manjša odstopanja pa so posledično tudi pri količini odtoka. Za oceno natančnosti obeh modelov smo uporabili koeficient Nash-Sutcliffe. Ta primerja izmerjene pretoke z modeliranimi in kot rezultat poda vrednost od minus neskončno do 1. Po izbranem kriteriju se model HEC-HMS izkaže kot malenkost bolje umerjen, saj v povprečju dosega nekoliko višjo stopnjo natančnosti od modela Flo-2D. Sicer pa oba modela izkažeta zadovoljivo natančnost in uporabno vrednost.

VIRI

ARSO. 2016. Karta povprečna letna temperatura ter količina padavin za obdobje 1971-2001. http://www.arso.gov.si/vreme/podnebje/karte/Karta_povprecna_letna_TEMP_KS.gif (Pridobljeno 25. 2. 2016.)

ARSO. 2010. Hidrološko poročilo o povodnji v dneh od 17. do 21. Septembra 2010. <http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Poplave%2017.%20%2021.%20september%202010.pdf> (Pridobljeno 25. 2. 2016.)

Bezjak, N., Šraj, M., Rusjan, S., Kogoj, M., Vidmar, A., Sečnik, M., Brilly, M., Mikoš, M., 2014. Primerjava dveh sosednjih eksperimentalnih hudourniških porečij: Kuzlovec in Mačkov graben. Acta hydrotechnica 26, 45: 1-14.

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: 180 str.

Cerar, U., Banovec, P., Steinman, F. 2000. Hidravlična ustreznost merilnih mest za merjenje pretokov. Acta hydrotechnica 18, 28: 13 str.

Cvetko, P. 2013. Meritve pretokov vodotoka z dvema različnima. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba P. Cvetko): 75 f.

DHD modeliranje, projektiranje in meritve v hidrotehniko d.o.o. 2010. http://www.dhd.si/m_odel.html (Pridobljeno 25. 2. 2016.)

Flow-tronic. 2003. Manual for Flo-tracer: easy and rapid gauging. Belgium, Flow Tronic: 22 str.

Geopedia. 2016. <http://geopedia.si> (Pridobljeno 20. 3. 2016.)

Google Earth. 2016. <http://www.google.com/earth> (Pridobljeno 20. 3. 2016.)

Heco, D. 2015. Določanje parametra CN za manjše. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Heco): 77 f.

HMZ, H. z. R. S. 1999. Meritve pretokov vode z metodo razredčenja. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor: 33 str.

Krause, P., Boyle, D. P., Base, F., 2005. Comparison of different efficiency criteria hydrological model assessment. *Advances in Geosciences* 5(2005): 89-97.

McCuen, R. H., Knight, Z., Cutter, A. G. 2006. Evaluation of the Nash-Sutcliffe Efficiency Index. *Journal of Hydrologic Engineering* 11(6): 597-602.

O'Brien, J. S. 2009a. Flo-2D, Data input manual 2009, Flo-2D Software: 188 str.

O'Brien, J. S. 2009b. Flo-2D, GDS manual 2009, Flo-2D Software: 160 str.

O'Brien, J. S. 2009c. Flo-2D, Pocket Guide 2009, Flo-2D Software: 49 str.

O'Brien, J. S. 2009d. Flo-2D, Reference Manual, Basic Model-Version 2009, Flo-2D Software: 51 str.

Pestotnik, S. 2011. Hidrološki model Glinščice s programom Flo-2D. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba S. Pestotnik): 95 f.

Pestotnik, S., Hojnik, T., Šraj, M., 2012. Analiza možnosti uporabe distribuiranega dvodimenzijskega modela Flo-2D za hidrološko modeliranje. *Acta hydrotechnica* 25(43): 19 str.

Rusjan, S. 2016. Podatki o porečju reke Gradaščice ter hudourniku Mačkov graben. Osebna komunikacija. (6. 4. 2016.)

US Army Corps of Engineers. 2008. Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Quick Start Guide Version 3.5: 52 str. http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_QuickStart_Guide_3.5.pdf (Pridobljeno 20. 2. 2016.)

US Army Corps of Engineers. 2000. Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual: 158 str. [http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual_\(CPD-74B\).pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual_(CPD-74B).pdf) (Pridobljeno 20. 2. 2016.)

US Army Corps of Engineers. 2010. Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual version 3.5: 318 str. http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Users_Manual_3.5.pdf (Pridobljeno 20. 2. 2016.)