

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Hidrotehniška smer

Kandidat:

Matjaž Knapič

Vpliv zadrževalnika Brezje na poplavne vode reke Horjulščice

Diplomska naloga št.: 2975

Mentor:

prof. dr. Matjaž Mikoš

Somentor:

viš. pred. mag. Rok Fazarinc

Ljubljana, 27. 9. 2007

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **MATJAŽ KNAPIČ** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
**»VPLIV ZADRŽEVALNIKA BREZJE NA POPLAVNE VODE REKE
HORJULŠČICE«**

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL,
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 12.9.2007

(podpis)

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	556.166:627.132(043.2)
Avtor:	Matjaž Knapič
Mentor:	red. prof. dr. Matjaž Mikoš
Sometor:	viš. pred. mag. Rok Fazarinc
Naslov:	Vpliv zadrževalnika Brezje na poplavne vode reke Horjulščice
Obseg in oprema:	62 str., 15 sl., 7 pregl., 20 gr., 15 en.
Ključne besede:	poplave, zadrževalniki, Gradaščica, Horjulščica, hidrološki model, hidravlični model, HEC-HMS, HEC-RAS, zadrževalnik Brezje, protipoplavna varnost

Izveček

Cilj naloge je določiti vpliv zadrževalnika Brezje na visoke vode reke Horjulščice. Z vse večjo urbanizacijo okolja se v okolici mesta Ljubljane manjša naravni prostor za vodotoke. Tak primer je tudi reka Gradaščica, ki teče po zelo poplavno ogroženem območju. To se je pokazalo že v preteklosti, saj so tedaj poplave na reki Gradaščici povzročile ogromno škodo. Zadnje čase se preučujejo različni ukrepi za zaščito tega prostora, ki bi poplavno ogroženost zmanjšali. Eden izmed teh ukrepov je obravnavan v tej diplomski nalogi, in sicer delovanje zadrževalnika Brezje na pritoku Horjulščici. Narejen je hidrološki model, ki na podlagi padavin in sestave terena določi hidrograme na reki Horjulščici. Hidrogrami pa so kasneje uporabljeni v hidravličnem modelu, ki obravnava območje zadrževalnika Brezje. Kot rezultati tega modela pa so podani iztočni hidrogrami za območje zadrževalnika Brezje. Iztočni hidrogrami se spreminjajo glede na različno delovanje zapornice, ki preprečuje prost odtok vode in s tem vplivajo na poplavni val na reki Horjulščici. S tem poskušamo ugotoviti, kakšen je vpliv zadrževalnika Brezje na zadrževanje 100-letne poplavne vode in za koliko se zmanjša iztok iz reke Horjulščice v reko Gradaščico v primeru postavljenega zadrževalnika. Ugotovljeno je, da zadrževalnika Brezje vpliva ugodno na zadrževanje 100-letne poplave vode in s tem večja poplavno varnost dolvodno ležečih površin.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 556.166:627.132(043.2)
Author: Matjaž Knapič
Supervisor: prof. dr. Matjaž Mikoš
Cosupervisor: mag. Rok Fazarinc
Title: Influence of flood-control reservoir Brezje on flood waters of the river Horjulščica
Notes: 62 p., 15 fig., 7 tab., 20 gra., 15 eq.
Key words: floods, flood-control reservoirs, Gradaščica, Horjulščica, hydrological model, hydraulic model, HEC-HMS, HEC-RAS, flood-control reservoir Brezje, flood-control projects

Abstract

The aim of this assignment is to determine how flood-control reservoir Brezje influences the flood wave on the river Horjulščica. Because of growing urban environment around the city of Ljubljana there is less and less natural environment for natural river flow. One example of this problem is the river Gradaščica. It flows through an area which is very much endangered by floods. This was already shown in the past when the flooded river Gradaščica caused extensive damage. Lately, there are lots of different flood-control projects in developing – they would lower the risk of floods in this area. One of these projects – the influence of flood-control reservoir Brezje – is studied in this diploma work. During this assignment hydrological and hydraulic models were made. The hydrological model computes hydrographs based on data of precipitation and composition of terrain. The hydrographs are then used in hydraulic model that is created for the area of flood-control reservoir Brezje. As a result of this model hydrographs for area of flood-control reservoir Brezje are given. The changes of output hydrographs are based on different manoeuvres of sluice gates which are halting the free discharge of the water and thus affect the flood wave of the river Horjulščica. The results of these models tell us that flood-control reservoir Brezje has a positive influence on 100-years flood waters and because of that floods are less likely to occur in downstream areas.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju red. prof. dr. Matjažu Mikošu, somentorju viš. pred. mag. Roku Fazarincu in vsem ostalim, ki so mi pomagali. Zahvalil bi se tudi Inženiringu za vode, kjer so mi pomagali s podatki potrebnimi za diplomsko nalogo.

Zahvalil bi se tudi svojim staršema, ki sta mi vsa leta študija stala ob strani in me vzpodbujala.

KAZALO:

1	UVOD	1
1.1	Splošno	1
1.2	Cilji diplomske naloge	3
2	ODTOK VODA IN POPLAVE	4
2.1	Odtok voda	4
2.2	Splošno o poplavah	6
2.3	Zadrževalniki	8
2.4	Poplave na reki Gradaščici	9
2.5	Izboljšanje poplavne varnosti reke Gradaščice	11
3	OPIS OBRAVNAVANEGA PODROČJA	13
3.1	Opis porečja reke Gradaščice	13
3.1.1	Topografske in hidrografske značilnosti porečja	13
3.1.2	Hidrološke značilnosti	15
3.2	Opis porečja reke Horjulščice	16
3.2.1	Splošno	16
3.2.2	Razdelitev Horjulščice po padavinskih območjih	16
3.2.3	Hidrološke značilnosti	17
3.3	Podrobnejši opis področja ob zadrževalniku Brezje	17
3.3.1	Splošno	17
3.3.2	Obstoječe stanje	17
3.4	Zadrževalniki na povodju Gradaščice	21
3.4.1	Splošno o zadrževalnikih na Gradaščici	21
3.4.2	Zadrževalnik Brezje	22
3.4.3	Vodogradbeni ukrepi na zadrževalniku Brezje	22

3.4.3.1	Zapornični objekt na zadrževalniku Brezje	23
3.4.3.2	Nasip zadrževalnika Brezje	23
3.4.3.3	Prostorske ureditve ob zadrževalniku Brezje	23
3.4.4	Princip delovanja zadrževalnikov na porečju Gradaščice	24
4	HIDROLOŠKI RAČUNSKI MODEL HORJULŠČICE	25
4.1	Uporabljeni računalniški programi – HEC-HMS	25
4.2	Hidrološki modeli	25
4.3	Podatki v hidrološkem modelu	26
4.3.1	Splošno	26
4.3.2	Padavinske izgube - metoda SCS	26
4.3.3	Sintetični hidrogram enote	28
4.3.3.1	Metoda Clark	29
4.3.3.2	Metoda SCS	29
4.3.3.3	Metoda Snyder	31
4.3.4	Metoda propagacije – Muskingumov model	32
4.3.5	Padavine	33
4.3.6	Točnost podatkov	37
5	HIDRAVLICNI RAČUNSKI MODEL OBRAVNAVANEGA ODSEKA	38
5.1	Uporabljeni računalniški programi	38
5.1.1	Aquaterra	38
5.1.2	HEC-RAS	38
5.2	Geometrija računskega modela obravnavanega odseka	39
5.3	Robni pogoji in Manningov koeficient – n_g	41
5.4	Zapornica in izpust vode iz zadrževalnika	42
6	PREGLED REZULTATOV	44
6.1	Rezultati hidrološkega modela	44
6.1.1	Hidrogram za območje zadrževalnika Brezje	44
6.1.2	Prostornina in maksimalni pretok vode	45

6.2	Rezultati hidravličnega modela	46
6.2.1	Primerjava vtočnega in iztočnega hidrograma brez urejenega zadrževalnika	46
6.2.2	Primerjava vtočnega in iztočnega hidrograma z urejenim zadrževalnikom	47
6.2.3	Višina vode v urejenem zadrževalniku	51
6.3	Združitev hidrološkega in hidravličnega modela	54
6.4	Komentar rezultatov	57
7	ZAKLJUČEK	60

VIRI

PRILOGE

Seznam slik:

SLIKA 1: HIDROGRAM Z GLAVNIMI ZNAČILNOSTMI.	6
SLIKA 2: PODPOREČJA REKE GRADAŠČICE PO ŠIFRANTU PADAVINSKIH OBMOČIJ RS (ŠRAJ, 2000)	14
SLIKA 3: POREČJE HORJULŠČICE RAZDELJENO NA PODPOVODJA	16
SLIKA 4: OBRAVNAVANO OBMOČJE OD VASI LESNO BRDO DO VASI BREZJE	18
SLIKA 5: OBRASLOST BREGOV GORVODNO OD PROFILA P62	19
SLIKA 6: PREMOSTITEV ČEZ REKO HORJULŠČICO V PROFILU P62	19
SLIKA 7: POTOK HORJULKA	19
SLIKA 8: MOST MED LESNIM BRDOM IN REGIONALNO CESTO V PROFILU P56 - KONEC ODSEKA 1	19
SLIKA 9: TEREN NA OBMOČJU 2 GORVODNO OD PREREZA P12	20
SLIKA 10: MOST V PREREZU P36	20
SLIKA 11: MOST V PREREZU P12, KI POVEZUJE BREZJE Z VASJO DOBR DOL - KONEC ODSEKA 2	20
SLIKA 12: OBMOČJE 3 DOLVODNO OD PREREZA P12	21
SLIKA 13: STRUGA REKE HORJULŠČICE V PREREZU P12	21
SLIKA 14: OBMOČJA PADAVIN PO POVODJU HORJULŠČICE	33
SLIKA 15: KONČNI RAČUNSKI MODEL NAREJEN S PROGRAMOM HEC-RAS	40

Seznam preglednic:

PREGLEDNICA 1: PRISPEVNE POVRŠINE POVODJA GRADAŠČICE (ŠRAJ, 2000)	13
PREGLEDNICA 2: VREDNOSTI DEJANSKIH VISOKIH VOD NAD BOKALŠKIM JEZOM (IZV, 2002)	15
PREGLEDNICA 3: PODATKI O POSAMEZNIH PODPOVODJIH REKE HORJULŠČICE	28
PREGLEDNICA 4: KOLIČINA PADAVIN ZA PRVO SIMULACIJO	35
PREGLEDNICA 5: KOLIČINA PADAVIN ZA DRUGO SIMULACIJO	35
PREGLEDNICA 6: PODATKI O IZRAČUNANIH HIDROGRAMIH	45
PREGLEDNICA 7: PODATKI O IZRAČUNANIH IZTOČNIH HIDROGRAMIH	55

Seznam grafov:

GRAF 1: HISTOGRAM PADAVIN ZA ENAKOMERNO PORAZDELJENE PADAVINE NA POVODJU 14843	35
GRAF 2: HISTOGRAM PADAVIN ZA VSA PODPOVODJA ZA ČAS NALIVA NA 25% NEVIHTE	35
GRAF 3: HISTOGRAM PADAVIN ZA VSA PODPOVODJA ZA ČAS NALIVA NA 50% NEVIHTE	36
GRAF 4: HISTOGRAM PADAVIN ZA VSA PODPOVODJA ZA ČAS NALIVA NA 75% NEVIHTE	36
GRAF 5: IZRAČUNANI VSTOPNI HIDROGRAMI NA PODROČJU ZADRŽEVALNIKA BREZJE	44
GRAF 6: IZTOČNI HIDROGRAMI Z OBRAVNAVANEGA PODROČJA	47
GRAF 7: PRIMERJAVA HIDROGRAMA BREZ UREJENEGA ZADRŽEVALNIKA IN Z UREJENIM ZADRŽEVALNIKOM – PRIMER 1	48
GRAF 8: PRIMERJAVA HIDROGRAMA BREZ UREJENEGA ZADRŽEVALNIKA IN Z UREJENIM ZADRŽEVALNIKOM – PRIMER 2	49
GRAF 9: PRIMERJAVA HIDROGRAMA BREZ UREJENEGA ZADRŽEVALNIKA IN Z UREJENIM ZADRŽEVALNIKOM – PRIMER 3	49
GRAF 10: PRIMERJAVA HIDROGRAMA BREZ UREJENEGA ZADRŽEVALNIKA IN Z UREJENIM ZADRŽEVALNIKOM – PRIMER 4	50
GRAF 11: PRIMERJAVA HIDROGRAMA BREZ UREJENEGA ZADRŽEVALNIKA IN Z UREJENIM ZADRŽEVALNIKOM – PRIMER 5	50
GRAF 12: VIŠINA VODE V ZADRŽEVALNIKU - PRIMER 1	51
GRAF 13: VIŠINA VODE V ZADRŽEVALNIKU - PRIMER 2	52
GRAF 14: VIŠINA VODE V ZADRŽEVALNIKU - PRIMER 3	52
GRAF 15: VIŠINA VODE V ZADRŽEVALNIKU - PRIMER 4	53
GRAF 16: VIŠINA VODE V ZADRŽEVALNIKU - PRIMER 5	53
GRAF 17: HIDROGRAMI REKE HORJULŠČICE V SOTOČJU Z REKO GRADAŠČICO	54
GRAF 18: ODTOK S POVODJA HORJULŠČICE - PRIMER 1	55
GRAF 19: ODTOK S POVODJA HORJULŠČICE - PRIMER 2	56
GRAF 20: ODTOK S POVODJA HORJULŠČICE - PRIMER 3	56
GRAF 21: ODTOK S POVODJA HORJULŠČICE - PRIMER 4	57

1 Uvod

1.1 Splošno

Slovenija je z vodami bogata država. Vode so v dolgih milijonih let s svojo erozijsko močjo izklesale zunanjo podobo naše dežele in tako močno pripomogle k današnjem izgledu Slovenije. Da je Slovenija res vodna dežela nam pove dejstvo, da se Slovenija po količini rečne vode uvršča med najbogatejše evropske države. Količina rečne vode v Slovenij na prebivalca skoraj štirikrat presega evropsko povprečje. Tako imamo na ozemlju Slovenije skupno dolžino rek in njihovih stalnih pritokov dolgo kar 28.000 km, to pa v povprečju ustreza gostoti 1.4 km/km² (ARSO, 2003). Obenem pa je skupno porečje rek, ki izvirajo v Sloveniji in tečejo čez njeno ozemlje več kot dvakrat večje od velikosti njenega ozemlja.

Ozemlje Slovenije pa je bilo zaradi svojega bogastva z vodami že od nekdaj izpostavljeno poplavam. Tako poplave danes v Sloveniji ogrožajo več kot 3000 km² površin, to pa predstavlja približno 15% celotnega ozemlja Slovenije. Največ, kar polovica, poplavnih področji je v porečju reke Save, 40% v porečju reke Drave in 4% v posočju. Poplavno ogroženih pa je tudi približno 25 km² urbanih površin (<http://www.sos112.si>).

Večina slovenskih največjih rek (Sava, Drava, Mura, Soča) ima podobne splošne značilnosti porečij. Povirja teh rek so v goratem, močno namočenem svetu, nato pa prehajajo skozi predalpski svet v ravninskega. V Sloveniji poplave praviloma nastopijo zaradi obilnih padavin. Zaradi predhodne vlažnosti zemljišča padavine povzročijo večji ali manjši odtok vode, ki se zbira v vodotokih in s povečanim pretokom povzroča dvig gladine vode v strugi in kasnejšo poplavo. Slovenija je povirna dežela, večina vode na našem ozemlju po približno 100 km dolgem toku že v enem ali dveh dnevih zapusti naše ozemlje. Zato se v Sloveniji najbolj pogosto srečujemo s kratkotrajnimi večurnimi hudourniškimi poplavami. Izjemi pa sta območji rek Drave in Mure, kjer lahko trajajo poplave tudi več dni. Vse večja urbanizacija okolja pa še povečuje verjetnost in intenzivnost poplav. Ljudje s svojo dejavnostjo – asfaltiranje cest, betoniranje velikih površin za industrijske potrebe in stanovanjske objekte, pohitrijo odtok površinske vode do reke, kar pa povzroča še bolj intenzivne poplavne valove.

Po obsegu največje poplavno območje na območju Slovenije leži ob reki Muri. Vendar pa to področje ni najbolj ogroženo. Najbolj poplavno ogroženo področje je južni del Ljubljane, ki leži ob reki Gradaščici. Gre za visoko urbanizirano območje z velikim številom stanovanjskih objektov, industrijskih objektov, infrastrukture, itd. Poplava pri 100-letni vodi (katastrofalna poplava), bi lahko imela katastrofalne posledice, kar se je v preteklosti že pokazalo. Zaenkrat na tem področju ni zagotovljena zadostna poplavna varnost, zaradi pomanjkljivega vzdrževanja pa je varnost še manjša (Anzeljc in sod., 1995).

Zaradi vse večjih posegov v prostor in zmanjševanja naravnega poplavnega območja se na tem območju povečuje poplavna ogroženost in obenem zmanjšujejo možnosti ureditve območja. Za ureditev situacije naj bi bilo trenutno aktualnih več projektov in sicer izgradnja zadrževalnika Razori in zadrževalnika Šujica na reki Gradaščici, ter zadrževalnika Brezje na pritoku Horjulščici. Poleg tega pa obstaja še možnost razbremenjevanja vode proti Barju in pa ureditev in povečanje profilov v spodnjem toku Gradaščice (IZV, 2002). Z vsemi temi ukrepi naj bi se zmanjšal poplavni val, ki ogroža to področje. Tako naj bi se zagotovilo zadostno poplavno varnost na tem ogroženem območju.

1.2 Cilji diplomske naloge

V tej diplomski nalogi je obravnavano območje reke Horjulščice. Z izdelavo hidrološkega modela s programom HEC-HMS bom predstavil, kakšen poplavni val se oblikuje na porečju ob nastopu 100-letnih padavin. Rezultati hidrološkega modela pa bodo služili kot vstopni podatki za hidravlični model, ki bo zajel območje zadrževalnika Brezje. Ta model bo narejen s programom HEC-RAS in bo simuliral dogajanje v zadrževalniku ob nastopu 100-letne visoke vode.

Cilj hidrološkega modela je pridobiti realne hidrograme, ki opisujejo pretok ob nastopu poplave in bodo kasneje uporabljeni v hidravličnem modelu. Cilj hidravličnega modela pa je oceniti razmere in določiti manevre zapornice tako, da bo zadrževalnik Brezje deloval optimalno in ustrezno manjšal poplavni val. Rezultati bodo podani kot iztočni hidrogrami iz zadrževalnika in bodo podani tako za obstoječe stanje, kot za stanje po izgradnji zadrževalnika. V računih se bo uporabil poplavni val za padavine 24-urnega trajanja s 100-letno povratno dobo. S tem bom poizkusil oceniti vpliv zadrževalnika Brezje na visoke vode na reki Horjulščici.

2 Odtok voda in poplave

2.1 Odtok voda

Voda na Zemlji je vedno v gibanju. Voda se giblje pod zemljo, na površju zemlje in v zraku in to kontinuirano gibanje imenujemo vodni krog. Naše poznavanje dogajanja v vodnem krogu je najbolj temeljito na površju, saj so nam vsi procesi na očeh. Zanima nas, kaj se z vodo dogaja od trenutka, ko pade na površje kot padavine in ko kot odtok (površinska voda) odteče, do trenutka, ko se izlije v morje oz. jezero in tam konča svojo pot po površju zemlje.

Vodo, ki pade na površje zemlje imenujemo padavine. Med padavine spada vsa voda, ki pade na površino zemlje: dež, rosenje, sneg, toča, sodra, ledene iglice, itd. Padavine nastanejo, ko se vlažne tople mase zraka pri gibanju navzgor ohladijo, kar povzroči kondenzacijo vodnih hlapov. S hlajenjem zračnih mas se zmanjšuje njihova sposobnost absorpcije vlage, tako da se s hlajenjem povečuje relativna vlažnost, dokler zrak ne postane popolnoma zasičen z vlago. Naprej začne vlaga v zraku prehajati v drobne kapljice vode ali ledu (oblaki). Omenjene drobne kapljice se začnejo med seboj združevati, lepiti in povečevati, dokler ne dosežejo take mase, da se začnejo pod vplivom gravitacije izločati in padajo na zemljo kot padavine (Brilly, 2000).

Povodje predstavlja del območja, v katerem se voda iz padavin ali taljenja snega steka v vodno telo, ki ga lahko predstavlja reka, jezero, močvara, morje, itd. Povodje deluje kot lijak – zbira vodo s celotnega površja povodja in jo usmerja v vodno telo. Samo povodje vsebuje tako potoke in reke, ki zbirajo vodo, kot zemljsko površino po kateri voda odteka v te potoke in reke, ter se kasneje zbere v vodnem telesu, ki predstavlja glavni vodonosnik na povodju. Vsako povodje je topografsko ločeno od drugega povodja z gorskim grebenom, hribom ali goro. Vsako povodje pa vedno lahko razdelimo na še manjša podpovodja. Tako vedno več manjših podpovodji sestavlja večje povodje. Na koncu vsakega povodja se voda izlije v morje oz. jezero.

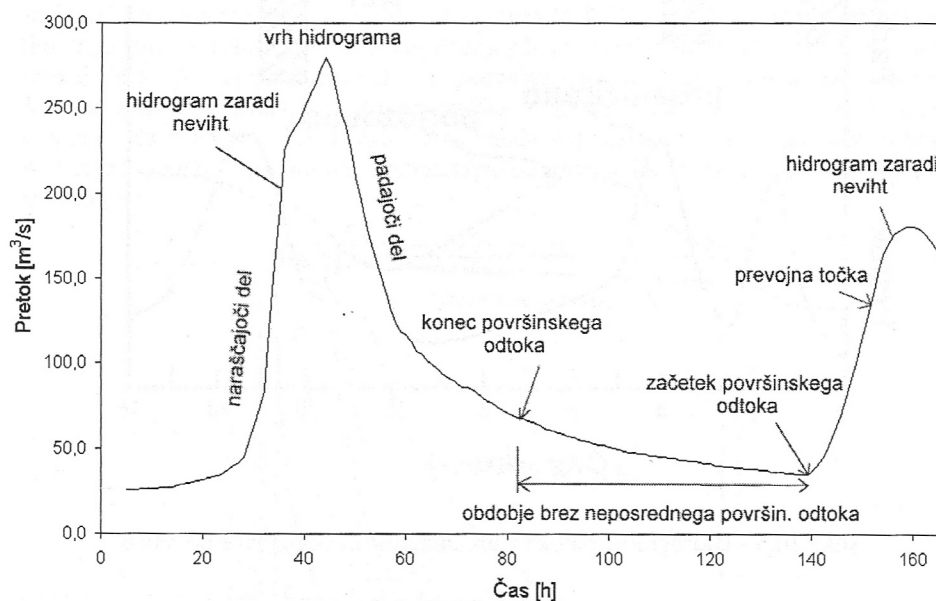
Odtok površinskih voda je termin, ki opisuje odtok vode, ki odteče površinsko in podpovršinsko v mrežo vodotokov. Voda teče pod vplivom težnosti proti najnižji točki

določene prispevne površine ali padavinskega območja, ki je opredeljena s topografskimi in z geološkimi lastnostmi. Proces odtoka nastane kot posledica padavin ali taljenja snega. Na svoji poti del odtoka vode zastane na rastlinah, izhlapi ali pa pronica v tla, kjer se voda začasno shrani ali pa pronica do podtalnice. Del padavin, ki so prestrežene, infiltrirane ali akumulirane na površini ter ne prispevajo k površinskemu odtoku, imenujemo padavinske izgube. Preostale padavine prispevajo k površinskemu odtoku in jih imenujemo učinkovite padavine. Prestrežene padavine in zadržane padavine pomenijo površinsko akumulacijo vode na drevju in travi, lokalnih depresijah na površini, razpoklinah parkirnih površin ali streh ali na površinah, s katerih voda ne more prosto površinsko odteči (Brilly, Šraj, 2005). Voda, ki odteče po površju do vodotoka, padavine, tok direktno pod površjem in tok vode iz podtalnice dajo celotni odtok s povodja.

Odtok vode na povodju lahko najbolje opišemo s hidrogramom. Hidrogram predstavlja spreminjanje pretoka s časom in vsebuje površinski, podpovršinski odtok in bazični odtok (izcejanje podzemnih voda). Ob nastopu padavin začne običajno pretok vode v vodotoku naraščati. Povečani pretok vode je posledica padavin, ki so površinsko odtekle in toka pod površjem. Na obliko hidrograma poleg padavin vpliva še (Škrbec, 2005):

- površina povodja: najpomembnejši faktor, vpliva na velikost konic;
- padec: manjši padci povzročajo nižje vrhove in s tem manjši odtok, vpliva tudi na skupno prostornino odtoka, čas ponavljanja vrha hidrograma, čas trajanja odtoka;
- hrapavost: vpliva na hitrost površinskega toka in toka v strugi;
- zmožnost zadrževanja: poteka lahko znotraj vodotoka, na poplavni ravnici, v jezerih ali v umetnih zajezbah; poteka lahko tudi gorvodno od ovir v toku (mostovi, razne zajezbe); zadrževanje voda zmanjšuje in zamika vrhove hidrograma in podaljšuje odtok vode s povodja;
- gostota vodotokov: vpliva na odziv povodja na padavine, visoka gostota ima za posledico hiter odtok s povodja;
- dolžina vodotokov: vpliva kako se vodotoki odzivajo na padavine; dolgi vodotoki se počasneje odzivajo na padavine kot krajši vodotoki; pri daljših vodotoki pride tudi do večjih linijskih izgub in večjega skladiščenja vode;
- predhodna vlažnost: voda v zemljini pred pričetkom padavin; večja vlažnost povzroči večji površinski odtok zaradi manjših izgub pri infiltraciji vode.

S hidrograma običajno odberemo podatke, ki nas najbolj zanimajo. To so maksimalni odtok s površja, skupno prostornino odtoka in frekvenca pojavljanja vrha hidrograma (pogostost nastopa večjega pretoka). Glavne značilnosti hidrograma so: naraščajoči del, padajoči del, vrh hidrograma (maksimalni pretok) in trajanje hidrograma (čas odtoka s povodja).



Slika 1: Hidrogram z glavnimi značilnostmi (Brilly, 2000)

2.2 Splošno o poplavah

Poplave so naraven pojav, ki z drugimi geološkimi pojavi (erozija, plazovi in podobno) oblikujejo in preoblikujejo zemeljsko površje. Poplave so praviloma posledica obilnih padavin in predhodne vlažnosti zemljine na porečju reke, lahko pa so tudi posledica zajezenega toka, posedanja tal, taljenja snega, dviga gladine podtalnice, visoke morske plime in podobno. V Sloveniji lahko delimo poplave na hudourniške, rečne, nižinske in poplave morja (Brilly, 1999). Posebne vrste poplav, ki so značilne za naše območje pa so kraške poplave. Nastanejo na kraških poljih, ko je dotok nanj večji, kot iztok skozi požiralnike.

Poplave v Sloveniji so povezane z močnimi padavinami, ki jih nad naše kraje prinašajo vlažne frontalne zračne gmote. Cikloni potujejo iznad Biskajskega zaliva preko Alp proti našim

krajem. Do obilnih padavin pride, ko se tople in vlažne zračne mase začenjajo vzpenjati ob pobočju Dinarsko-Alpskega gorovja (Brilly in sod., 1999). Padavine, ki padajo na teren povzročijo površinski odtok, ki se zbira v reki in povzroči dvig gladine. Zbiranje in odtok odvečne vode pa povzroči tudi erozijo v strugi reke in tudi celotnega območja, kjer teče voda. Ob poplavah oz. visoki vodi se prenašajo velike količine hribinskega materiala, ki se kasneje odložijo na poplavnih površinah zaradi majhnih globlin in manjše hitrosti vode. Na tak način poplave s pomočjo drugih geoloških procesov preoblikujejo zemeljsko površje.

Poplave običajno na poplavnem območju povzročijo veliko škodo. Nastalo škodo, ki nastne ob poplavi lahko delimo na:

- neposredno škodo: nastane zaradi delovanja voda in se jo vidi na premičnih in nepremičnih dobrinah (objekti, infrastruktura, imetje, in podobno), del neposredne škode pa so tudi izgubljena človeška življenja;
- posredno škodo: to so tisti vplivi poplav, ki negativno vplivajo na poslovanje, ni jih mogoče takoj ugotoviti, nekatere posledice se lahko pokažejo šele po več letih ob nastopu le nekoliko višje vode

Poplave so naravni pojav, katerega posledice lahko delno spremenimo in ublažimo, preprečiti pa ga ne moremo. Tako lahko ukrepe za preprečevanje poplav glede na vrsto posega delimo na vodogradbene (graditev hidrotehničnih posegov, regulacijski posegi in podobno) in alternativne ukrepe (prostorsko načrtovanje, prepoved ali omenjevanje posameznih dejavnosti in podobno). Glede na način delovanja ukrepov pa jih lahko delimo še na aktivne (vplivamo na obliko in naravo pojava) in pasivne (varujemo pred posledicami). Moramo pa vedeti, da običajno samo en poplavni ukrep ne odpravi nevarnosti poplav. Običajno se za povečanje poplavne varnosti vedno uporabi več protipoplavnih ukrepov. Splošno načelo pri varovanju proti visokimi vodami je, da naj človek ne poslabša razmer. To pomeni, da je potrebno vsak večji poseg ali več manjših ovrednotiti in tako vključiti v naravni režim reke, da ne poslabšajo odtočnega režima.

2.3 Zadrževalniki

Zadrževalniki spadajo med vodogradbene (poseg v prostor z gradnjo nasipa in gradnjo zapornice) in aktivne posege (vplivajo na obliko pojava saj zmanjšajo poplavni val), ki se izvajajo na poplavnem območju. Njihova glavna naloga je, da ob poplavi zadržijo večje količine vode in s tem zmanjšajo poplavni val. Zaradi tega pa se zmanjša tudi pretok dolvodno od zadrževalnika in tako lahko bistveno zmanjšamo vpliv poplave.

Zadrževalniki voda so lahko suhi ali mokri. Mokri zadrževalniki imajo večnamensko rabo. Služijo lahko za preskrbo s pitno vodo, namakanje, za pridobivanje električne energije in podobno. Pogosto pa se ob njih razvijejo možnosti za rekreacijo oziroma turizem. Del njihove prostornine je namenjen za zadrževanje voda. Suhi zadrževalniki pa se z vodo napolnijo le občasno v času poplave. Drugače lahko področje zadrževalnika uporabljamo za druge namene, kot so rekreacija, poljedelstvo in podobno. Dobra lastnost suhih zadrževalnikov pa je v tem, da ne kvarimo naravne podobe v okolici zadrževalnika.

Poseben primer suhih zadrževalnikov predstavljajo retenzije. To so naravna poplavna območja rek, na katerih je reka v preteklosti že poplavljala. Tudi sama struga deluje kot retenzija, ko se napolni z vodo in s tem plošči poplavni val. Po retenzijah se voda razliva nenadzorovano, zmanjšanje pretoka in hitrosti vode v strugi pa je pri tem bolj majhno. Imamo pa možnost, da retenzije ogradimo z nasipi, v katerih je vključena hidrotehnična oprema (zapornice, preliivi, in podobno). S temi ukrepi bolje izkoristimo prostor na poplavnih območjih. Drugače je vpliv retenzij podoben vplivu suhih zadrževalnikov.

Običajno se pretok na zadrževalnikih uravnava z zapornico. Tako pri manjših poplavah poplavnega vala ne zadržujemo, pri večjih poplavah pa lahko poplavni val s pomočjo zapornice zadržimo, seveda je to odvisno od delovanja in zahtev na področju kjer leži zadrževalnik. Vendar pa moramo vedeti, da se pri katastrofalnih poplavah (velikost akumulaciji znaša manj kot 10% prostornine poplavnega vala) vpliv zadrževalnika izniči. Na poplavni val lahko najbolj učinkovito vplivamo, če imamo sistem zadrževalnikov s sinhroniziranim delovanjem.

Eden izmed problemov zadrževalnikov je v prekinitvi premeščanja plavin. Tako gorvodno pride do naplavljanja plavin, dolvodno pa do poglobljanja struge. Dolvodno se to predvsem pozna pri spodkopavanju podornih zidov, mostnih opornikov in podobno. Gorvodno pa z zadrževanjem plavin v akumulaciji zadrževalnika. Kadar pa reka prenaša zelo veliko plavin lahko v nekaterih primerih sčasoma to privede celo do manjšanja koristne prostornine zadrževalnika.

2.4 Poplave na reki Gradaščici

V Mestni občini Ljubljana bi bilo v primeru katastrofalnih poplav vseh rek, ki tečejo mimo Ljubljane ogroženih več kot 8000 ha površin. Na poplavnem področju živi skoraj 20.000 ljudi. Najbolj poseljen in zato tudi najbolj ogrožen pa je jugozahodni delu Ljubljane ob reki Gradaščici (oz. Mestni graben) in Ljubljanici (<http://www.ljubljana.si>).

Gradaščica je reka, ki pred svojim izlivom v reko Ljubljanico teče po zelo urbaniziranem področju. To področje naj bi bilo po obsegu potencialne škode najbolj ogroženo območje v Sloveniji. V primeru katastrofalnih poplav na reki Gradaščici bi bilo v Mestni občini Ljubljana ogroženo več kot 1200 ha površin, od tega več kot 400 ha urabnih. Vsi ti podatki pozivajo k ureditvi poplavne varnosti Ljubljane (Anzeljc in sod., 1995).

Zaradi značilnosti vodotokov v Sloveniji so hudourniške poplave zelo pogoste. Tako lahko ugotovimo, da so kratkotrajne in izjemno silovite. Vode zelo hitro narastejo, prenašajo veliko količino plavja in plavin, ki jih odlagajo in nasipajo na vršajih ali v ravnini, po nekaj urah divjanja pa že upadejo. Hudourniške poplave se pojavljajo ob hudournikih v gorskem svetu, hribovjih in gričevjih. Poznamo pa tudi primere ob večjih rekah ob Savinji, Mislinji, Kamniški Bistrici, Sori, Gradaščici in drugih. Ker so hudourniške poplave posledica kratkotrajnih intenzivnih padavin jih je tudi najtežje napovedati. Trenutno se lahko napove samo širše območje močnih padavin, ne more pa se napovedati, kaj se bo dogajalo v posamezni dolini oz. grapi. Pomembno vlogo pri odpravljanju hudourniških poplav s katastrofalnimi posledicami ima sistematično in ekološko urejanje hudournikov. Zato je potreben velik finančni zalogaj, ki lahko bistveno pomaga pri odpravljanju vzrokov za

hudourniške poplave. Glede na svoje naravne danosti lahko trdimo, da ima reka Gradaščica vse lastnosti hudournika in s tem tudi hudourniški poplavni režim.

Vse od septembra 1933 ob Gradaščici ni bilo večjih poplav, zadnja nekoliko večja je bila novembra 1998, in tudi to je prispevalo k temu, da se v sodobnosti skoraj nihče ne zaveda velike poplavne ogroženosti. Sicer se že dolgo pripravljajo ukrepi za varovanje tega dela Ljubljane pred poplavami, vendar je pripravljalcem načrtov ostalo zelo malo manevrskega prostora, kar se zna še krepko maščevati (<http://www.zrc-sazu.si>).

Večje poplave na reki Gradaščice v preteklosti (PUH, 1995):

a) Poplava 8. avgusta 1924

Nad Pohorajskimi dolomiti se je 8. avgusta 1924 razdivjalo hudo neurje. Že ob 7. uri zvečer je nebo kazalo zloveščo podobo, okrog 8.30 zvečer pa se je ulil dež. Najhujše se je začelo okoli 9. ure zvečer. Obilne padavine v razmeroma kratkem času so povzročile veliko povodenj v porečju Gradaščice, ter v dolinah Poljanščice, Hrastenice in Ločenice. Vode so naraščale iz minute v minuto in s seboj nosile velike količine drevja s koreninami, materiala in celo skale. Podivjane vode so podirale hiše in infrastrukturo. Najhujše je bilo ob strugi Gradaščice. Voda je preplavila celo dolino ob vasi Šujica, Gradaščica pa je na nekaterih mestih narasla celo do višine 7 metrov. Najbolj so bile prizadete vasi: Polhov Gradec, Pristava, Srednja vas, Šujica, Gabrje, Hrastenica, Belica, Dol in Dolenja vas. Voda je v Ljubljano pridrla okrog treh zjutraj in se razlila okoli reke Gradaščice. Voda je deloma preplavila celo Tržaško cesto. Na Viču je voda ogrožala več objektov, viško pokopališče pa je bilo od blata in ilovice popolnoma prekrito, tako, da je bil nanj dostop nemogoč. Končna škoda je bila ogromna. V povodnji je življene izgubilo 19 ljudi, porušeni so bili vsi mostovi in infrastruktura ob rekah. Več gospodarskih poslopij je bilo dobesedno zbrisanih, porušeno so bile žage, utonilo je ogromno živine, uničen pa je bil tudi ves poljedelski pridelek. Zanimivo je, da so tako močno povodenj v samo 4. urah povzročili štirje neznatni vodotoki: Hrastenica, Ločnica, Mačkov potok in Mala Božena.

b) Poplava 26. in 27. september

Dve leti kasneje je povodenj zopet zadela območje porečja Gradaščice. Najhuje prizadeto območje je bilo v trikotniku Ljubljana – Vrhnika – Škofja Loka, čeprav so bila prizadeta tudi druga področja po Sloveniji (Goriška, Vipavska dolina, Idrijsko, Tolminsko,...). V takratnem dogajnanju lahko izvemo predvsem iz časopisov, ki imajo dobre podatke za Ljubljno in bližnjo okolico, slabše pa za bolj oddaljene kraje. Tako naj bi voda na Viču in Rožni dolini in na nekaterih mestih stala celo dva metra visoko. Celotna dolina med Vičem, Kozarjami, Podsmreko ter proti Šujici in Polhovem Gradcu pa naj bi bila popolnoma poplavljen. Tok Gradaščice proti Viču je drvel s tako silo, da se je drveča voda penila v širini 200 m, čeprav je običajna širina reke 3-4 m. Pod vodo je bilo tudi celotno Ljubljansko barje. Škoda je bila tokrat sicer manjša kot dve leti prej, vendar še vedno zelo velika. Povodenj je zopet trajala manj kot 24 ur. Žal so tudi tokrat bile človeške žrtve. Zopet pa je bilo porušenih veliko stanovanjskih in gospodarskih objektov, mostov, cest in drugo.

2.5 Izboljšanje poplavne varnosti reke Gradaščice

Za porečje reke Gradaščice je bilo v preteklosti izdelanih že veliko študij, ki so obravnavale različne možnosti zmanjšanja konic poplavnih valov. Vsem študijam je bilo skupno, da se konice poplavnih valov na reki Gradščici in njenih pritokih zadržujejo v zaledju. V vseh študijah je bilo obdelano veliko različnih variant zadrževanja. Na koncu pa je bilo ugotovljeno, da je zadrževanje voda v zadrževalnikih v bližini poplavljanja urbanih področij na porečju Gradaščice tudi najboljša možnost. Dodatno pa naj bi se poplavna ogroženost zmanjšala še z gradbenimi ukrepi (IZV, 2002).

Zaščita poplavnega območja reke Gradaščice je možna le z izvedbo dolgoročnih ukrepov, to je z gradnjo sistema za zadrževanje visokih vod s kombinacijo dopolnilnih vodnogospodarskih sistemov in ukrepov. Predlagane so bile sledeče rešitve: gradnja zadrževalnikov v Horjulski in Polhograjski dolini ter dolini Glinščice, ureditev povečanja pretočnosti Malega grabna in razbremenjevanje presežkov visokih voda Gradaščice na Barje. Noben ukrep sam po sebi ne zagotavlja zadostne poplavne varnosti, zato je potrebna kombinacija ukrepov. Poleg tega pa bi bilo potrebno še z alternativni poplavnimi ukrepi

vplivati na obnašanje prebivalce na tem področju. Uporabili bi se ukrepi, kot je coniranje prostora, dražje zavarovalnine na ogroženem področju, postavitve tabel, do kod je segala voda ob zadnji katastrofalni poplavi in podobno (<http://www.ljubljana.si>).

Za ureditev poplavnega območja reke Gradaščice je predvidenih in ocenjenih več variant izvedbe protipoplavnih ukrepov. V vseh variantah gre za kombinacijo suhih zadrževalnikov in ureditve Malega grabna, mestne Gradaščice in Glinščice. V nekaterih variantah pa se predlaga tudi razbremenjevanje visokih voda proti Barju skupaj z že prej omenjenimi predlogi. Vsem variantam pa je skupno, da temeljijo na pretoku, ki teče skozi kontrolni prerez na Bokalcih. To mersko mesto je treba nujno urediti, ne glede na nadaljne ukrepe proti visokim vodam, saj današnji merski postaji na Gradaščici in Horjulščici ne zadoščata več (IZV, 2002).

3 Opis obravnavanega področja

3.1 Opis porečja reke Gradaščice

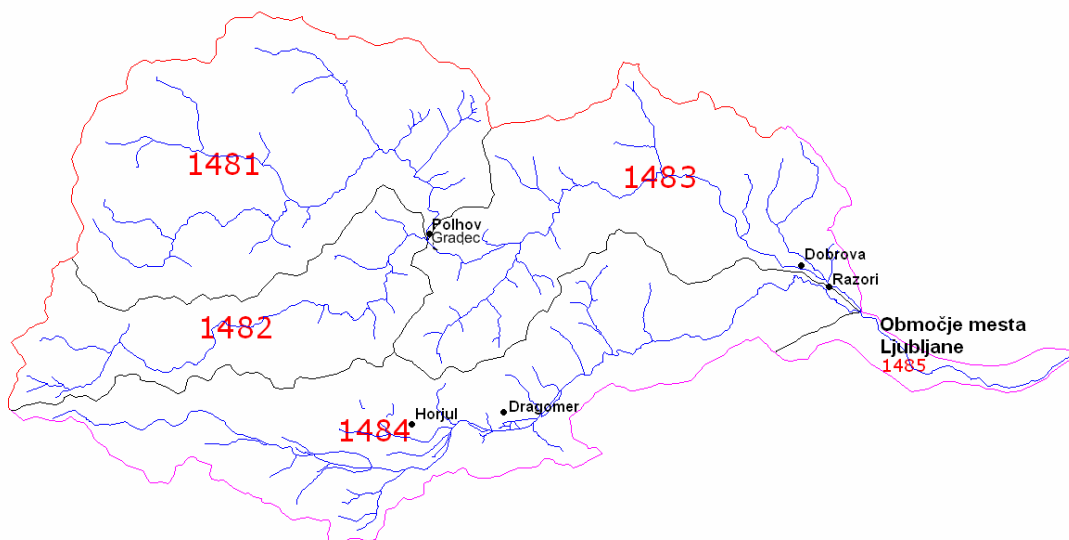
3.1.1 Topografske in hidrografske značilnosti porečja

Reka Gradaščica izvira v Polhograjskih dolomitih. Razvodnica med povirji reke Gradaščice in reke Sore poteka po grebenih Toškega čela, Ilovega vrha, Polhograjske grmade, Tošča, Mlake, Pasje ravni, Špika nata preko Suhega dola, Golega in Črnega vrha ter dalje po grebenih gričev med Barjem in dolino Horjulščice. Povirni del reke je zelo razbrzdano hribovje z obilo grapami in dolinami, zato ima reka Gradaščica izrazite hudourniške lastnosti. Reko tvorita dva glavna hudourniška potoka: Božna in Mala voda, ki se pod Polhovim Gradcem združita in tako tvorita reko Gradaščico. Pomembnejši pritoki so Prošca, Belica in Žerovnikov potok, ki imajo vsi hudourniške značilnosti. Glavni pritok reke Gradaščice pa predstavlja reka Horjulščica ali z drugim imenom reka Šujica.

Reka Gradaščica spada v porečje reke Ljubljanice in obsega območje veliko 158,82 km². Po šifrantu padavinskih območij Slovenije se porečje Gradaščice deli na sledeča povodja:

Preglednica 1: Prispevne površine povodja Gradaščice (Šraj, 2000)

Šifra	R3	R4	Padavinsko območje	Površina (km ²)
148	Gradaščica			158,82
1481		Gradaščica - Polhov Gradec	Povirje Gradaščice do sotočja z Malo vodo	46,39
1482		Mala voda	Vodozbirna površina Male vode	22,98
1483		Gradaščica - Šujica	Porečje Gradaščice od sotočja z Malo vodo do sotočja s Šujico	37,61
1484		Šujica	Vodozbirna površina Šujice	47,34
1485		Gradaščica - Vrhovci	Porečje Gradaščice od sotočja s Šujico do vtoka v Ljubljanico	4,49



Slika 2: Podporečja reke Gradaščice po šifrantu padavinskih območji RS (Šraj, 2000)

Reka Gradaščica je tako dolga 26,1 km do Bokalškega jezusa, s povprečnim padcem 0,73%. Naprej od Bokalškega jezusa se reka razdeli v mestno Gradaščico in Mali graben, ki se po približno 6 km izlivata v reko Ljubljanico. V zgornjem toku Gradaščice med Polhovim Gradcem in Dobrovo je padeč doline precej velik, zato voda hitro odteka in se ne zadržuje. Drugače pa je v spodnjem toku reke, ki je bolj dolinski.

Do sedaj na tem področju ni bilo izvedenih še nobenih protipoplavnih ukrepov. V prejšnjem stoletju so se izvajale regulacije na Malem grabnu na odseku med Dolgim mostom in Ljubljanico. Takrat naj bi se uredila prevodnost Malega grabna na $170 \text{ m}^3/\text{s}$, vendar pa izvedeno stanje ni bilo tako kot načrtovano. Prevodnost novega stanja je bila še vedno manjša od načrtovanega stanja.

3.1.2 Hidrološke značilnosti

Za porečje reke Gradaščice je značilen dežno-snežni režim. Za tak režim sta značilna dva viška, ki ju povzročijo jesenske in spomladanske padavine in taljenje snega. Prvi višek je tako novembra in decembra, drugi višek pa marca in aprila. V režimu pa je še en izrazit nižek meseca julija, ko je pretok v reki najmanjši. Srednje letne količine padavin dosežejo na porečju reke Gradaščice od 1600 do 1700 mm. Na porečju reke Gradaščice so značilni pogosti zelo močni nalivi. Te padavine s kombinacijo strmih pobočij in dokaj veliko nadmorsko višino povzročijo hiter dvig gladine reke in s tem visoke vodne odtoke.

Za reko Gradaščico so bile določene visoke vode za prerez nad Bokalškim jezom. Te visoke vode prikazuje naslednja preglednica:

Preglednica 2: Vrednosti dejanskih visokih vod nad Bokalškim jezom (Izv, 2002)

Povratna doba	Q ₅₀₀	Q ₂₀₀	Q ₁₀₀	Q ₅₀	Q ₂₀	Q ₁₀	Q ₅
Pretoki visokih vod (m ³ /s)	360	295	243	214	163	139	108

Prevodnost reke Gradaščice se razlikuje na različnih odsekih, tako naj bi bila prevodnost reke na odsekih do Bokalškega jeza med 90 in 140 m³/s. Od Bokalškega jeza naprej pa naj bi Mali graben prevajal med 90 in 130 m³/s, medtem ko naj bi bila prevodnost mestne Gradaščice do 5 m³/s. Glede na prej podane podatke o visokih vodah lahko vidimo, da ti pretoki predstavljajo med 5 do 10 letno visoko vodo. Iz preglednice o dejanskih visokih vodah je torej razvidno, da je območje Malega grabna ogroženo že ob poplavih z majhno povratno dobo. V zadnjih petnajstih letih so bila skoraj vsako drugo leto v jesenskem času poplavljeni posamezna poseljena in neposeljena območja ob Malem grabnu.

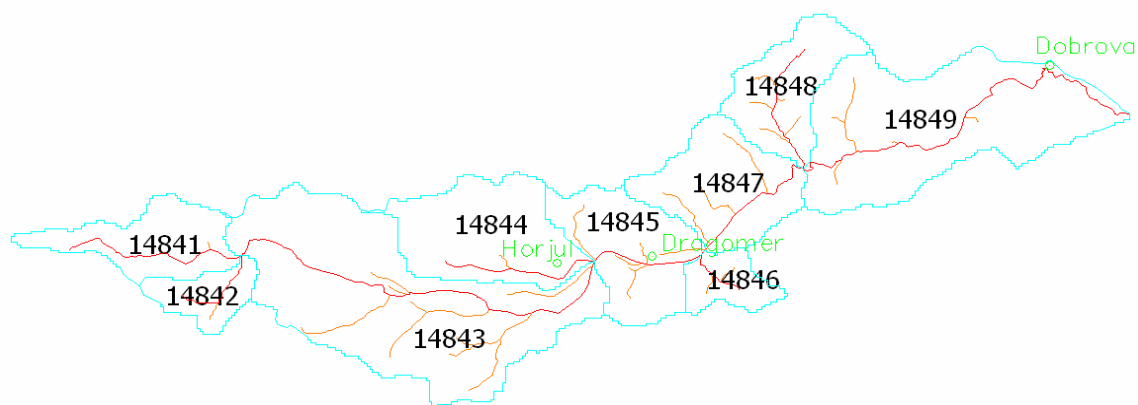
3.2 Opis porečja reke Horjulščice

3.2.1 Splošno

Največji pritok Gradaščice je reka Horjulščica ali reka Šujica. Reka teče od izvira v hribovju pod Šentjoštom pa do Vrhovcev, kjer se izliva v Gradaščico. Skupna dolžina reke je približno 23,5 km, povprečni padec na tem odseku pa znaša 0,41%. Reka Horjulščica je manj hudournna kot reka Gradaščica, saj ima drugačno oblikovano porečje (veliko razširitev doline pri Horjulu). Pod Dobrovo tečeta reki Horjulščica in Gradaščica po skupni dolini in tako tvorita naravni zadrževalnik visokih voda.

3.2.2 Razdelitev Horjulščice po padavinskih območjih

Reka Horjulščica teče po povodju številka 1484, ki spada pod porečje Gradaščice. To območje je veliko 47,34 km². Povodje reke Horjulščice pa razdelimo po šifrantu pete stopnje še na naslednja podpovodja.



Slika 3: Porečje Horjulščice razdeljeno na podpovodja (Šraj, 2000)

Povodje Horjulščice obsega devet podpovodij, ki so označene s številkami od 14841 do 14849. Območje zadrževalnika Brezje se začne približno na sotočju podpovodij 14843 in

14844. Območje do zadrževalnika Brezje obsega 23,12 km². To predstavlja 49% povodja Horjulščice.

3.2.3 Hidrološke značilnosti

Dolina reke Horjulščice je vse od Vrzdence mimo Horjula pa vse do Brezja poplavno ogrožena. V preteklosti so bile na tem celotnem področju izvedene melioracije. Prav tako pa tudi regulacija Horjulščice. Prevodnost voda reke Horjulščice do Brezji je ocenjena med 15-20 m³/s to pa predstavlja 5 do 10 letno visoko vodo. Naprej od Brezij do Razorov je celotna dolina poplavno ogrožena, čeprav so bile v preteklosti tu izvedene regulacije, ki so povečale prevodnost reke med 18 in 25 m³/s. Od Razorov naprej do sotočja z Gradaščico Horjulka meandrira in je regulirana le v območju ceste.

3.3 Podrobnejši opis področja ob zadrževalniku Brezje

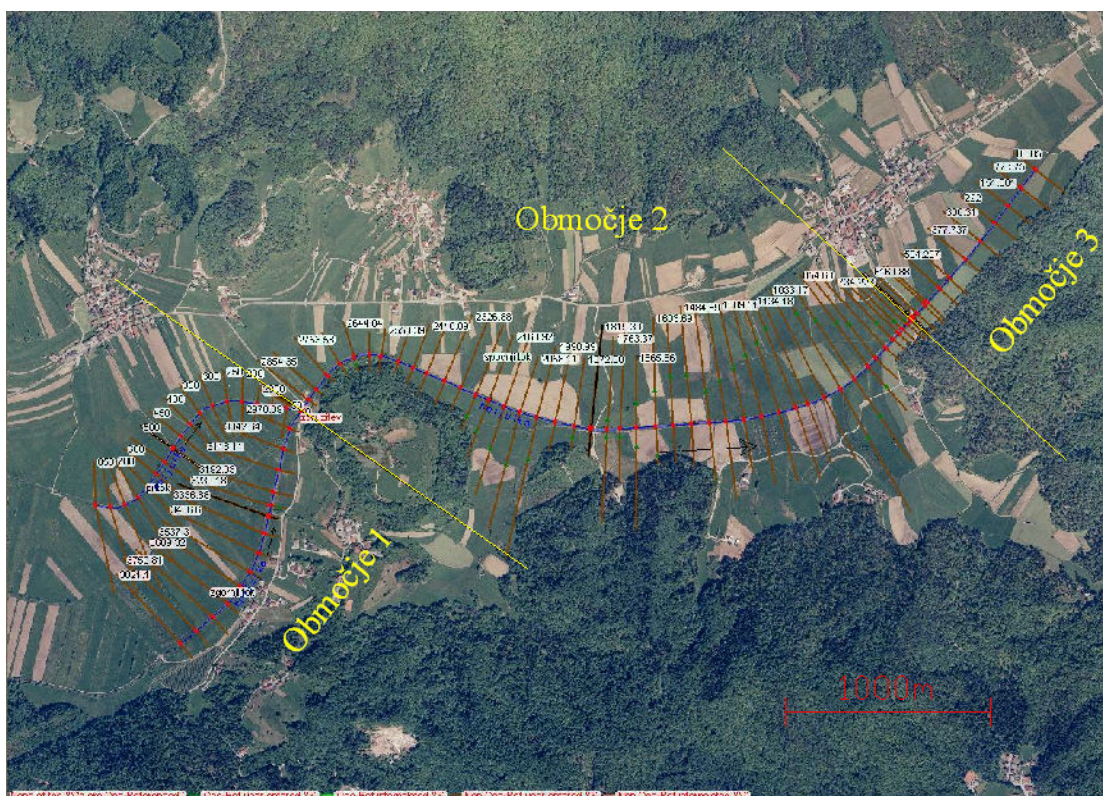
3.3.1 Splošno

Obravnavano področje (glej priloga G) leži pri naselju Brezje pri Dobrovi približno 10 km nad Bokalškim jezom. Nahaja se v srednjem toku reke Horjulščice (Šujice). Na tem področju reka teče po dolini, ki predstavlja idealni naravni zadrževalnik. Na obravnavanem območju tudi ni veliko infrastrukture in stanovanjskih oz. industrijskih objektov, saj se to območje predvsem uporablja za poljedelstvo. Na tem področju so bile v preteklosti tudi izvedene obsežne melioracije, ki še pospešujejo odtok površinske vode v reko.

3.3.2 Obstoječe stanje

Obravnavani odsek poteka od vasi Lesno Brdo pa do vasi Brezje pri Dobravi. Dolžina obravnavanega odseka je približno 3800 m, povprečni padec na tem odseku pa je 0,8%.

Na obravnavanem odseku poleg reke Horjulščice teče še potok Horjulka, ki se pri vasi Lesno Brdo izliva v reko Horjulščico. Obravnavano področje lahko glede na njihove značilnosti razdelimo na tri večja podobmočja.



Slika 4: Obravnavano območje od vasi Lesno Brdo do vasi Brezje

a) Območje 1 sega od začetka odseka in do mostu pri vasi Lesno Brdo

Obravnavano območje se začne ob vasi Lesno Brdo. Tukaj ob cesti, ki teče skozi vas teče tudi reka Horjulščica. Do mosta, ki povezuje Lesno Brdo z regionalno cesto Horjul – Brezje teče reka po nižinskem terenu, ki se uporablja za poljedelstvo in so na njem izvedene melioracije. Višje proti Horjulu na tem odseku teče tudi večji potok Horjulka. Teren na tem odseku omogoča razlivanje rek ob visokih vodah, saj ni nobenih objektov, vsa infrastruktura pa je na dosti višji koti terena, tako da bi bila ogrožena le pri izredno velikih poplavah (verjetno bistveno več kot 100-letna poplavna voda). Na tem odseku sta tudi dva manjša mostova, ki omogočata dostop do polj. Prvi most omogoča dostop čez reko Horjulščico iz vasi Lesno Brdo, drugi most pa dostop čez potok Horjulka iz Horjula. Takoj za združitvijo obeh rek stoji most, ki povezuje Lesno Brdo in regionalno cesto. Na tem mestu je bil za potrebe ceste narejen nasip, ki sedaj v kombinaciji z mostom deluje kot zadrževalnik. Ob rekah na tem odseku lahko tudi vidimo, da so bregovi zelo obrasli z vegetacijo.



Slika 5: Obraslost bregov gorvodno od profila 62 (Knapič, 2007)



Slika 6: Premostitev čez reko Horjulščico v profilu P62 (Knapič, 2007)



Slika 7: Potok Horjulka (Knapič, 2007)



Slika 8: Most med Lesnim Brdom in regionalno cesto v profilu P56 - konec Odseka 1 (Knapič, 2007)

b) Območje 2 pa obsega prostor od mostu pri Lesnem Brdu pa do mostu pri vasi Brezje

Od mostu pri vasi Lesno Brdo teče reka zopet po nižini. Tako imamo ob levem bregu reke obsežna polja z izvedenimi melioracijami, na desnem bregu reke pa se teren hitro dviga. Tako je nižina po kateri teče reka omejena z regionalno cesto Horjul – Brezje, do katere se teren počasi dviga in pa dvema manjšima gričema na desnem bregu reke. Tak prostor ustvari naravni zadrževalni prostor za visoke vode. Na tem celotnem območju ni nobenih objektov ali obsežnejše infrastrukture. Obstaja samo makedamska cesta, ki z mostom preko reke povezuje samotno kmetijo. Ob vasi Brezje se dolina reke začne zopet ožati. Za zožitev je kriv most, ki povezuje vas Dobri dol z vasjo Brezje in s svojim nasipom za cesto povzroči ožanje doline. Na tem mestu je bila tudi predvidena gradnja zapornice in nasipa za zadrževalnik Brezje.



Slika 9: Teren na Območju 2 gorvodno od prereza P12 (Knapič, 2007)



Slika 10: Most v prerezu P36 (Knapič, 2007)



Slika 11: Most v prerzu P12, ki povezuje Brezje z vasjo Dobri dol – konec Odseka 2 (Knapič, 2007)

c) Območje 3 dolvodno od mostu pri Brezjah

Na tem območju teče reka po nižini do naselja Razori. Območje se uporablja za polja, na njem so izvedene melioracije. Območje na desni strani struge je zopet omejeno z gričevjem in regionalno cesto Brezje – Razori na levem bregu, do katerega se teren počasi dviga. Na tem odseku se struga reke Horjulščice razširi in lahko prevaja večji pretok kot gorvodno. V strugi so vidne tudi nekatere regulacije, ki so bile verjetno izvedene v preteklosti (pragovi, urejeni dotoki različnih potokov in drugo). .



**Slika 12: Območje 3 dolvodno od prereza P12
(Knapič, 2007)**



**Slika 13: Struga reke Horjulščice v prerezu P12
(Knapič, 2007)**

3.4 Zadrževalniki na povodju Gradaščice

3.4.1 Splošno o zadrževalnikih na Gradaščici

Na porečju Gradaščice naj bi se v prihodnosti uredili trije suhi zadrževalniki s katerimi bi se zmanjšal in kontroliral poplavni val ob nastopu visoke vode. Prvi in najpomembnejši je zadrževalnik Razori. Ta zadrževalnik kontrolira 66% povodja Gradaščice, oddaljen pa je samo 1,5 km od Bokalškega jezera (kontrolni prerez za reko Gradaščico) do kamor poplavni val potuje približno 5 min. Koristna prostornina zadrževalnika je 2,6 milijona m³. Drugi suhi zadrževalnik je zadrževalnik Šujica. Predviden je samo v nekaterih variantah ureditve. Postavljen naj bi bil tik nad naseljem Šujica. Zajel pa bi lahko 1,1 milijona m³ vode (MOP, 2006).

Tretji suhi zadrževalnik pa je zadrževalnik Brezje, ki je obdelan v tej diplomski nalogi. Velika prednost tega zadrževalnika je naravni zadrževalni prostor. Od kontrolnega prezeza je oddaljen 10 km, kar pomeni, da poplavni val do tja potuje slabo uro. Zadrževalnik naj bi kontroliral 63% povodja Horjulke (Šujice) oziroma 19% povodja Gradaščice do Bokalcev. Njegov ocenjeni koristni volumen pa je med 1,9 do 2,2 milijona m³ odvisno od vira (MOP, 2006).

3.4.2 Zadrževalnik Brezje

Zadrževalnik Brezje se nahaja v srednjem toku Horjulke (Šujice) pri naselju Brezje (glej priloga G). Leži na področju, ki sega od vasi Brezje do vasi Horjul in je opisano v prejšnjem poglavju (3.3). Voda, ki bi jo zadržali, naj bi se razlivala po območjih 1 in 2, ki sta opisani v prejšnjem poglavju. Na tem območju se sicer že sedaj ob poplavi razliva voda, vendar pa je odtok vode s področja prevelik, zato ga je potrebno regulirati. Na prehodu z območja 2 v območje 3 naj bi se zato postavila zapornica in čelni nasip na reko Horjulščico. Zapornica v kombinaciji z nasipom bi preprečevala prosto odtekanje vode in bi tako gorvodno ob visoki vodi ustvarila še večje poplavno območje in bi bolje kontrolirala iztok vode.

Zadrževalnik Brezje naj bi deloval po principu suhega zadrževalnika. Tako naj bi se večino časa uporabljal za poljedelstvo, medtem ko bi ob visoki vodi to področje poplavlil. Ob stoletni visoki vodi naj bi bilo poplavljeno do 140 ha površin, ki pa so že sedaj poplavljeni ob nastopu visoke vode (MOP, 2006).

3.4.3 Vodogradbeni ukrepi na zadrževalniku Brezje

Da lahko na obravnavanem prostoru zgradimo zadrževalnik, moramo čelno na reko Horjulščico postaviti zapornico v kombinaciji z nasipom. S tem dvema ukrepoma zapremo zadrževalni prostor in tako kontroliramo odtok vode. V tej diplomski nalogi posvetim večji poudarek delovanju zapornice, saj predstavlja najbolj pomemben del delovanja zadrževalnika.

Ostala ureditev, kot je izgradnja nasipa in prostorska ureditev zadrževalnika ni pomembna za to diplomsko nalogo. Obenem pa tudi presega obseg te diplomske naloge. Dimenzije in prostor zadrževalnika mora biti določen že predhodno, saj moramo nujno vedeti maksimalno višino do kje lahko sega voda. Te meritve pa je treba opraviti že predhodno in so nujne da lahko postavimo nasip in naredimo prostorsko ureditev. Opis teh dveh problemov je povzet iz različnih virov in samo kot primer, kaj je treba ob projektu zadrževalnika še urediti.

3.4.3.1 Zapornični objekt na zadrževalniku Brezje

Za varno in funkcionalno obratovanje zadrževalnika je zelo pomemben zapornični objekt. Tako zapornica omogoča neoviran odtok vode do velikosti pretoka, ki še ni kritičen. Ob povečanih pretokih pa se zapornica zapre in doseže zadrževanje voda v zadrževalniku. V preteklosti je bilo za zadrževalnik Brezje narejeno že več študij, ki so obravnavale takšne in drugačne zapornične objekte. V tej diplomski nalogi je za zapornični objekt uporabljena tablasta kotalna zapornica dimenzij 6x4 m. Pri zapornici teh dimenzij se pri 100 letnem pretoku ($Q = 42 \text{ m}^3/\text{s}$) gorvodno za zapornico ne pojavi prevelika zaježba (vzdolžni profil vodotoka na tem območju je podan v prilogi C). Sama zapornica pa tudi dopušča zadosti velik pretok, če bi bilo potrebno zapornico odpreti, pri pretokih večji od 100-letnih, ki bi ogrožali zadrževalnik.

Obratovanje zapornice je predvideno avtomatsko z ozirom na zahtevane pogoje obratovanja. Predviden je električni pogon, vendar pa mora imeti zapornica kot rezervni vir še dizel agregat. V neposredni bližini zaporničnega objekta pa je predvidena tudi izgradnja objekta za upravljanje. Upravljanje zapornice bo možno lokalno ali pa daljinsko (MOP, 2006).

3.4.3.2 Nasip zadrževalnika Brezje

Zadrževalni prostor mora biti omejen s krajšim nasipom dolžine do 700 m. Nasip je prečen na dolino in ima naklon 1:3, za take blage naklone pa so za vgradnjo primerni tudi glinasto-meljasti materiali. Iz okvirnega geološkega poročila je tudi razvidno, da so temeljna tla pod nasipom primerna za vgradnjo nasipa. Najvišja kota nasipa naj bi dosegala višino 332,5 m nadmorske višine. Za nasip je potrebno do 25 000 m³ zemljine. Nasip bo ozelenjen in povezen le v primerih vzdrževanja zadrževalnika. (IzVRS, 2005).

3.4.3.3 Prostorske ureditve ob zadrževalniku Brezje

Zaradi izgradnje zadrževalnega prostora je potrebno izvesti tudi druge prostorske ureditve. Tako se mora zgraditi prehodno rampo preko nasipa za dostop do obdelovalnih površin, obvozna cesta, prestaviti se mora komunalna infrastruktura. Poleg tega moramo zagotoviti

odvod zalednih in odcednih voda z izgradnjo jarka na zunanji strani nasipa, prestaviti pa je potrebno tudi potok, ki teče z vasi Brezje.

3.4.4 Princip delovanja zadrževalnikov na porečju Gradaščice

Zadrževalniki na rekah vplivajo na večje področje kot pa samo na področje v okolici zadrževalnika. Na delovanje zadrževalnikov moramo zato vedno gledati v okviru celotnega porečja, ne pa samo enega dela. Tako je tudi z zadrževalniki na porečju Gradaščice. Tako zadrževalnik Brezje ni narejen samo zato, da bi preprečeval visoke vode Horjulščice, ampak zato, da bi v sotočju Gradaščice in Horjulščice zmanjšal prevelik pretok (sovpad konic poplavnih valov), ki bi povzročal škodo dolvodno od sotočja.

V različnih študijah in projektih, ki obravnavajo porečje Gradaščice je veliko različnih variant izvedbe protipoplavnih ukrepov. Tako so bile pregledane variante izvedbe delovanja samo od enega zadrževalnika (Razori) pa do delovanja vseh zadrževalnikov (Razori, Šujica, Brezje) in pa vmesne kombinacije. Katera varianta je najboljša, zahteva temeljito presojo dobljenih rezultatov in oceno stroškov, kar pa že presega vsebino te diplomske naloge. Zato sem se omejil samo na delovanje zadrževalnika Brezje.

Zadrževalnik Brezje tudi v vseh variantah deluje v kombinaciji z zadrževalnikom Razori. Sistem pa bi deloval po sledečem postopku. Ko je v kontrolnem prerezu pod sotočjem Gradaščice in Horjulščice presežen kritični pretok (okoli $90 \text{ m}^3/\text{s}$), se začne najprej polnjenje zadrževalnika Brezje. Polnjenje bi potekalo tako, da v kontrolnem prerezu ni presežen željen pretok $90 \text{ m}^3/\text{s}$ oziroma dokler zadrževalnik Brezje ni poln. Potem se v sistem vključita še ostala zadrževalnika. Polnjenje zadrževalnika Brezje se začne prvo zato, ker je oddaljenost zadrževalnika od kontrolnega prereza najdaljša. Tako ima vpliv zadrževanja nekaj zakasnitve (zakasnitev visokovodnega vala) in zaradi tega se sam zadrževalnik le ob določenih padavinskih situacijah napolni do razpoložljive prostornine. Praznjenje zadrževalnikov pa se prične, ko pretok v kontrolnem prerezu začne upadati. Takrat bi se zadrževalnik praznili s pretokom, ki v kontrolnem prerezu ne bi presegal $90 \text{ m}^3/\text{s}$.

4 Hidrološki računski model Horjulščice

4.1 Uporabljeni računalniški programi – HEC-HMS

Program HEC-HMS je namenjen simuliranju površinskega odtoka na razvejanih povodjih, ki nastane kot posledica padavin. Namenjen je za reševanje različnih problemov na različnih geografskih terenih. Sem je vključeno tako dogajanje na velikih povodjih rek, hidrologija poplav in odtok z majhnih urbanih okolij. Program kot rezultate vrne hidrograme, ki jih lahko direktno uporabimo v drugih programih za račun hidravlike, odvodnjavanja voda, napovedovanja pretoka, preprečevanja poplav in drugo.

Sam program je uporabniško prijazen, saj delo z njim ni težko. Program je razdeljen na različne module, ki jih je potrebno definirati za vsak projekt posebej. Delimo jih na sledeče module:

- modul povodja: določimo karakteristike povodja
- modul meteroloških razmer: določimo padavinske podatke
- kontrolni modul: določimo komponente in čas simulacije

Program vsebuje še tri module (modul za časovne podatke, modul za primerjalne podatke in modul za mrežne podatke). Te module potrebujemo v kombinaciji s prvimi tremi glavnimi moduli za vnos podatkov. Moduli nam omogočijo, da sestavimo model povodja, ki simulira dejansko realno povodje s katerim se ukvarjamo.

4.2 Hidrološki modeli

Za analizo dogajanja na nekem vodotoku ob nastopu visoke vode potrebujemo natančne podatke, da lahko izvedemo potrebne in učinkovite protipolavne ukrepe. Podatki morajo biti tudi dovolj kakovostni in obsežni. Običajno pa nimamo na razpolago dovolj kakovostnih podatkov. Podatki, ki jih imamo na razpolago ne sežejo dovolj nazaj v preteklost ali pa zgodovinski podatki niso dovolj točni, kar nam onemogoča, da bi izvedli natančno statistično analizo. Lahko pa, da podatke imamo, vendar ne za lokacijo, katera nas zanima.

Da bi učinkovito zaščitili neko območje pred poplavo rabimo podatke o maksimalnem pretoku. Dokler pa se poplava ne zgodi, ne moremo izvesti meritve tega podatka. Čakanje, da se poplava zgodi pa je nesprejemljivo. Zato moramo vse podatke, ki jih rabimo (kot so pretok, hitrosti vode, trajanje poplavnega vala), napovedati in predvideti še preden pride do poplave. To pa lahko dosežemo z uporabo matematičnega hidrološkega modela. V tem modelu z nizom matematičnih enačb iz znanih podatkov dobimo neznane podatke. V hidroloških matematičnih modelih znane podatke predstavljajo padavine, ki jih lahko merimo, neznane podatke pa pretok, trajanje pretoka in hitrosti na mestu, ki nas zanima.

4.3 Podatki v hidrološkem modelu

4.3.1 Splošno

Hidrološki model potrebuje dobre podatke, saj le tako lahko dobimo kakovostne rezultate. Vhodni podatki, ki jih je potrebno vstaviti v model, tako vsebujejo karakteristike povodji in pa značilnosti padavin, ki so padle na povodje. Podatki o karakteristikah povodja se delijo na dva dela. Prvi del predstavljajo padavinske izgube in faktor CN, drugi del pa predstavljajo podatki o sintetičnemu hidrogramu. S temi podatki podamo realno sliko povodja in lahko tako izvedemo čim bolj realno simulacijo.

4.3.2 Padavinske izgube - metoda SCS

Za računanje padavinskih izgub obstaja več različnih metod (model začetnih in enakomernih izgub, model deficita in enakomernih izgub, SCS model in model Green-Ampta). Vsem metodam je skupno, da izračunamo izgube padavin za vsak časovni interval posebej in se izgube nanašajo na višino padavin v določenem časovnem obdobju. Izbira metode za izračun izgub in ocena parametrov sta kritična koraka pri modeliranju, saj se vse metode računa izgub ne morejo uporabiti z vsemi metodami transformacij padavin v odtok. V tej diplomski nalogi sem se odločil, da uporabim metodo SCS. Ta metoda daje ob dokaj nezahtevni uporabi zadosti točne podatke, da jih lahko kakovostno uporabimo v hidroloških modelih.

Metodo SCS je na podlagi poizkusov izdelala Agencija ameriškega ministrstva za kmetijstvo. Metoda temelji na tem, da je prej omenjena agencija izdelala klasifikacijo različnih vrst zemljine glede na njihove prepustnosti. Lastnosti zemljine so tako opisane s koeficientom CN, ki zajema vpliv pedologije, rabe tal in predhodne vlažnosti zemljine. Koeficient I_a opisuje izgube na površini povodja, preden pride do infiltracije vode v zemljino (Brilly, 2005).

Efektivne padavine določi metoda SCS kot funkcijo celotnih padavin, pokrovnosti tal, rabe tal in vlažnosti. Rezultat so efektivne padavine v določenem časovnem intervalu in jih določimo z enačbo:

$$Pe = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (1.)$$

kjer je:

- P_e – akumulirane efektivne padavine v času t (mm)
- P – višina padavin v času t (mm)
- I_a – začetne izgube (mm/h)
- S – maksimalno potencialno zadrževanje (/)

Za določitev začetnih izgub - I_a pa je bila razvita eksperimentalna enačba:

$$I_a = 0,2 \cdot S \quad (2.)$$

Maksimalno zadrževanje S pa izračunamo z enačbo:

$$S = \frac{25400 - 254 \cdot CN}{CN} \quad (3.)$$

Faktor CN zajema lastnosti zemljine, ocenimo ga s pomočjo tabel ali pomočjo SCS krivulj in predstavlja funkcijo rabe in vrst tal ter predhodne vlažnosti. Vrednosti koeficienta CN se gibljejo med 100 (vodna telesa) do 30 (prepustne zemljine z visoko infiltracijsko sposobnostjo). Na območju moramo najprej ugotoviti kakšni tipi pokrovnosti tal so prisotni, nato pa se odločimo v katero hidrološko skupino spadajo. Hidrološko skupino določimo glede na stopnjo infiltracije, to pa delimo na štiri tipe. Tipi se delijo od tipa A do tipa D. Tip A predstavlja nizek odtočni potencial, se pravi voda ima visoko stopnjo infiltracije, kar pomeni, da se veliko vode infiltrira tudi če je zemljina popolnoma zasičena. Tip D pa predstavlja zemljino z zelo majhno sposobnostjo infiltracije vode. Tipa B in C sta nekje vmes. Določiti

moramo tudi hidrološke pogoje, ki so lahko dobri ali slabi. Kadar imamo na povodju prisotnih več različnih pokrovnosti tal se koeficient CN izračuna na osnovi deleža površine, ki pripada posamezni pokrovnosti tal glede na skupno površino povodja.

$$CN_{skupen} = \frac{\sum A_i \cdot CN_i}{A_i} \quad (4.)$$

V tej diplomski nalogi sem uporabil sledeče podatke o padavinskih izgubah in faktorju CN za vsa povodja:

Preglednica 3: Podatki o posameznih podpovodjih reke Horjulščice (Škrbec, 2005)

Območje	A (km ²)	CN	la (mm)
14841	3,45	65,5	7,8
14842	1,87	64	9
14843	12,92	66,35	5,75
14844	4,88	64,7	7,05
14845	5,59	66,65	7,85
14846	1,56	65	9
14847	4,79	65,1	6,35
14848	3,67	63,65	9,45
14849	8,61	68,5	7,75

4.3.3 Sintetični hidrogram enote

Hidrogram enote trajanja T je definiran kot površinski odtok, ki ga povzroči enota efektivnih padavin 10 mm, ki so bile v času T enakomerno porazdeljene po povodju. Z modeli hidrograma enote poskušamo simulirati površinski odtok. Teorija hidrograma enote je zasnovana na ugotovitvi, da je podobnost med oblikami hidrogramov odtoka s posameznih povodij pri določenih količinah padavin podobna. Hidrogram enote je funkcija, ki koncentrirano ponazarja vse dejavnike, ki vplivajo na oblikovanje odtoka s povodja, kot so: oblika, padec, površina, poraščenost, lastnosti zemljine, geološke danosti in trajanje efektivnih padavin.

Metode sintetičnih hidrogramov enote se uporabljajo pri transformaciji efektivnih padavin v iztok s povodja, ko ne razpolagamo z meritvami ali pa te niso dovolj točne, da bi lahko oblikovali hidrogram enote. Sintetične hidrograme oblikujemo na podlagi določenih lastnosti povodja in različnih teoretičnih in empiričnih izhodišč (Brilly, Šraj, 2005).

4.3.3.1 Metoda Clark

Metoda Clark izpelje hidrogram enote povodja z eksplicitno predstavitevijo dveh kritičnih procesov pri transformaciji efektivnih padavin v odtok:

- premik presežka od izvora skozi celoten dren do iztoka iz povodja
- zmanjšanje velikosti iztoka s skladiščenjem presežka skozi povodje

Kratkotrajno skladiščenje vode na povodju – v zemljini, na površju, v strugi igra pomembno vlogo pri transformaciji efektivnih padavin v odtok. Z metodo linearnega rezervoarja (skupna predstavitev skladiščenja) in kontinuitetno enačbo ter reševanje teh enačb z metodo končnih razlik dobimo enačbo za iztok iz skladišča:

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1} \quad (5.)$$

kjer je:

O_t – iztok iz skladišča v času t (m^3/s)

O_{t-1} – iztok iz skladišča v času $t-1$ (m^3/s)

I_t – vtok v skladišče v času t (m^3/s)

C_A, C_B – koeficienta potovanja (/)

Poprečni iztok v času t tako lahko ocenimo z enačbo:

$$\bar{O}_t = \frac{O_{t-1} + O_t}{2} \quad (6.)$$

Linearni rezervoar predstavlja celoten vpliv na povodju, zato lahko predpostavimo, da je rezervoar lociran na iztoku iz povodja. Metoda Clark se računa za čas, ki ga voda rabi, da priteče od oddaljenih točk do iztoka iz povodja. Zakasnitev je predstavljena implicitno s krivuljo čas-površina. Ta določa površino povodja, ki prispeva k toku na iztoku, kot funkcijo časa.

4.3.3.2 Metoda SCS

Metoda SCS je parametrična metoda določanja hidrograma enote. Metoda temelji na osnovi povprečij hidrograma enote, ki so določeni iz merjenih padavin in odtoka za večje število manjših kmetijskih povodij v ZDA.

SCS hidrogram enote je brezdimenzijski z enim samim vrhom. Izraža pretok U_t kot razmerje do konice hidrograma enote U_p v odvisnosti od razmerja časa t in časa pojava konice T_n . Po SCS metodi sta konica hidrograma enote in čas pojava konice povezana z naslednjo zvezo:

$$U_p = C \frac{A}{T_n} \quad (7.)$$

kjer je:

A – površina povodja

C – konstanta pretvorbe enot

U_p – vrh standardnega hidrograma

Čas vrha hidrograma, poznan tudi kot čas naraščanja hidrograma, je povezan s trajanjem enote efektivnih padavin:

$$T_n = \frac{\Delta t}{2} + t_p \quad (8.)$$

kjer je:

Δt – trajanje efektivnih padavin (h)

T_p – čas zakasnitve povodja, definiran kot časovna razlika med masnim težiščem efektivnih padavin in vrha hidrograma enote (h)

Ko je čas zakasnitve definiran, lahko izračunamo čas vrha hidrograma enote in nato še vrh hidrograma enote. Z znanima T_n in U_p lahko izpelejemo hidrogram enote iz brezdimenzijske oblike.

Čas zakasnitve T_p se lahko oceni s umerjanjem. Za nemerjena podpovodja SCS predlaga, da je čas zakasnitve povezan s časom koncentracije t_c :

$$T_p = 0,6 \cdot t_c \quad (9.)$$

Čas koncentracije je čas potreben, da do izhodnega profila povodja priteče voda iz najbolj oddaljenega dela povodja. Čas koncentracije ocenimo kot:

$$t_c = t_{povr} + t_{plitev} + t_{kanal} \quad (10.)$$

kjer je:

t_{povr} – vsota časa potovanja po segmentih površine povodja (h)

t_{plitev} – vsota časa potovanja v plitvih tokovnih segmentih (h)

t_{kanal} – vsota časa potovanja v kanalu (h)

4.3.3.3 Metoda Snyder

Metoda Snyder temelji na zvezah za določitev parametrov hidrograma enote iz karakteristik povodja. Metodo je razvil Snyder leta 1938 za odtok s povodji v visokogorju ZDA, kjer ni bilo na voljo meritev. Določil je čas zakasnitve, vrh hidrograma in skupni osnovni čas, kot kritične karakteristike hidrograma enote. Standardni hidrogram enote je definiral kot zvezo med trajanjem padavin t_r in časom zakasnitve t_p (razlika med časoma vrha hidrograma enote in težišča efektivnih padavin).

$$t_p = 5,5 \cdot t_r \quad (11.)$$

Kadar je trajanje želenega hidrograma enote bistveno drugačno kot je določeno z zgornjo enačbo, se uporabi naslednja enačba:

$$t_{pR} = t_p - \frac{t_r - t_R}{4} \quad (12.)$$

kjer je

t_R – želeno trajanje (h)

t_{pR} – želen čas zakasnitve (h)

Čas zakasnitve hidrograma enote in vrh na enoto efektivnih padavin na enoto površine povodja sta povezana z enačbo:

$$\frac{U_p}{A} = C \cdot \frac{C_p}{t_p} \quad (13.)$$

kjer je:

t_p – čas zakasnitve

U_p – vrh standardnega hidrograma

A – površina povodja

C_p – koeficient vrha hidrograma enote

C – konstanta pretvorbe enot

Na podlagi meritev in padavin je Snyder določil hidrograme enote jih parametriziral in parametre povezal z merjenimi vrednostimi. Za čas zakasnitve je predlagal sledečo enačbo:

$$T_p = 0,7516 \cdot C_t \cdot (L \cdot L_c)^{0,3} \quad (14.)$$

kjer je:

T_p – čas zakasnitve (h)

C_t – koeficient povodja (/)

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)

Snyderjev hidrogram enote je verjetno najbolj razširjen in raziskan postopek za določanje hidrograma enote. Obstaja zelo veliko različnih metod, ki nam pomagajo določiti parametre Snyderjevega hidrograma enote.

4.3.4 Metoda propagacije – Muskingumov model

Tok vode v strugah potuje v različnih oblikah. Tem oblikam rečemo tudi metode propagacije. V hidravličnih modelih se za izračun oblik toka potrebuje zelo kvalitetne podatke in račun traja zelo dolgo. Nas pa v hidroloških modelih zanimajo le spremembe na dotočnem in iztočnem profilu vodotoka, ki jih lahko dobimo z uporabo enostavnejših empiričnih modelov. Te modele so razvili hidrologi posebej za rabo v hidroloških modelih. Hidrološki modeli računajo dolvodni hidrogram po poenostavljenih St. Venantovih enačbah in za zgornji pogoj vzamejo gorvodni hidrogram.

Muskingumov model propagacije uporablja oceno končnih razlik kontinuitetne enačbe in upošteva skladiščenje vode na odseku. Ti dve enačbi lahko združimo in dobimo enačbo:

$$O_t = \frac{\Delta t - 2kX}{2k(1-X) + \Delta t} I_t + \frac{\Delta t - 2kX}{2k(1-X) + \Delta t} I_{t-1} + \frac{2k(1-X) - \Delta t}{2k(1-X) + \Delta t} O_{t-1} \quad (15.)$$

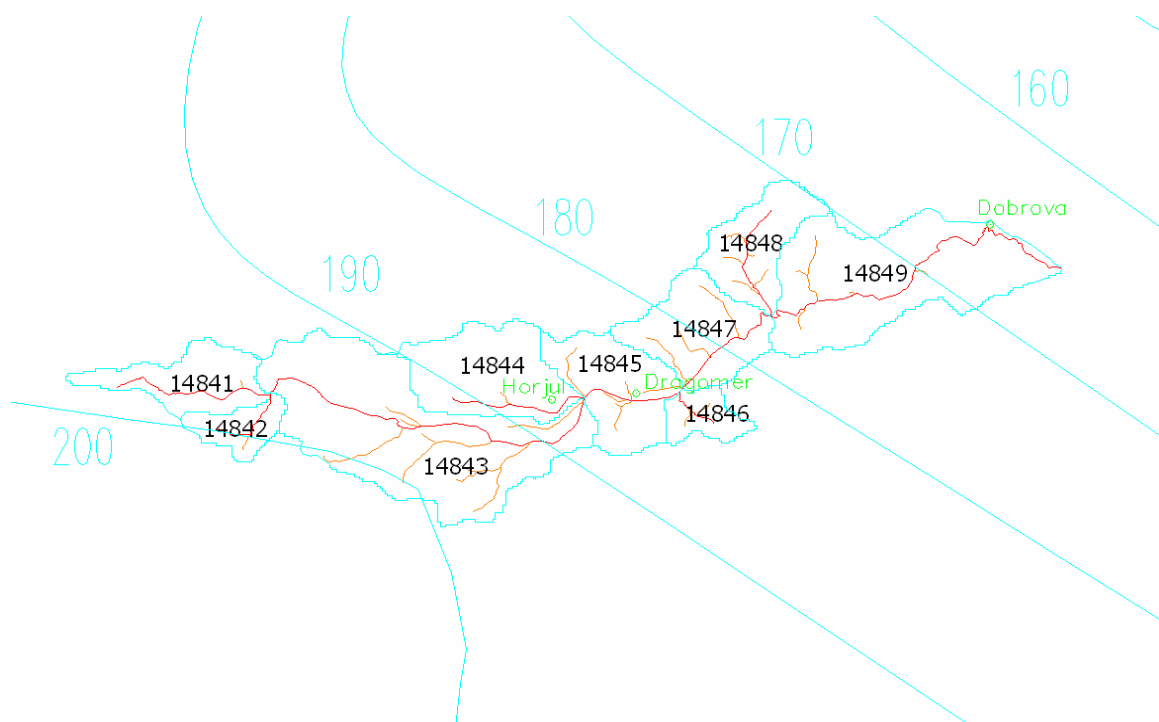
Za uporabo Muskingumovega modela pa moramo določiti parametra K in X in primerno izbrati časovni interval. K predstavlja čas potovanja poplavnega vala skozi odsek, medtem ko X predstavlja brezdimenzijski utežni koeficient. Koeficienta določimo s pomočjo podatkov o

merjenih pretokih. Če tega podatka nimamo parametra lahko ocenimo s pomočjo karakteristik vodotoka.

4.3.5 Padavine

Eden izmed najpomembnejših podatkov, ki jih uporabljamo v hidroloških modelih so podatki o padavinah. Obenem pa je te podatke tudi najtežje določiti. Obstajajo sicer merna mesta in metode, ki poizkušajo napovedati kako se bodo padavine obnašale, vendar da se določi točen histogram padavin med nevihto je malo verjetno.

V tej diplomski nalogi sem se določanja padavin lotil bolj enostavno. Z Inženiringa za vode in spletne strani ARSO sem pridobil karto predvidenih 24-urnih padavin za povratno dobo pojava 100 let za območje povodja Horjulščice. Celotna karta Slovenije za padavine 24-urnega trajanja je podana v prilogi D. V diplomski nalogi sem obdelal samo ta primer (namesto recimo 5, 6, 12, 18, 21 urnih padavin), saj v tem primeru na povodje pade največja prostornina vode, kar je tudi najbolj pomembno. Odločil bi se lahko tudi za padavine z različno povratno dobo (5, 10, 20, 50 let), vendar pa je povsod prostornina padle vode manjša. Kako pa se bo obnašal zadrževalnik pa je odvisno prav od prostornine padle vode.



Slika 14: Območja padavin po povodju Horjulščice (Šraj, 2000)

Dela sem se lotil na dva načina. V prvem sem določil količino padavin za vsako podpovodje posebej in nato predpostavil, da padavine padajo enakomerno 24 ur na vsakem podpovodju posebej. V tem primeru ne pričakujem čisto točnih rezultatov, vendar lahko naredim inženirsko poenostavitev. Padavine nekaj časa padajo močneje, nekaj časa pa manj močno. Zato lahko pričakujem, da se bodo te razlike v padavinah zaradi trajana površinskega odtoka uravnotežile. V drugem primeru pa sem si pomagal z funkcijo, ki je vgrajena v program HEC-HMS. Ta funkcija omogoči, da za določeno povratno dobo padavin na nekem območju, ki ga obravnavamo, izračuna histogram padavin. Dobljeni histogrami imajo obliko nevihte željene dolžine, željenega trajanja maksimalnih padavin (takrat pade približno 70% vseh padavin) in pozicije časa, ko nastopijo maksimalne padavine. Delo v tem primeru pa je problematično, ker program predpostavi da po celem povodju pada ista količina padavin ob istem času. To pa pri večjih povodjih ne drži. Zato lahko pričakujem večjo prostornino vseh skupnih padavin in pa večji konični odtok zaradi sovpadanja poplavnih valov (vse padavine padajo ob istem času po celem povodju).

Uporabljena količina padavin:

- Količina padavin za enakomerni razpored po povodju

Preglednica 4: Količina padavin za prvo simulacijo

Povodje	Količina padavin
14841	198 mm
14842	200 mm
14843	195 mm
14844	188 mm
14845	185 mm
14846	184 mm
14847	180 mm
14848	174 mm
14849	171 mm

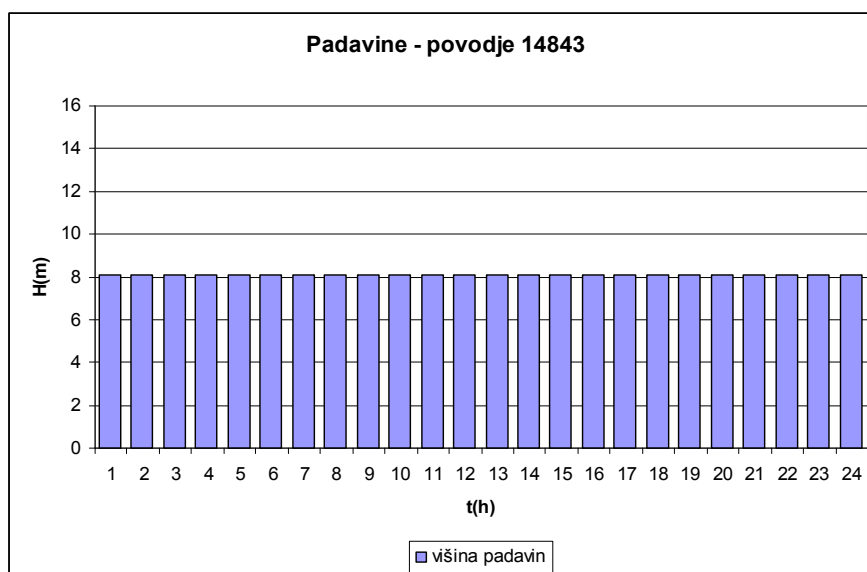
- Količina padavin za nevihto

Preglednica 5: Količina padavin za drugo simulacijo

Povodje	Pozicija naliva	Količina padavin
vsa podpovodja	25%	185 mm
vsa podpovodja	50%	185 mm
vsa podpovodja	75%	185 mm

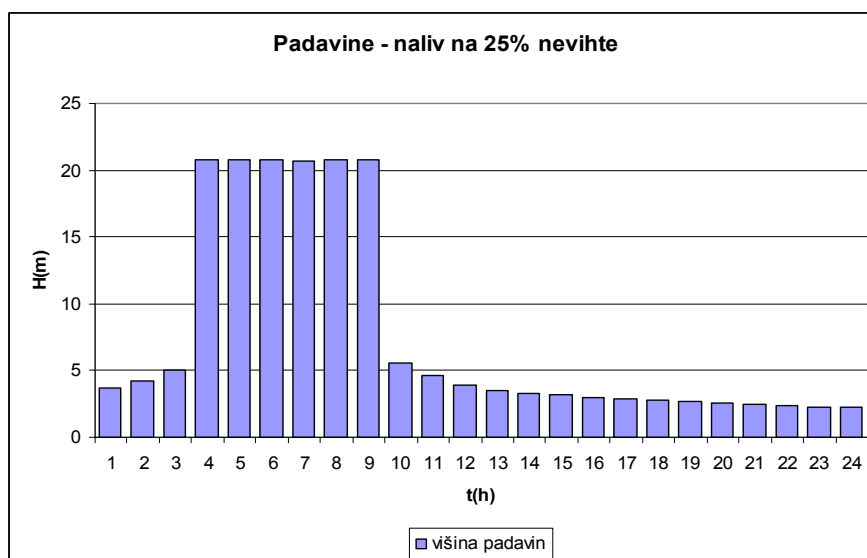
Predstavitev uporabljenih histograme za različne padavine:

1. Padavine so določene za vsako povodje posebej in razporejene enakomerno v času



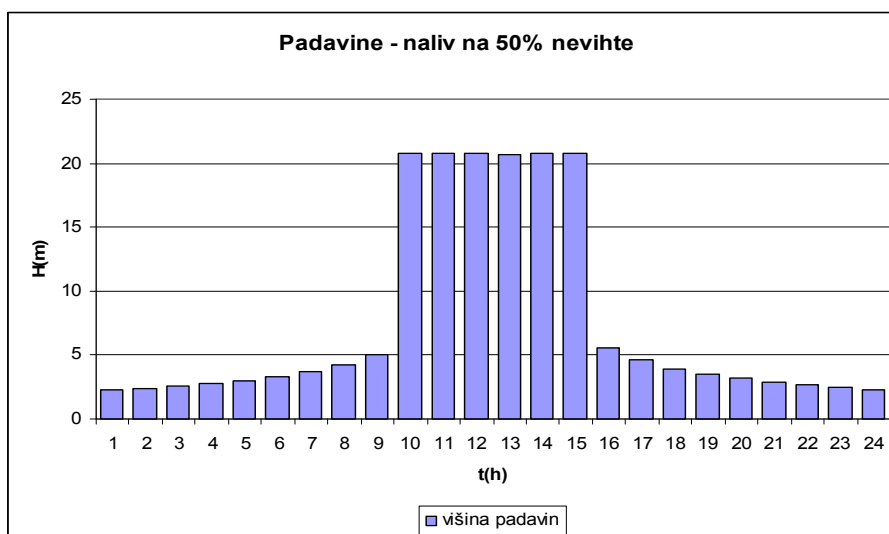
Graf 1: Histogram padavin za enakomerno porazdeljene padavine na povodju 1484

2. Padavine so določene kot nevihta 24 - urnega trajanja s 6 urnim nalivom in časom naliva v prvi četrtini nevihte



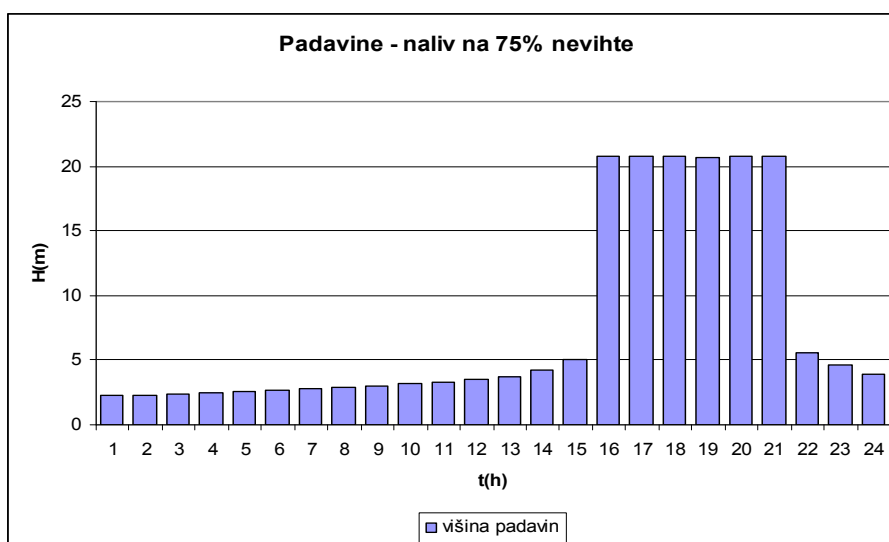
Graf 2: Histogram padavin za vsa podpovodja za čas naliva na 25% nevihte

3. Padavine so določene kot nevihta 24 - urnega trajanja s 6 urnim nalivom in časom naliva na polovici nevihte



Graf 3: Histogram padavin za vsa podpovodja za čas naliva na 50% nevihte

4. Padavine so določene kot nevihta 24 - urnega trajanja s 6 urnim nalivom in časom naliva v zadnji četrtini nevihte



Graf 4: Histogram padavin za vsa podpovodja za čas naliva na 75% nevihte

Uporabljene padavine ne predstavljajo padavin, ki bi se dejansko zgodile v naravi. Vendar pa bodo podatki o padavinah zadosti točni za obravnavo v tej diplomski nalogi.

4.3.6 Točnost podatkov

Hidrološke modele je treba umeriti na nek dogodek, ki se je zgodil v preteklosti. S tem dobimo oceno kako točno je narejen hidrološki model. V sklopu moje diplomske naloge tega žal nisem mogel narediti, saj ni bilo moč dobiti dovolj podatkov o visokih vodah na reki Horjulščici.

Podatka o začetnih izgubah $-I_a$, faktor CN in parametri za Muskingumov model je bil v tej diplomski nalogi dobljen s predhodno narejene diplomske naloge Hidrološki model Gradaščice z Glinšice, ki jo je napisal Gregor Škrbec. Ponovno določevanje teh podatkov ne bi imelo smisla, saj je za kakovostne podatke (dobro umerjene) treba narediti umeritev modela, kar pa zaradi pomankanja podatkov nisem mogel. Tako sem prej omenjene podatke prevzel.

Točnost podatkov o padavinah je vprašljiva. Količino padlih padavin in obliko histograma padavin sem določil bolj inženirsko, kar je za potrebe te diplomske naloge dovolj točno. Za bolj natančno analizo padavin pa bi bilo potrebno narediti obširno analizo že padlih padavin za dolgo časovno obdobje. Vendar pa so vsake padavine enkratni dogodek, zato točnega histograma padavin ne moremo napovedati.

Rezultat dela v tej diplomski nalogi je hidrološki model, ki simulira dogajanje na povodju reke Horjulščice. Menim, da je hidrološki model narejen dovolj dobro za uporabo. Shema hidrološkega modela je v prilogi A.

5 Hidravlični računski model obravnavanega odseka

5.1 Uporabljeni računalniški programi

5.1.1 Aquaterra

Aquaterra je program, ki pripada programom družine CGs GeoEngineering. Uporablja se za načrtovanje regulacij in ureditve vodotokov. Prav tako pa si lahko z njim pomagamo pri risanju načrtov, pri tehnični dokumentaciji in hidravličnih izračunih. Deluje kot modul za različne programe, ki delujejo v okolju AutoCAD in se ne more uporabljati kot samostojni računalniški program.

Program Aquaterra je sestavljen iz različnih modulov, kot so: Situacija, Osi, Vzdolžni profili, Prečni profili in Vmesnik za HEC-RAS. Ti moduli nam omogočijo enostavno pripravo in izpis podatkov za kasnejšo uporabo za program HEC-RAS. Prav tako pa lahko v programu Aquaterra urejamo že dobljene rezultate s programa HEC-RAS. Običajno različne risbe (situacije) obdelujemo v različnih modulih. Tako eno risbo obdelujemo z moduloma Situacija in Osi, v drugi risbi urejamo vzdolžne profile in tretji risbi urejamo prečne profile. Risbe in druge datoteke, ki jih dobimo so skupaj povezane preko projekta, ki je večja enota in povezuje večje število risb ter drugih podatkov. (<http://www.cgsplus.si/>)

Program Aquaterra je bil v tej diplomski nalogi uporabljen predvsem za pripravo podatkov za prenos v program HEC-RAS. V Aquaterra sem obdelal geometrijske podatke obravnavanega odseka in jih nato prek modula Vmesnik za HEC-RAS prenesel v program HEC-RAS, kjer sem dobljene podatke uporabil v nadaljni obdelavi. Z uporabo tega programa se je močno poenostavilo in skrajšalo pripravljanje geometrijskih podatkov.

5.1.2 HEC-RAS

HEC-RAS je računalniški program, ki nam omogoča izvesti hidravlični račun za enodimenzionalni stalni in nestalni tok, račun prodonosnosti in analizo temperature vode. V

tež diplomski nalogi sem uporabljal HEC-RAS 4.0 Beta, ki je izdelek U.S. Army Corps of Engineering Center in je brezplačno dostopen na internetu.

Program HEC-RAS pri hidravličnem računu stalnega in nestalnega toka računa enodimenzijsko. To pomeni, da v izračunu upošteva samo komponentno hitrosti vzdolž osi vodotoka. Program uporablja enodimenzijško rešitev energijske enačbe, pri tem pa so izgube ocenjene z geometrijskimi karakteristikami vodotoka, Manningovo enačbo in koeficientom razširitve in zožitve. Kadar v geometriji pride do nenadnih sprememb vodnega toka (mostne odprtine, prehod v deroči tok, prepusti,..) pa program uporabi momentno enačbo. V primeru računa prodnosnosti program ponuja veliko različnih metod računa, ki pa so odvisne od različnih parametrov. Oceniti moramo, katera metoda je najboljša in jo pravilno uporabiti.

Da so rezultati v programu HEC-RAS dobri moramo nujno podati dobre podatke. Tako je zelo pomembno, da podamo zelo točne podatke o geometriji vodotoka. Podajanje teh podatkov v programu HEC-RAS pa je lahko zelo zamudno, zato nam delo lahko zelo olajša že prej omenjeni program Aquaterra.

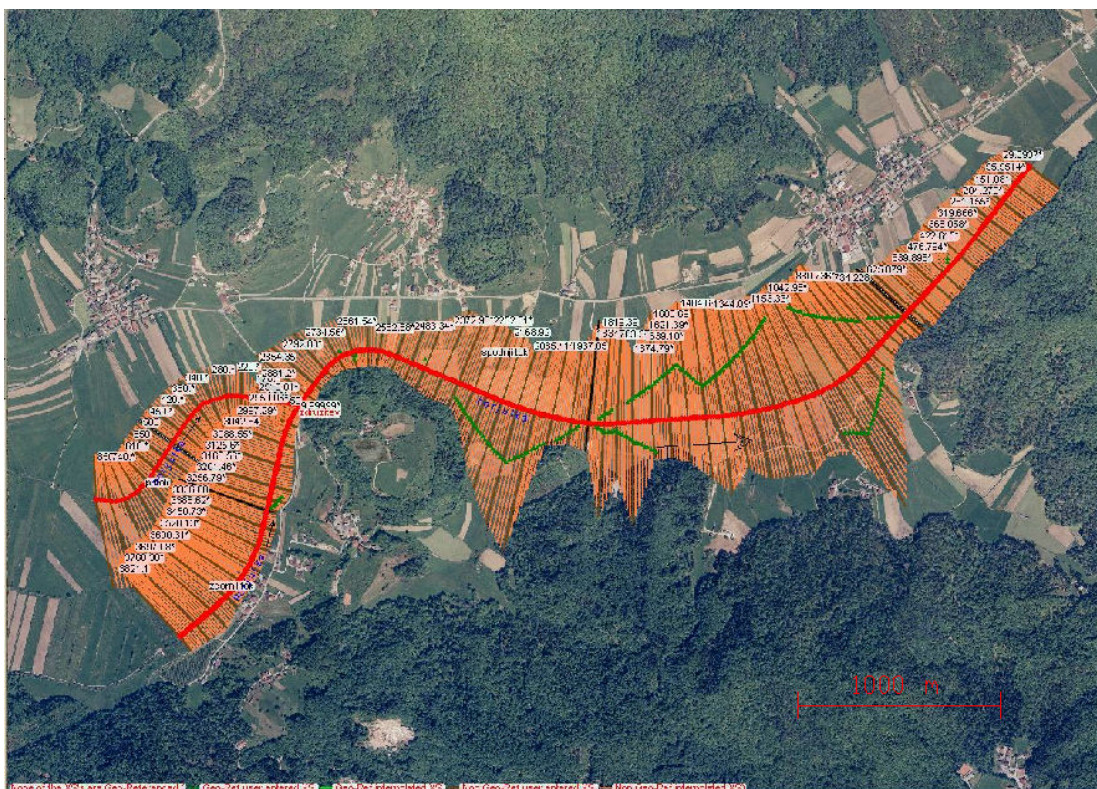
5.2 Geometrija računskega modela obravnavanega odseka

Za izdelavo čim bolj točnega računskega modela sem rabil čim bolj točne podatke. Podatke o geometriji struge sem pridobil z Inženiring za vode (IZVO), ti podatki pa so obsegali karto v merilu 1:1000 tega območja, ortofoto posnetek obravnavanega odseka, karto višinskih točk v merilu 1:1000 in pa podrobni oris posameznih profilov na vodotoku. S temi podatki sem uspel narediti računski model zadostne natančnosti za potrebe te diplomske naloge.

Za potrebe diplomske naloge je bilo potrebno obstoječe stanje vodotoka prenesti v računski model. Delo sem pričel s temeljitim pregledom karte območja v merilu 1:1000 in posameznih profilov na vodotoku. Seveda je pri boljši predstavi obravnavanega odseka pomagal tudi terenski ogled. Podatke s karte višinskih točk in karte obravnavanega odseka sem uredil s pomočjo programa Aquaterra. Tako dobljene podatke je bilo treba pred vnosom v HEC-RAS še malenkostno popraviti, predvsem podatke o prečnih profilih. Popravljenе podatke sem

potem preko vmesnika lahko prenesel v program HEC-RAS in tako dobil osnovni računski model.

Dobljeni računski model v programu HEC-RAS pa je bilo potrebno še dopolniti. Potrebno je bilo dodati še prečne objekte (mostove), ki se pojavljajo na tem obravnavanem odseku. Dimenzije mostov sem določil s pomočjo karte obravnavanega odseka in pa terenskega ogleda. Dopolniti pa je bilo potrebno tudi širino prečnih profilov vodotoka. Tako sem povečal širino posameznih profilov na levi in desni strani vodotoka za toliko, da je kota terena segala do zelene kote terena. V računski model pa je bilo potrebno dodati še potok Horjulka. Glede na pomanjkanje podatkov o tem potoku sem si najbolj pomagal s terenskim ogledom in karto obravnavanega območja. Res da podatki o tem potoku niso najbolj natančni, vendar menim, da je računski model z upoštevanjem tega potoka vseeno boljši, kot pa brez njega.



Slika 15: Končni računski model narejen s programom HEC-RAS

Za še bolj točen računski model sem interpoliral prečne profile na maksimalno razdaljo 10m. Moral pa sem upoštevati tudi zastajanje vode ob razširitvah in zožitvah in s tem sem dobil neaktivna območja. Za določitev takega območja sem moral upoštevati, da je območje poplavljenno. Neaktivna območja sem določil tako, da sem upošteval sledeča kriterija. Pri

zožitvi mora biti razmerje med vodo na levem oz desnem bregu med dvema zaporednima profiloma in njuno razdaljo manjše kot 1:1. Enako velja za razširitev, le da mora biti kriterij manjši od 1:1,5. Dobljeni računski model je s temi popravki zadosti točen za uporabo v tem projektu.

Naslednji korak v računskem modelu pa je bilo dodajanje nasipa in pa zapornice, ki bosta preprečila odtekanje vode dolvodno od izbranega profila. Zapornica in nasip sta bila v računski model vstavljena z zahtevo, da voda ne sme presegati kote terena 332 m nadmorske višine. Za zapornico pa je bila podana zahteva, da mora odvajati vodo pri 100-letni visoki vodi, če je popolnoma odprta (IzVRS, 2005). Tako sem zaključil končni računski model, ki sem ga uporabil v tej diplomski nalogi. Bolj podrobna shema hidravličnega modela se nahaja v prilogi B.

5.3 Robni pogoji in Manningov koeficient – n_g

Hidravlični račun sem opravil za nestalni tok. Pri takem toku program HEC-RAS potrebuje zgornji in spodnji robni pogoj. Za spodnji robni pogoj sem uporabil normalni padec vodotoka, ki na obravnavanem odseku znaša $I=0,8\%$. Podatki za zgornji robni pogoj pa se razlikujejo. Kot vhodne podatke sem uporabil podatke o hidrogrameh, ki sem jih izračunal s pomočjo hidrološkega modela. Hidrograme se razlikujejo glede na obliko in količino padavin, ki so padle na povodje Horjulščice. V hidravličnem računu, sem obravnaval hidrograme, ki so nastali za padavine 24-urnega trajanja s 100-letno povratno dobo. Poleg izračunanih hidrogramov pa sem v hidravličnem modelu uporabil še hidrogram, ki sem ga pridobil iz študije Hidrološka presoja visokih vod Gradaščice z upoštevanjem različnih ureditev za zaščito pred škodljivim delovanjem voda na Gradaščici in malem Grabnu (VGI, 2002). Ta hidrogram se bo uporabil za dejansko dimenzioniranje zadrževalnika Brezje, zato sem ga uporabil za primerjavo z mojimi dobljenimi rezultati.

Za točno določitev Manningovega koeficienta hrapavosti moramo dobro poznati faktorje, od katerih je ta koeficient odvisen. Na Manningov koeficient n_g tako najbolj vplivajo hrapavost ostenja, vegetacija, poljubna spremenljivost, ovire, trasa vodotoka, transport plavin, pretok. Da lahko kvalitetno določimo koeficient n_g pa so največkrat potrebne izkušnje. Po ogledu terena in uporabi literature sem tako določil koeficient $n_g = 0,03$ za območje struge vodotoka

in $n_g = 0,1$ za poplavno območje. Vstavljeni faktorja n_g bi bilo potrebno preveriti z umerjanjem. To pa žal v mojem primeru ni bilo možno, saj na tem odseku ne obstajajo meritve višine gladin, ki bi to omogočile.

5.4 Zapornica in izpust vode iz zadrževalnika

Da zadrževalnik lahko učinkovito zadrži vodo in da lahko učinkovito kontroliramo izpust vode zadrževalnik potrebuje zapornico. V tej diplomski nalogi je bila za zadrževalnik Brezje izbrana tablasta kotalna zapornica. Taka zapornica glede na zahteve zadrževalnika najbolj ustreza. Dimenzije zapornice so bile določene s poskušanjem in zahtevo, da 100-letna visoka voda prosto teče skozi odprto zapornico in pri tem ne povzroči prevelike zajeze gorvodno (voda nikoli ne sme preseči kote 332 m n.m.v.). Tako so bile določene dimenzije zapornice 6x4 m, s tem zapornica učinkovito prevaja visoko vodo (priloga F).

Zapornica v kombinaciji z nasipom pri visoki vodi gorvodno ustvari zajezo vode. Da pa zadrževalnik uspešno deluje moramo ustrezno dimenzionirati izpust vode iz zadrževalnika. Toda obravnavani zadrževalnik je samo eden izmed ukrepov, ki bo dolvodno pomagal pri izboljšanju poplavne varnosti. Po pregledu različnih virov in raznih študij sem izvedel, da je maksimalni izpust iz zadrževalnika Brezje ocenjen na približno 20 m³/s. Tak izpust iz zadrževalnika Brezje v kombinaciji z izpustom z zadrževalnika Razori in pa drugimi ukrepi naj ne bi povzročil poplave.

Na izpust vode iz zadrževalnika lahko vpliva veliko stvari. Ob nastopu visoke vode je lahko zadrževalnik prazen, delo poln ali pa celotno zapolnjen. Odvisno je tudi od pričakovanega vremena. Tako so lahko po prvotnih padavinah, ki so povzročile visoke vode pričakovane še druge obilne padavine. Teh vseh možnosti ne moremo obdelati v tej diplomski nalogi, zato sem se omejil samo na nekaj simulacij. Z izborom simulacij sem se poizkusil omejiti na situacije, katere bodo najbolj realne na tem področju. Izbral sem si dve simulaciji, v katerih obravnavam polnjenje praznega zadrževalnika in nato časovno določeno praznjenje.

Praznjenje zadrževalnika poteka v enem primeru 72 ur v drugem pa 48 ur. Ta dva primera sta tudi realno najbolj verjetna, saj je zadrževalnik običajno prazen in se začne polniti samo ob nastopu visoke vode. Čas v katerem zadržujemo vodo v zadrževalniku pa je potreben zato, da

se dolvodno izognemo sovpadanju poplavnih valov. Izbral pa sem si še primer, v katerem je potrebno zadrževalnik čim hitreje prazniti. Edina zahteva pri tem je, da iztok vode iz zadrževalnika nikoli ne sme presegati iztoka $20 \text{ m}^3/\text{s}$.

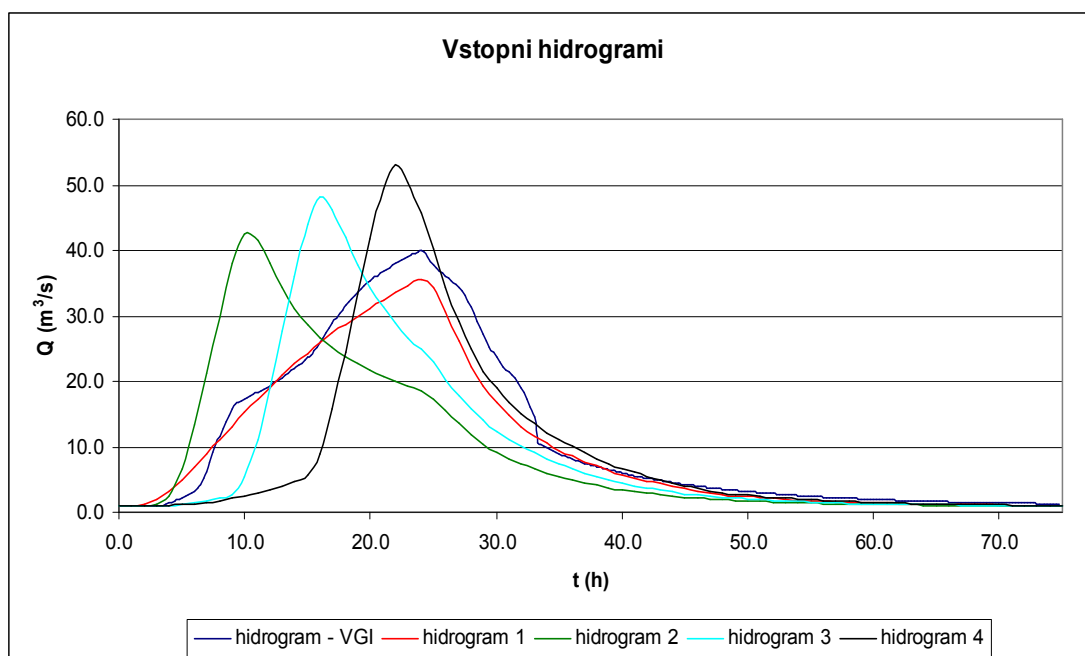
Izbrane simulacije poizkušajo samo ponazoriti dogajanje ob nastopu visoke vode. Vedeti je potrebno, da je vsak nastop visoke vode edinstven pojav, tako da ne moremo vedeti kakšno bo točno delovanje zadrževalnika.

6 Pregled rezultatov

6.1 Rezultati hidrološkega modela

6.1.1 Hidrogram za območje zadrževalnika Brezje

V hidrološkem modelu sem izvedel štiri različne simulacije. Simulacije se razlikujejo glede na uporabljene vhodne podatke (opisano v poglavju 4.3.5.). Vsaka simulacija je dala drugačen izračunani hidrogram, ki so podani v grafu 5.



Graf 5: Izračunani vstopni hidrogrami na področju zadrževalnika Brezje

V grafu se hidrogrami razlikujejo v različnih padavinah. Tako predstavljajo:

- hidrogram -VGI – hidrogram pridobljen iz študije VGI
- hidrogram 1 – padavine razporejene enakomerno po povodjih
- hidrogram 2 – padavine med nevihto – vrh na začetku
- hidrogram 3 – padavine med nevihto – vrh na sredini
- hidrogram 4 – padavine med nevihto – vrh na koncu

Program HEC-HMS izračuna odtok s povodja s pomočjo sintetičnega hidrograma enote. To naredi z eno izmed metod Clark, SCS in Snyder. V mojem primeru nobena izmed teh metod ni dala dobrih rezultatov, zato sem kot izračunani rezultat vzел povprečje teh vseh treh metod (izračunano povprečje med metodami Snyder, Clark in SCS v prilogi E).

Rezultati dobljeni iz hidrološkega modela so v obliki hidrograma za območje, ki nas zanima. Dobljeni hidrogrami se razlikujejo zaradi drugačnih vhodnih podatkov (padavine). Vse dobljene hidrograme pa lahko primerjamo s hidrogramom, ki so ga izdelali v študiji Hidrološka presoja visokih vod Gradaščice z upoštevanjem različnih ureditev za zaščito pred škodljivim delovanjem voda na Gradaščici in malem Grabnu. Ta hidrogram naj bi predstavljal realni hidrogram za območje zadrževalnika Brezje. Vidi se lahko, da hidrogram, v katerem sem uporabil enakomerne padavine sledi obliki hidrograma VGI. Ostali hidrogrami so drugačni, saj so uporabljene drugačne oblike padavin (drugačen histogram - nevihta). Opazimo lahko tudi da ima poplavni val hidrograma VGI večji volumen, kot vsi dobljeni hidrogrami. To je verjetno posledica tega, da so bile uporabljene večje količine padavin. Na splošno lahko trdimo, da je hidrogram z enakomernimi padavinami realen. Ostali dobljeni hidrogrami pa žal niso najboljši. To je posledica uporabljenih padavin. Za bolj točen potek hidrogramov, bi bilo potrebno izvesti bolj natančno analizo padavin. Čeprav vsi hidrogrami niso točni bodo dali vsaj neko sliko dogajanja ob nastopu visoke vode.

6.1.2 Prostornina in maksimalni pretok vode

Zanimalo me je kakšna prostornina in maksimalni pretok vode pride do zadrževalnika Brezje. Prostornina in maksimalni pretok se spreminjata glede na padavine, ki sem jih uporabil v hidrološkem modelu. Rezultati so podani v tabeli:

Preglednica 6: Podatki o izračunanih hidrogramih

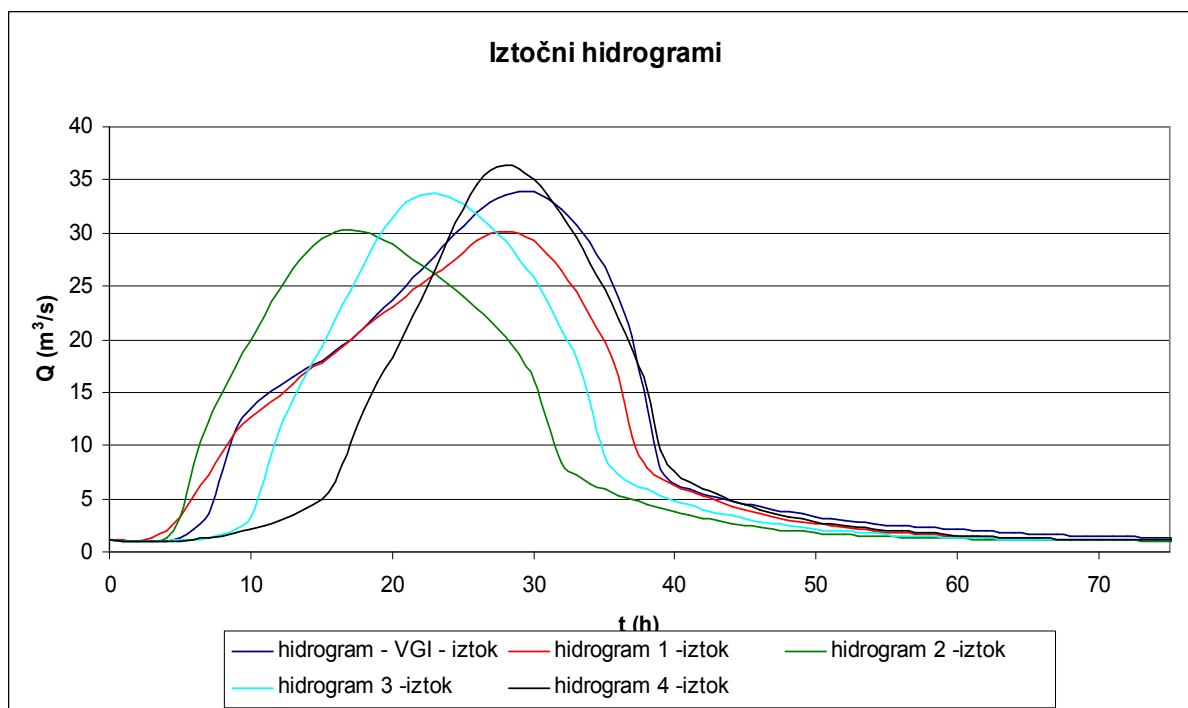
podatki	hidrogram -VGI	hidrogram 1	hidrogram 2	hidrogram 3	hidrogram 4
V (1000 m ³)	2829,0	2490,2	2302,9	2302,9	2302,9
Q (m ³ /s)	38,9	35,47	40,92	48,07	53,00
čas vrha (h)	24	24	10	16	22

Vidi se lahko, da se v rezultatih spreminja prostornina vode, ki je za mojo simulacijo najbolj pomembna. Trdim lahko, da je različna prostornina posledica različnih uporabljenih količin padavin. Čas nastopa vrha in maksimalni pretok se v prvih dveh primerih ne spremenita bistveno. Drugače pa je v preostalih treh primerih. Čas nastopa vrha se spreminja zaradi časa nastopa maksimalnih padavin. Prej pride v nevihti do maksimalnih padavin, prej nastopi vrh hidrograma. Maksimalni pretoki pa naraščajo z vsakim primerom nevihte (hidrogram 2, hidrogram 3, hidrogram 4), zato ker je zemljina vedno bolj mokra in zato s kasnejšimi maksimalnimi padavinami pride do večjega odtoka vode v strugo. Ocenjeni volumen zadrževalnika Brezje naj bi bil nekje do 2,2 mio. m³ vode. Iz dobljenih rezultatov vidimo, da lahko v zadrževalniku Brezje zadržimo skoraj celotni visokovodni val. To v primeru, ko imamo nevihto na povodju pomeni celo 95% vse vode v poplavnem valu. Najmanjši procent zadržane vode v zadrževalniku je, če uporabljamo hidrogram pridobljen iz študije VGI -ja. Vendar tudi v tem primeru se lahko v zadrževalniku zadrži skoraj 80% vode.

6.2 Rezultati hidravličnega modela

6.2.1 Primerjava vtočnega in iztočnega hidrograma brez urejenega zadrževalnika

Na območju zadrževalnika Brezje ob močnih padavinah voda pogosto prestopi bregove. Ker to območje že s svojimi značilnostimi predstavlja naravni zadrževalni prostor se poplavni val na tem prostoru spremeni zaradi razlivanja vode po obravnavanem območju. Pričakovati je, da se bo konični pretok zato zmanjšal. Narejen je graf iztočnih hidrogramov na trenutnih razmerah na odseku zadrževalnika Brezje za vse primere, ko na povodje padajo enakomerne padavine in vse primere neviht. Prav tako je podan primer za podatke hidrograma iz študije VGI.



Graf 6: Iztočni hidrogrami z obravnavanega področja

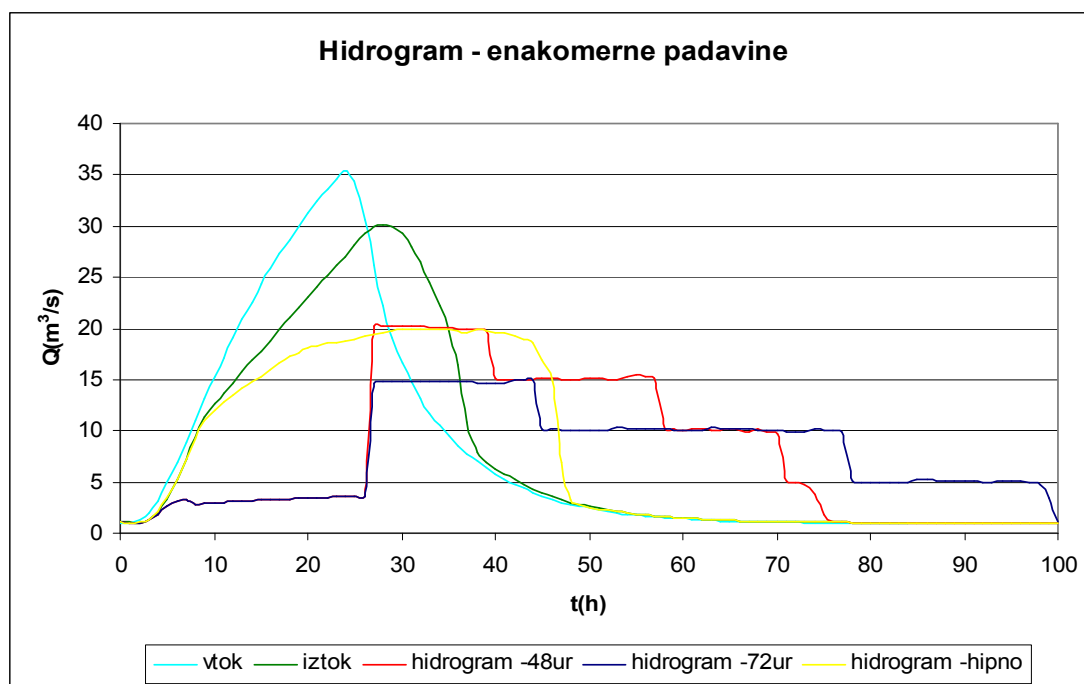
Primerjava grafa 5 z grafom 6 pove, da že samo razlitje vode na območju zadrževalnika Brezje zmanjša in spremeni poplavni val. Ugotovimo lahko, da se maksimalni pretoki zmanjšajo, spremeni pa se tudi čas nastopa maksimalnega pretoka. Vendar pa lahko ugotovimo, da so vsi pretoki na izhodnem hidrogramu večji od $20 \text{ m}^3/\text{s}$. To pomeni, da moramo iztočni hidrogram še spremeniti, saj je bilo že v prejšnjih projektih ugotovljeno, da lahko po Horjulščici od zadrževalnika Brezje naprej teče tok velik največ $20 \text{ m}^3/\text{s}$.

6.2.2 Primerjava vtočnega in iztočnega hidrograma z urejenim zadrževalnikom

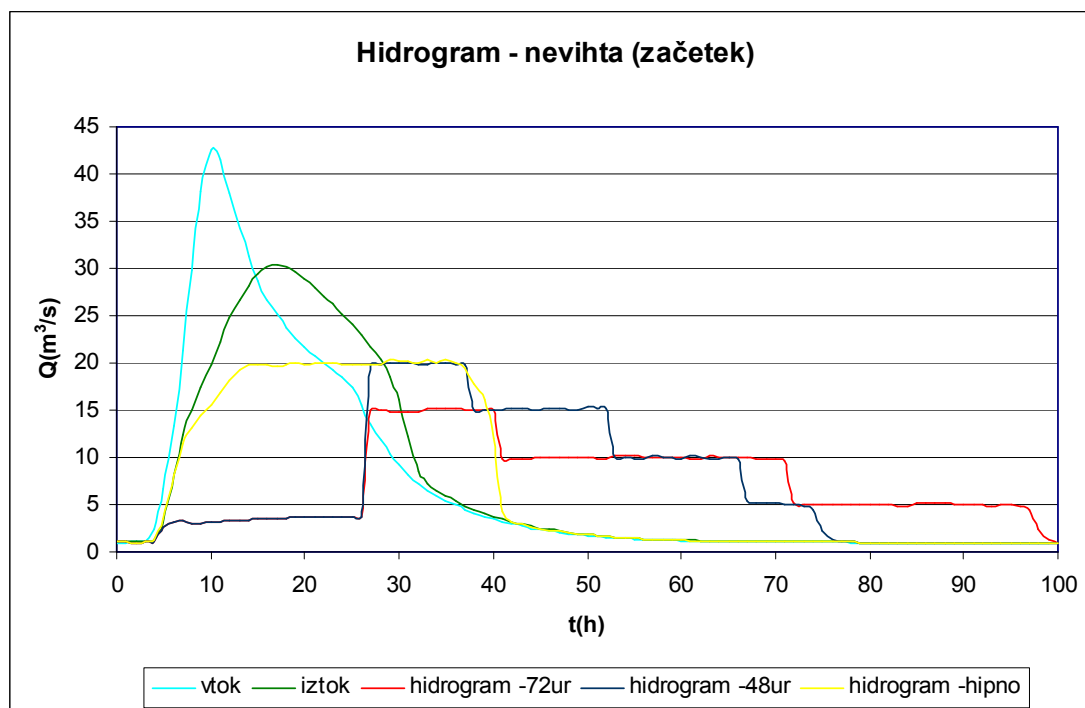
Z ureditvijo zadrževalnika na obravnavanem območju lahko izboljšamo odtočne razmere. Tako sem s tremi simulacijami poizkušal preučiti delovanje zadrževalnika ob nastopu visoke vode. Že iz računa prostornine padlih padavin se lahko vidi, da je na območju zadrževalnika Brezje zadosti prostora za prestrezanje poplavnega vala. Določiti pa je bilo potrebno pravilno odpiranje in delovanje zapornice. Tako so bili v programu HEC-RAS izvedene sledeče tri simulacije:

- a) Simulacija 1 – zadrževalnik je prazen, ob nastopu visoke vode se začne polniti, ko je zadrževalnik poln, ga začnemo prazniti, praznenje traja 72 ur;
- b) Simulacija 2 – zadrževalnik je prazen, ob nastopu visoke vode se začne polniti, ko je zadrževalnik poln, ga začnemo prazniti, praznenje traja 48 ur;
- c) Simulacija 3 – zadrževalnik je prazen, ob nastopu visoke vode se začne polniti, vode ne zadržujemo ampak jo čim hitreje odvajamo skozi zapornico, zapornica se odpira tako, da ves čas spušča pretok do $20 \text{ m}^3/\text{s}$. Tako je izpolnjena zahteva, da pretok $20 \text{ m}^3/\text{s}$ ni presežen, zadrževalnik pa je poplavljen najmanj časa.

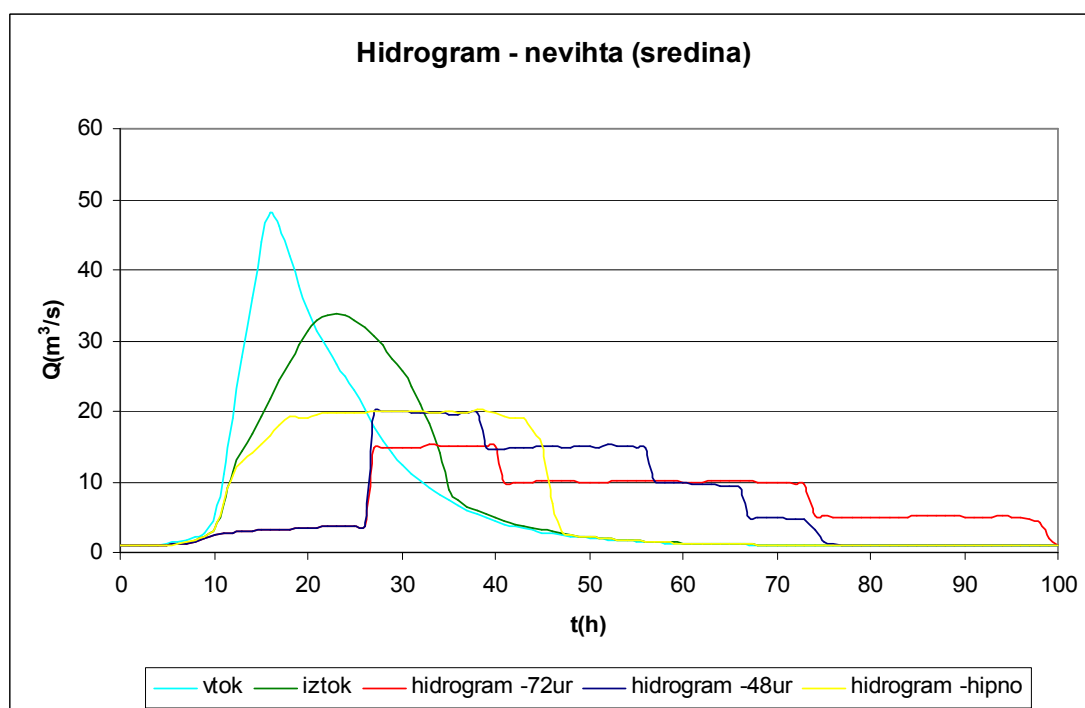
Zapornica na zadrževalniku deluje tako, da se ob nastopu visoke vode začne zapirati in s tem preprečuje prosto pot vodi. Z višanjem gladine v zadrževalniku se na iztoku izpod zapornice večja pretok zaradi vse večje energije, ki jo ima voda. Zato, da uravnavamo pretok moramo še zapirati zapornico. Ob praznjenju zadrževalnika pa imamo obratno zgodbo. Zaradi vse nižje gladine vode v zadrževalniku in vse manjše razlike v energijah, moramo vedno bolj odpirati zapornico, da ohranjamo željen iztok. Delovanje zapornice (višina odprtine) za vsak posamezni primer je podana v prilogi F.



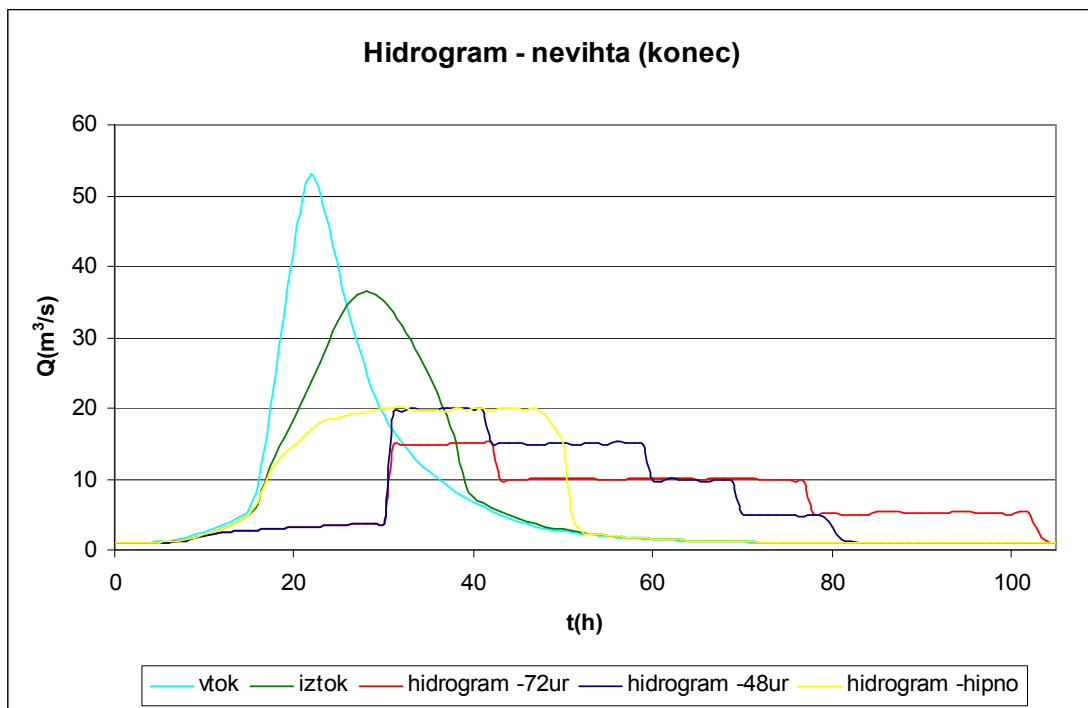
Graf 7: Primerjava hidrograma brez urejenega zadrževalnika in z urejenim zadrževalnikom – primer 1



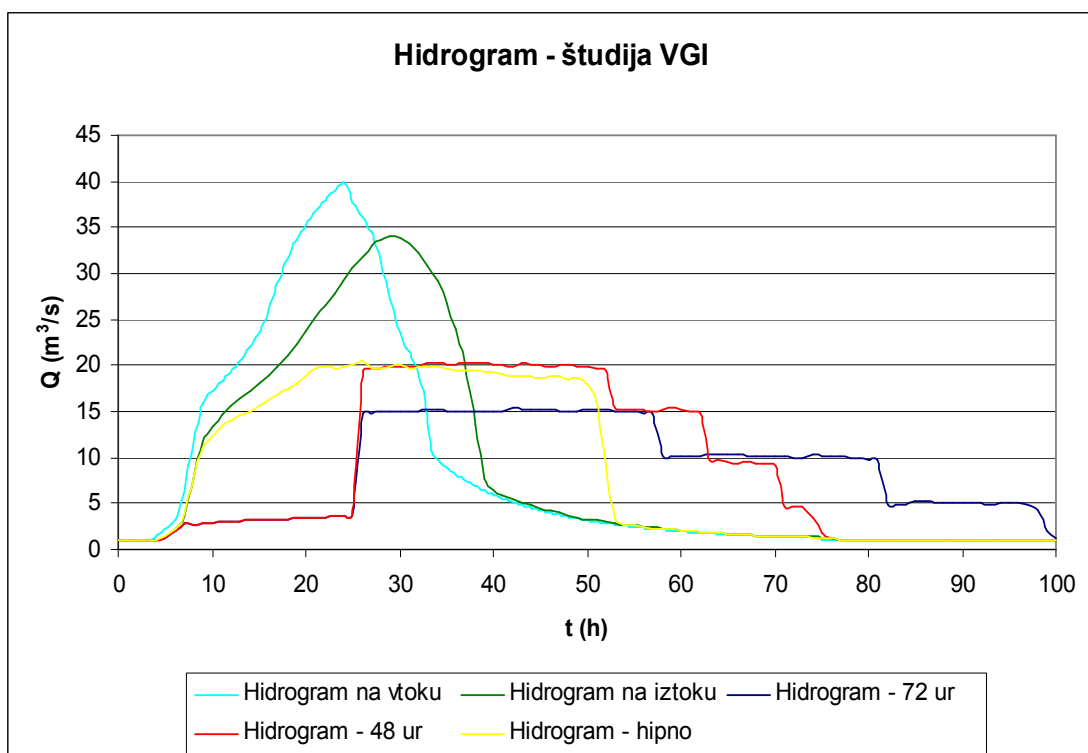
Graf 8: Primerjava hidrograma brez urejenega zadrževalnika in z urejenim zadrževalnikom – primer 2



Graf 9: Primerjava hidrograma brez urejenega zadrževalnika in z urejenim zadrževalnikom – primer 3



Graf 10: Primerjava hidrograma brez urejenega zadrževalnika in z urejenim zadrževalnikom – primer 4

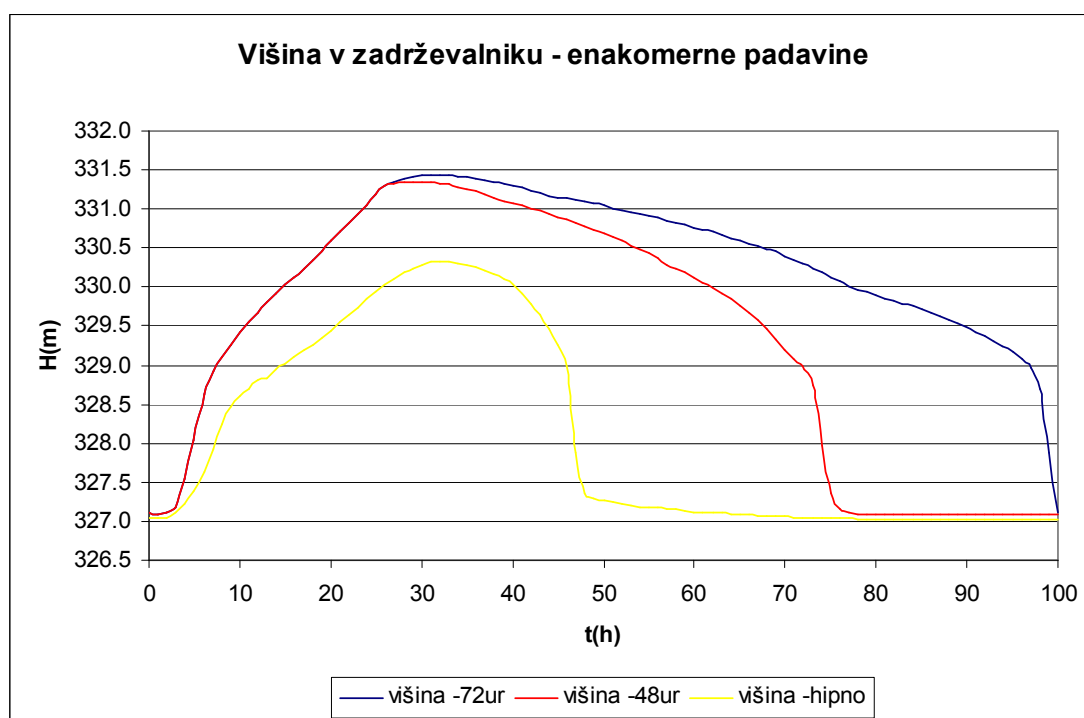


Graf 11: Primerjava hidrograma brez urejenega zadrževalnika in z urejenim zadrževalnikom – primer 5

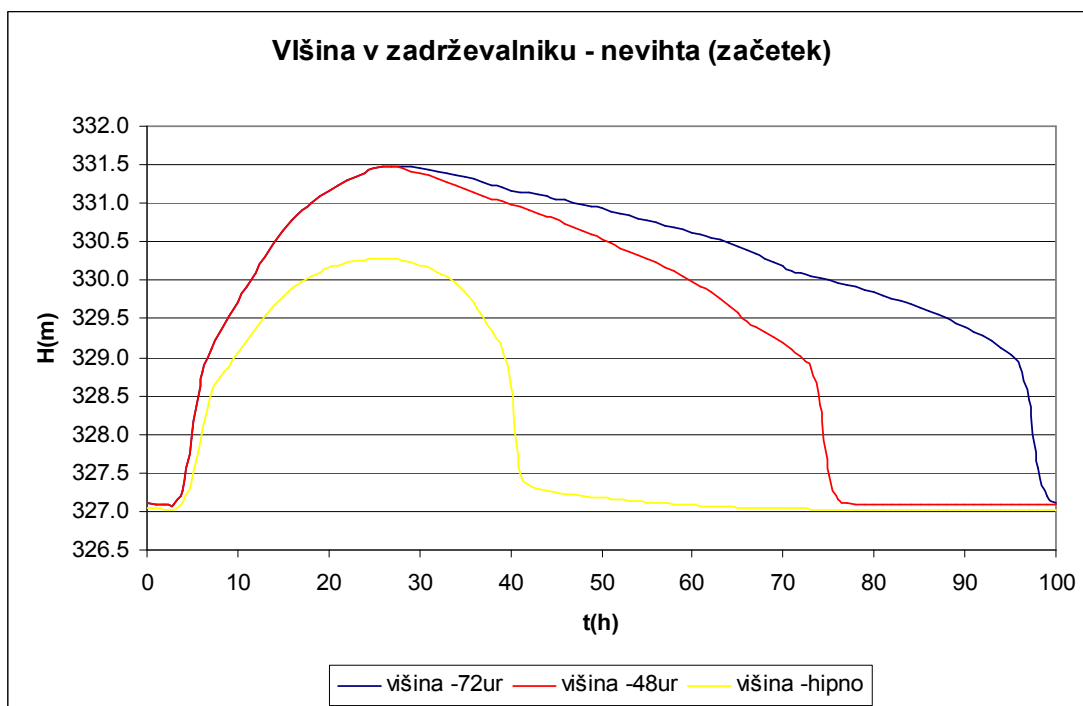
V hidravličnem modelu sem obravnaval bolj natančno dogajanje na območju zadrževalnika Brezje. Z dobljenimi rezultati sem poizkušal prikazati spremembo hidrograma ob nastopu visoke vode, če je na območju zgrajen zadrževalnik, ali pa ga ni. Kot vidimo iz grafov 6 do 11, se poplavni val na območju spremeni, ne glede na to ali je zgrajen zadrževalnik ali ne. Vendar pa če zadrževalnik ni zgrajen, je iztok vode iz območja prevelik in ogroža dolvodna območja. Kadar pa imamo zadrževalnik, je v vseh primerih poplavni val uspešno zadržan na območju. To pomeni, da je zadrževalnik zadosti velik, da lahko uspešno zadrži poplavni val. Odtok iz območja zadrževalnika Brezje se spreminja glede na to kako obratuje zapornica. Odtok vode iz zadrževalnika tako podaljšamo z manjšim izpuščenim pretokom izpod zapornice.

6.2.3 Višina vode v urejenem zadrževalniku

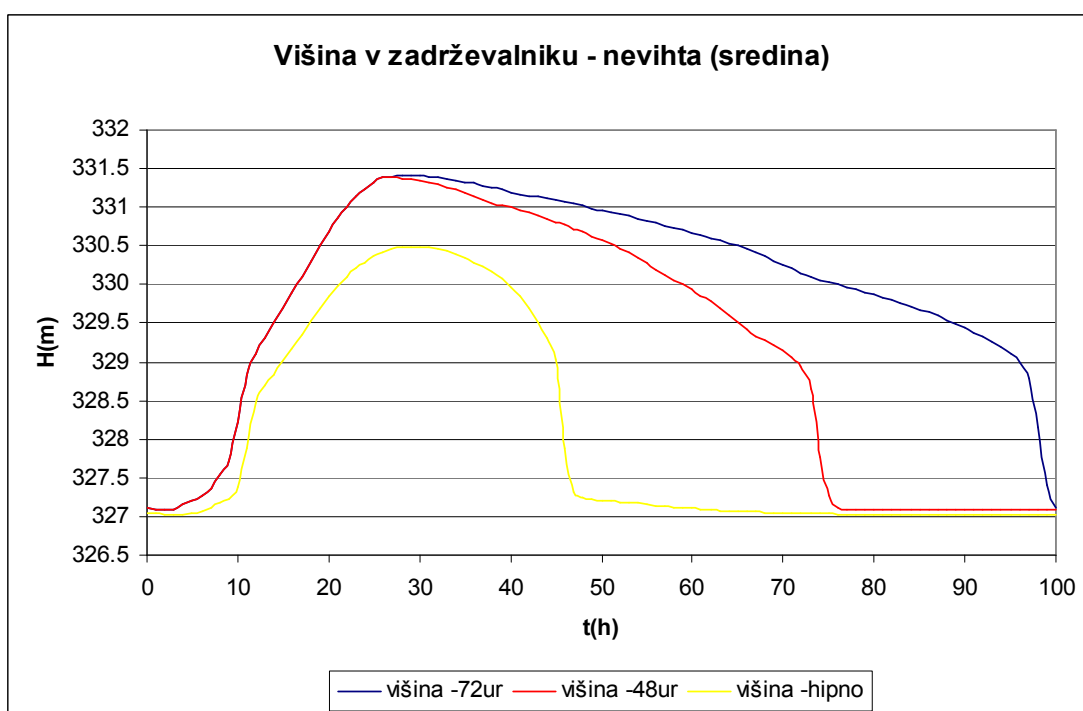
Pripravil pa sem tudi grafe spreminjanja višine vode v zadrževalniku. Pri tem moramo vedeti, da je bilo že v prej narejenih študijah ugotovljeno, da višina vode v zadrževalniku ne bi smela doseči nadmorske višine 332 m. Ugotovljeno pa je bilo tudi, da bi pri 100-letni visoki vodi gladina v zadrževalniku segala nekje do 331,7 m nadmorske višine (IZV, 2002). Zopet so rezultati podani že za prej omenjene simulacije.



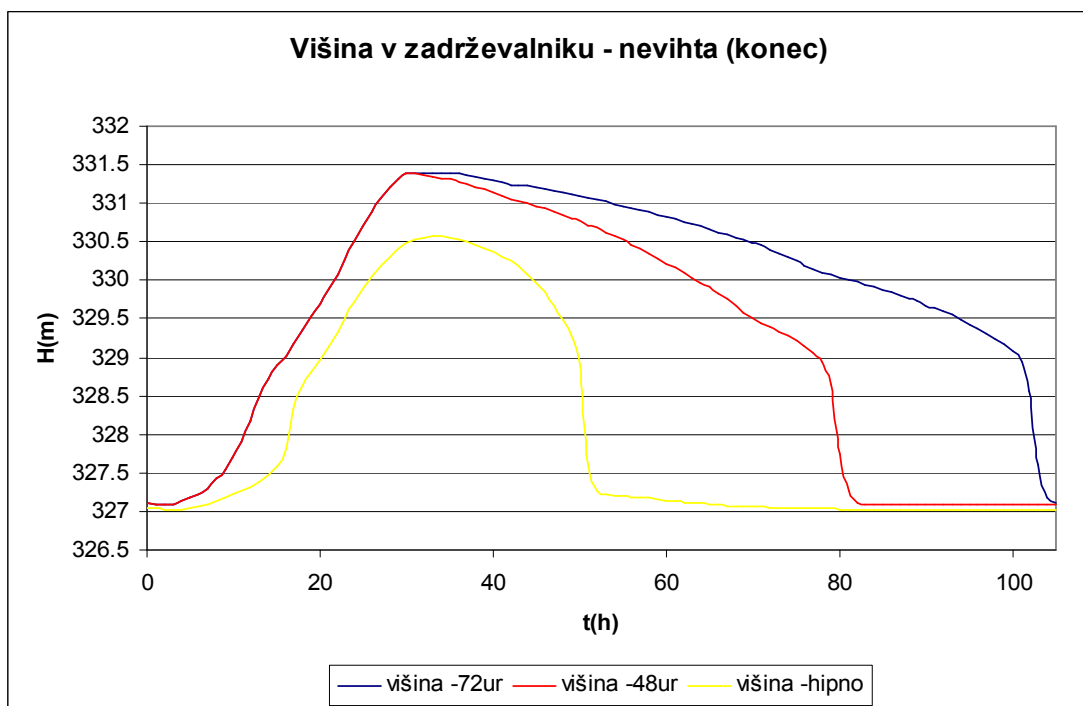
Graf 12: Višina vode v zadrževalniku – primer 1



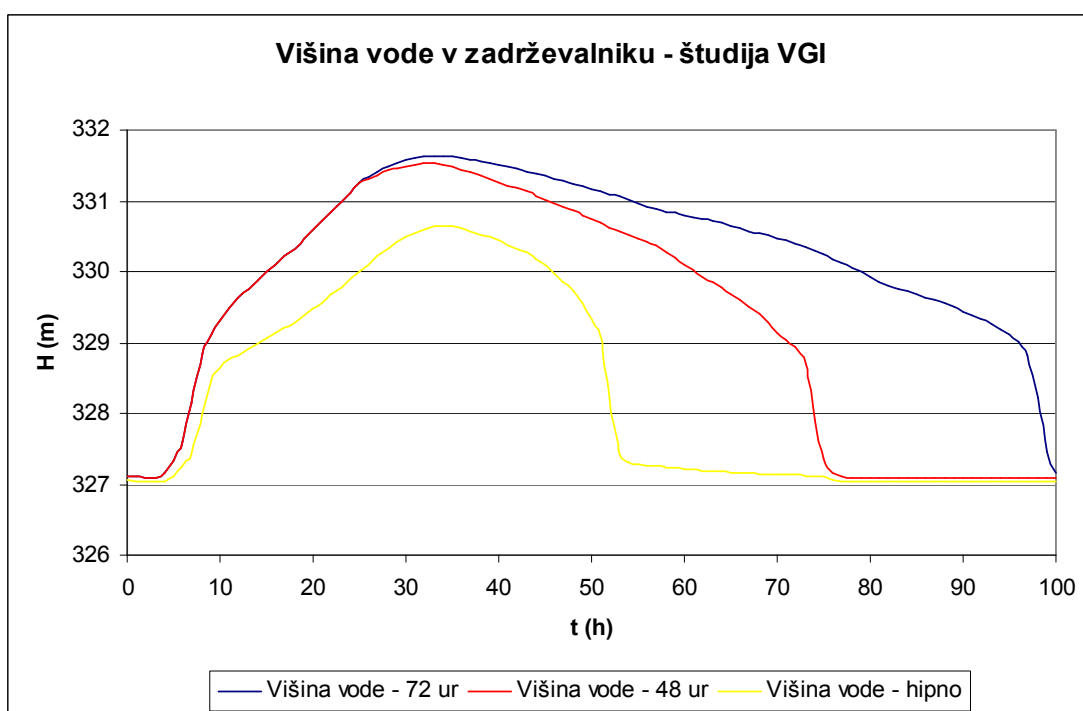
Graf 13: Višina vode v zadrževalniku - primer 2



Graf 14: Višina vode v zadrževalniku - primer 3



Graf 15: Višina vode v zadrževalniku – primer 4



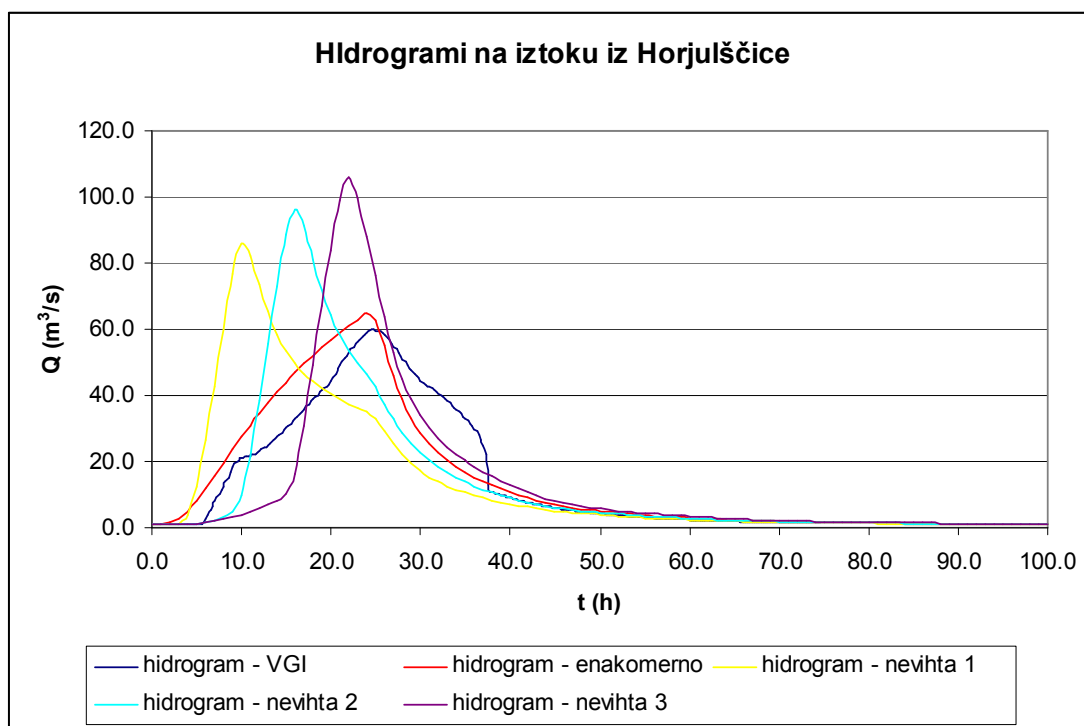
Graf 16: Višina vode v zadrževalniku - primer 5

Iz rezultatov je razvidno, da višina vode v zadrževalniku nikoli ne doseže kritične višine. Zato lahko tudi trdimo, da so prej omenjene simulacije dobro izbrane in se zadrževalnik tudi

zadosti časa polni. Če bi bila višina vode previsoka, bi to lahko preprečili tako, da bi že prej povečali iztok skozi zapornico.

6.3 Združitev hidrološkega in hidravličnega modela

Vsi prejšnji rezultati so se nanašali na dogajanje na območju zadrževalnika Brezje. Tukaj pa si poglejmo, kako vpliva zadrževalnik Brezje na hidrogram na iztoku iz Horjulščice. Tega problema sem se lotil tako, da sem združil hidrološki in hidravlični model in tako dobil rezultate. Rezultati so podani za vse padavinske primere. Najprej pa si v grafu poglejmo, kako se razlikujejo hidrogrami na iztoku glede na posamezno izvedeno simulacijo.



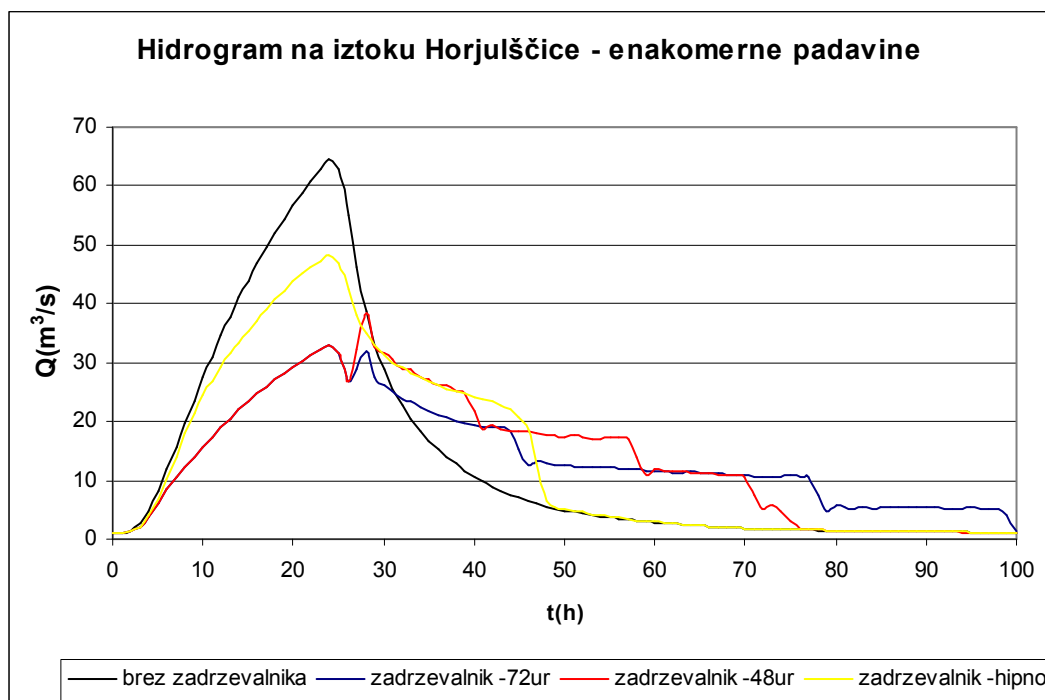
Graf 17: Hidrogrami reke Horjulščice na sotočju z reko Gradaščico

Iz grafa je razvidno, da se hidrogrami na iztoku zelo razlikujejo glede na različne simulacije. Najbolj realen hidrogram je vsekakor hidrogram pridobljen iz študije VGI-ja. Temu hidrogramu se najbolj približa hidrogram enakomerno, v katerem predvidevam, da so padavine po povodju razporejene enakomerno. Vsi ostali hidrogrami nevihte ne dajejo dobrih rezultatov. Vsi ti hidrogrami imajo prevelike konične odtokove in zaradi sovpadanja odtokov s posameznih podpovodji imajo vsi ti hidrogrami prestrmo rast in padec. To je posledica

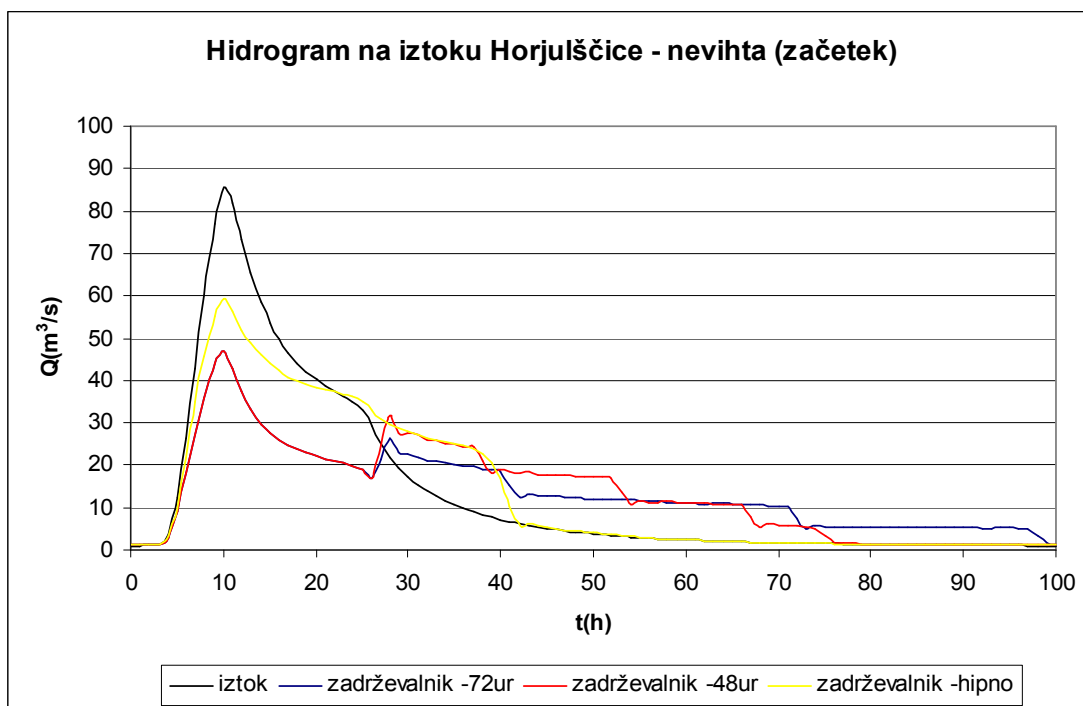
histograma padavin, ki sem ga uporabil na povodju. Realno bi na celotno povodje padlo manj padavin in bi bile porazdeljene drugače, zato bi bili tudi hidrogrami drugačni (manjša konica, daljše trajanje odtoka). Poglejmo še glavne karakteristike hidrogramov:

Preglednica 7: Podatki o izračunanih iztočnih hidrogramih

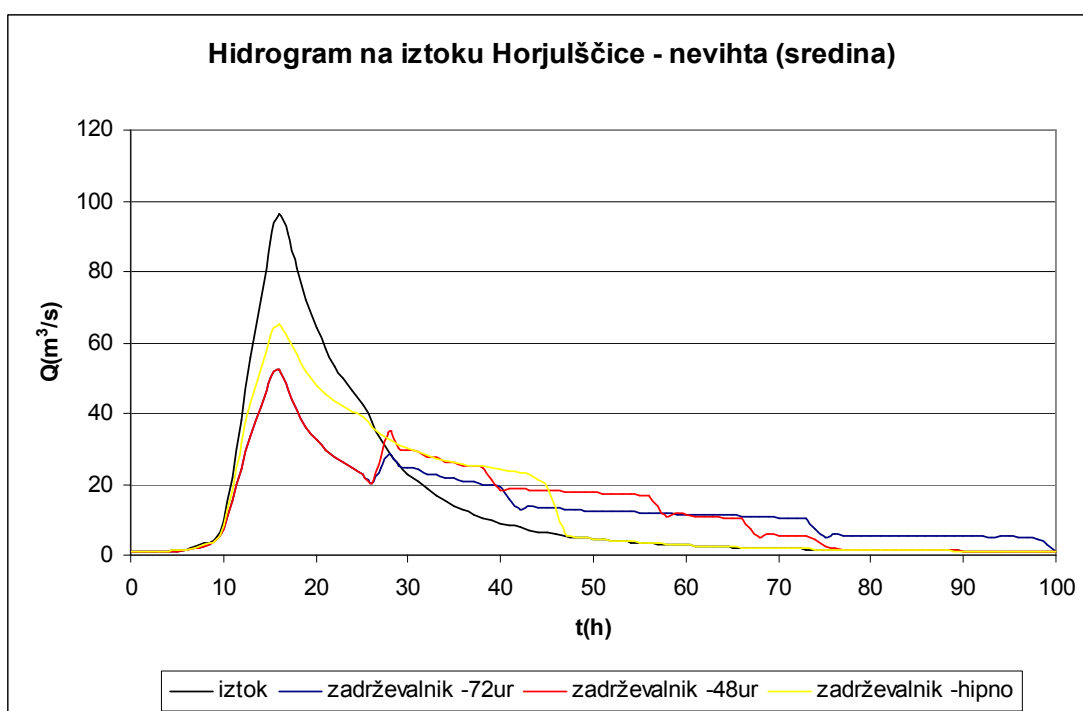
podatki	hidrogram - VGI	hidrogram 1	hidrogram 2	hidrogram 3	hidrogram 4
Q (m ³ /s)	58,9	64,60	85,73	96,73	105,87
V (1000m ³)	4456,0	4735,5	5076,3	5076,3	5076,3
čas vrha (h)	24	24	10	16	22



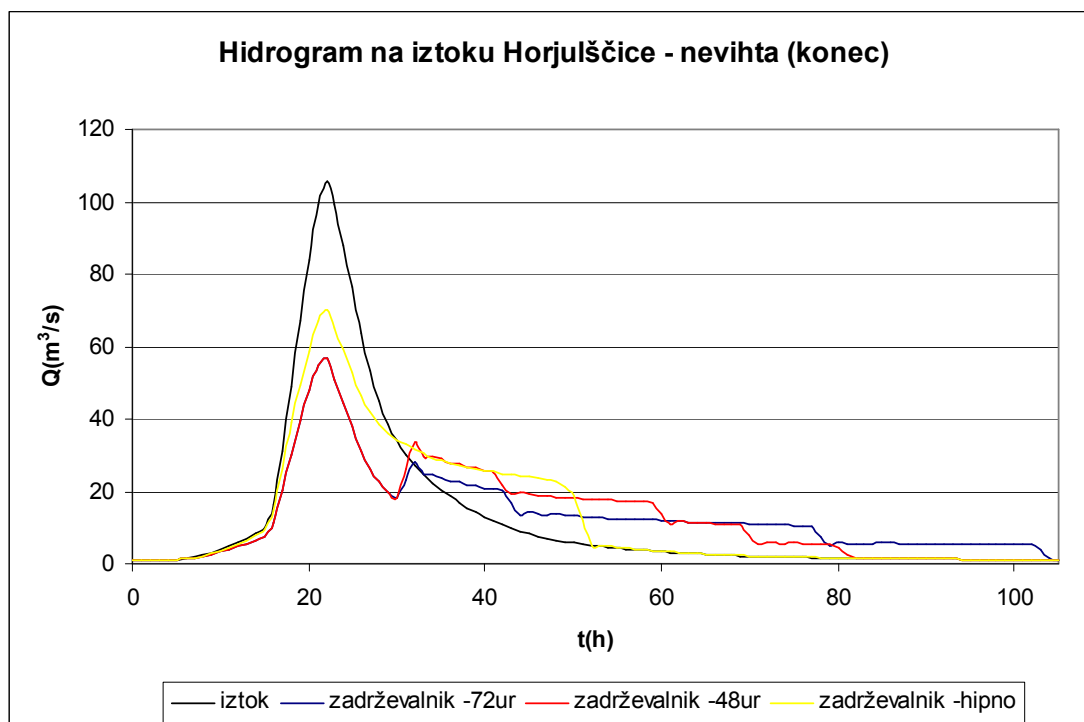
Graf 18: Odtok s povodja Horjulščice - primer 1



Graf 19: Odtok s povodja Horjulščice - primer 2



Graf 20: Odtok s povodja Horjulščice - primer 3



Graf 21: Odtok s povodja Horjulščice - primer 4

Iz grafov je razvidno, da bi izgradnja zadrževalnika zelo vplivala na hidrogram iztoka na reki Horjulščici. V vseh primerih se konični pretok bistveno zmanjša, v nekaterih primerih tudi za 50%. Vendar pa niso vsi rezultati dobri. Primeri (grafi od 19 do 21) niso dobri, saj so končni pretoki preveliki. Najboljši in najbolj realen graf je tako graf 18. Vendar je tudi v tem primeru razvidno, da zadrževalnik zelo ugodno vpliva na visoko vodo na reki Horjulščici. To pomeni, da lahko z izgradnjo zadrževalnika bistveno izboljšamo razmere dolvodno na reki Horjulščici.

6.4 Komentar rezultatov

Običajno se dobljeni rezultati iz hidravličnih in hidroloških modelov umerjajo na že neke prej izmerjene podatke. V mojem primeru to zaradi pomanjkanja že izmerjenih podatkov žal ni bilo mogoče. Za dobljene rezultate iz hidrološkega in hidravličnega modela potrebujemo kritično presojo. Le to lahko pove ali sem dobil smiselne rezultate ali pa je rezultate potrebno popraviti.

Rezultati iz mojega hidrološkega modela povejo, da skozi območje zadrževalnika Brezje teče približno 55% vode, če pa upoštevamo študijo VGI pa celo 63%. Konični pretoki na območju

zadrževalnika Brezje se gibljejo med $35 \text{ m}^3/\text{s}$ do $53 \text{ m}^3/\text{s}$, odvisno od tega kakšne vhodne podatke sem uporabil. Vhodni podatki (padavine) pa so tudi največja neznanka. Boljši vhodni podatki bi dali tudi boljše rezultate, vendar pa je določitev histograma padavin zelo težavna naloga. Lotimo se je lahko le, če imamo zadosti podatkov o predhodnih padavinah za obravnavano območje. Vendar tudi s temi podatki ne moremo zagotovo vedeti, da smo določili pravilen histogram padavin. Zato se moramo problema lotiti bolj inženirsko. Vpeljati moramo določene predpostavke, ki nam omogočajo lažjo rešitev problema. S predpostavko o enakomernih padavinah po povodju in nevihto z določenim trajanjem sem tako uspel pridobiti hidrogram reke Horjulščice. Rezultati za enakomerne padavine na povodju dajejo presenetljivo dobre rezultate in bi se jih po mojem mnenju dalo uporabiti, saj se bistveno ne razlikujejo od hidrogramov iz študije VGI. Iz drugih rezultatov in primerjavo hidrogramov pa je razvidno, da hidrogrami nevihte niso določeni dovolj dobro. Hidrogrami dajejo prevelike konične pretoke in odtok traja premalo časa. Vse to je posledica nepravilno uporabljenih padavin. Glede na to, da sem za določitev uporabljenih padavin uporabil vgrajeno funkcijo v HEC-HMS-ju lahko trdim, da za moje povodje ta funkcija ne ustreza. Zanimivo je tudi, da sem z bolj enostavno predpostavko (enakomerne padavine na povodju) uspel dobiti boljše rezultat, kot z verjetno precej bolj komplicirano vgrajeno formulo v programu HEC-HMS.

Hidrogram Horjulščice sem uporabil naprej v hidravličnem modelu. Hidravlični model je seveda modeliran z določenimi poenostavitvami (geometrija, manningovi koeficienti,..), vendar vseeno zadosti dober, da ga lahko uporabimo za nadaljni izračun. Ključni problem v hidravličnem modelu predstavlja zapornica. Zadrževalniki na povodju Gradaščice bi morali delovati sinhronizirano. Ker pa sem obravnaval samo dogajanje na reki Horjulščici žal nisem mogel upoštevati zadrževalnikov na reki Gradaščici. S tem bi se manevri zapornice na zadrževalniku Brezje verjetno malo spremenili. Kako bi ti to vplivalo na iztočni hidrogram iz reke Horjulščice ne morem vedeti. Potrebno bi bilo narediti model, ki bi vključeval vse zadrževalnike in celotni problem poplav na Gradaščici pogledati skupaj.

Vseeno pa bi bilo delovanje zadrževalnika podobno eni izmed opravljenih simulacij. Da bi začeli zadrževalnik prazniti preden je zapolnil svojo kapaciteto bi bilo nesmiselno. Smiselno bi bilo le v primeru, kadar bi se pričakovale še nadaljne močne padavine ali pa bi poplavni val na reki Gradaščici že začel upadati. Zato menim, da opravljene simulacije dobro predstavijo delovanje zadrževalnika Brezje.

Iztok iz povodja Horjulščice se z izgradnjo zadrževalnika bistveno spremeni. Zadrževalnik spremeni in prepreči sovpadanje poplavnih valov. Tako je na vseh hidrogramih (grafi od 17 do 20) opazen še drugi manjši vrh, ki predstavlja izpust vode iz zadrževalnika. Vodo bi iz zadrževalnika lahko spuščali tudi bolj postopoma, tako da ne bi bilo tako opaznega vrha, vendar bi bilo potem zadrževanje vode v zadrževalniku bistveno daljše (območje zadrževanja vode v zadrževalniku – priloga G). Sam konični odtok iz povodja Horjulščice lahko z izgradnjo zadrževalnika zmanjšamo za približno 50%. S tem lahko bistveno spremenimo odtočne razmere dolvodno od sotočja z Gradaščico, saj preprečimo sovpadanje poplavnih valov reke Horjulščice in reke Gradaščice. Z izgradnjo zadrževalnika pa bi se izboljšale tudi razmere na reki Horjulščici dolvodno od zadrževalnika. Zadrževalnik bi preprečil preveliko razlivanje vode po okolici reke Horjulščice.

Glede na vse te ugotovitve lahko trdim, da je vpliv zadrževalnika Brezje na visoke vode ugoden. Z izgradnjo zadrževalnika Brezje na izbrani lokaciji, kjer ob nastopu visoke vode vedno privede do poplav, bi se lahko uspešno manjšal poplavni val na reki Horjulščici. Polnjenje zadrževalnika ob poplavah tudi ne bi ogrožalo stanovanjskih in gospodarskih objektov, saj jih na obravnavanem območju ni. Mogoče bi se poškodovala infrastruktura, ki je na območju zadrževalnika, vendar ob nastopu katastrofalne poplave vsega ne moremo zaščititi. Velikost zadrževalnika je tudi zadosti velika, saj lahko v zadrževalniku zadržimo skoraj cel poplavni val s 100-letno poplavno dobo. Zadrževalnik bi bil po mojih izračunih ob nastopu 100-letne visoke vode poplavljen nekje do 100 ur. Izgradnja zadrževalnika bi zato bistveno vplivala na odtočne razmere na reki Horjulščici in bi bistveno izboljšala poplavno varnost na reki Horjulščici in dolvodno od sotočja z reko Gradaščico.

7 Zaključek

Območje Ljubljane ob reki Gradaščici je eno najbolj poplavno ogroženih področij v Republiki Sloveniji. Zato naj bi se v prihodnosti izvajalo več protipoplavnih ukrepov, ki naj bi zmanjšali poplavno ogroženost območja. Eden izmed teh ukrepov naj bi bil izgradnja zadrževalnika Brezje na največjem pritoku Gradaščice reki Horjulščici oz. Šujici. Zadrževalnik Brezje naj ne bi bil zgrajen zato, da bi malo izboljšal razmere na reki Horjulščici, ampak pa zato, da bi izboljšal in preprečil sovpadanje poplavnih valov na reki Gradaščici. Tako bi izgradnja zadrževalnika omogočila daljše zadrževanje vode in zmanjšanje koničnih pretokov.

V tej diplomski nalogi sem poizkusil z izdelavo hidrološkega in hidravličnega modela simulirati dogajanje na reki Horjulščici brez in z zadrževalnikom Brezje. V hidrološkem modelu sem se ukvarjal predvsem z izračunom hidrogramov, ki nastanejo kot posledica površinskega odtoka pri nastopu 100-letnih padavin. Pri tem mi je največ težav povzročalo določanje histograma padavin, ki se potrebuje kot vhodni podatek za hidrološki model. Vendar tudi dobljeni hidrogrami s pomočjo posameznih metod (Clark, SCS in Snyder) v programu HEC-HMS niso bili najbolj realni. Tako sem se odločil, da združim hidrograme dobljene po metodah Clark, SCS in Snyder ter vzame povprečno vrednost. Tako dobljeni rezultati so dali dokaj realno sliko dogajanja na povodju (primer, ko so uporabljene enakomerne padavine).

Z izdelavo hidravličnega modela sem se omejil na območje zadrževalnika Brezje. Z simulacijo nestalnega toka sem za hidrograme dobljene iz hidrološkega modela določil pretoke in višine vode na obravnavanem območju. Ugotovil sem, da se voda na tem področju tudi brez zadrževalnika razlije in tako zmanjša poplavni val, vendar pa ne zadosti. Z izgradnjo zadrževalnika bi se razmere bistveno izboljšale. Vendar pa mi je težavo povzročala določitev manevra zapornice, ki bi zadrževala vodo. Zadrževalnik Brezje bi bil eden izmed treh zadrževalnikov, ki bi delovali na povodju Gradaščice, zato bi moral za določitev pravih manevrov zapornice določiti delovanje vseh zadrževalnikov. Dobljeni podatki pa so vseeno dovolj točni, da podajo neko sliko dogajanja na reki Horjulščici. Ugotovljeno je bilo tudi, da je za vse primere poplavnega vala pri 100-letni visoki vodi zadrževalnik tudi zadosti velik.

V zadnjem delu sem poizkušal analizirati kako izgradnja zadrževalnika vpliva na iztok reke Horjulščice v reko Gradaščico. Zadrževalnik bistveno izboljša razmere in v določenih primerih konični pretok zmanjša celo za 50%. Vendar pa vsi moji izračunani primeri žal niso dobri in zahtevajo kritično presojo. V vseh preračunanih primerih pa izgradnja zadrževalnika Brezje vseeno privede do zmanjšanja koničnega pretoka in s tem zamaknjenost poplavnega vala. To pa zelo dobro vpliva na povečanje poplavne varnost ob reki Gradaščici.

Območje reke Gradaščice predstavlja zelo poplavno ogroženo območje v Republiki Sloveniji. Izgradnja zadrževalnika Brezje bi pri povečanju poplavne varnosti na tem območju vsekakor pomagala, vendar pa zaenkrat še ni jasno kdaj in če se bo zadrževalnik Brezje uredil.

VIRI:

Anzeljc. D., Burja. D., Muck. P., Zupančič. B. 1995. Poplavna ogroženost Slovenije. Ujma – številka 9, Ljubljana

ARSO. 100-letna povratna doba 24-urnih padavin obdobje: 1961-2000.

<http://www.arso.gov.si/vreme/podnebje/karte/karta4023.html> (15.6. 2007)

Brilly, M., Mikoš, M., Šraj, M. 1999. Vodne ujme – varstvo pred poplavami, erozijo in plazovi. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo; 186 str.

Brilly, M., Šraj, M. 2000, Osnove hidrologije. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo; 234 str.

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

HEC-RAS Online Help. Boss International

http://www.bossintl.com/online_help/HEC-RAS/source/introduction4.htm

Aquaterra. CGs

<http://www.cgsplus.si> (14.5.2007)

HEC-RAS 4.0 Beta – Users manual. 2006. Us Army Corps of Engineers

HEC-HMS 3.1.0. – Users manual. 2006. Us Army Corps of Engineers

IzVRS. 2005. Gradivo za pridobitev dodatnih smernic za izdelavo DLN za zagotavljanje poplavne varnosti jugozahodnega dela Ljubljane. Ljubljana

IZV. 2002. Presoja hidravličnih razmer na poplavnih območjih Malega grabna pri visokih vodah. Ljubljana

Mikoš, M. 2000. Urejanje vodotokov. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo; 182 str.

MOP. 2006. Poročila o vplivih na okolje za zagotavljanje poplavne varnosti jugozahodnega dela Ljubljane. Ljubljana

MOP. 2003. Vodno bogastvo Slovenije. Ljubljana

Plut, D., Lenarčič, M. 1995. Vode v Sloveniji. Ljubljana, str. 205

PUH. 1995. Pogubna razigranost. Podjetje za urejanje hudournikov, Ljubljana, str. 276

Poplavna območja v Sloveniji. Zveza geografskih društev Slovenije,
<http://www.zrc-sazu.si/Zgds/1-6-06.htm> (15.4. 2007)

Povzetek načrta zaščite in reševanja ob poplavah. Uprava Republike Slovenije za zaščito in reševanje,
<http://www.sos112.si/slo/page.php?src=na13.htm> (15.4. 2007)

Reševanje ob poplavah. Občina Brezovica
<http://www.brezovica.si/novice/default.asp?Ident=4695&pogled=2&kat=3> (15.4.2007)

Rojnik, A. 2006. Ureditev Selške Sore od Dermotovega jezua do Dolenčevega jezua. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva: 47 f.

Steinman, F. 1999. Hidravlika. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo; 294 str.

Steinman, F., Banovec, P. 2004. Hidrotehnika. v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo; 126 str.

Stibilj, U. 2003. Presoja poplavne varnosti s predlogom ureditve Malega grabna v Ljubljani. Diplomatska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Odelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 80 f.

Šraj, M. 2000. Uporaba šifranta padavinskih območji vodotokov Republike Slovenije za pripravo hidroloških modelov. Magistersko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 109 f.

Škrbec, G. 2005. Hidrološki model Gradaščice z Glinščico. Diplomatska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva: 99 f.

Trček, R. 1999. Zadrževalnik na Selški Sori za zmanjšanje poplavne škode. Diplomatska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Odelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer:

Varstvo pred škodljivim delovanjem voda. Mestna Občina Ljubljana,
http://www.ljubljana.si/si/mescani/okolje/povrsinske_vode/varstvo_pred_skodljivim_delovanjem_voda/default.html (15.4. 2007)

Vodnogospodarski inštitut. 2002. Hidrološka presoja visokih vod Gradaščice z upoštevanjem različnih ureditev za zaščito pred škodljivim delovanjem voda na Gradaščici in malem Grabnu. Ljubljana

Wikipedia (12.7. 2007)

- Surface runoff: http://en.wikipedia.org/wiki/Surface_runoff
- Discharge: http://en.wikipedia.org/wiki/Discharge_%28hydrology%29
- Drainage basin: http://en.wikipedia.org/wiki/Drainage_area
- Hydrology: <http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrology>
- Hydrological transport model:
http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrologic_transport_model

PRILOGE:

PRILOGA A: Shema hidrološkega modela narejena v programu HEC-HMS

PRILOGA B: Shema hidravličnega modela narejena v programu HEC-RAS

PRILOGA C: Vzdolžni profil reke Horjulščice za stalni tok – preverjanje dimenzij zapornice pri pretoku $Q=42 \text{ m}^3/\text{s}$

PRILOGA D: Karta 100-letnih padavin za 24 urne padavine za območje Republike Slovenije

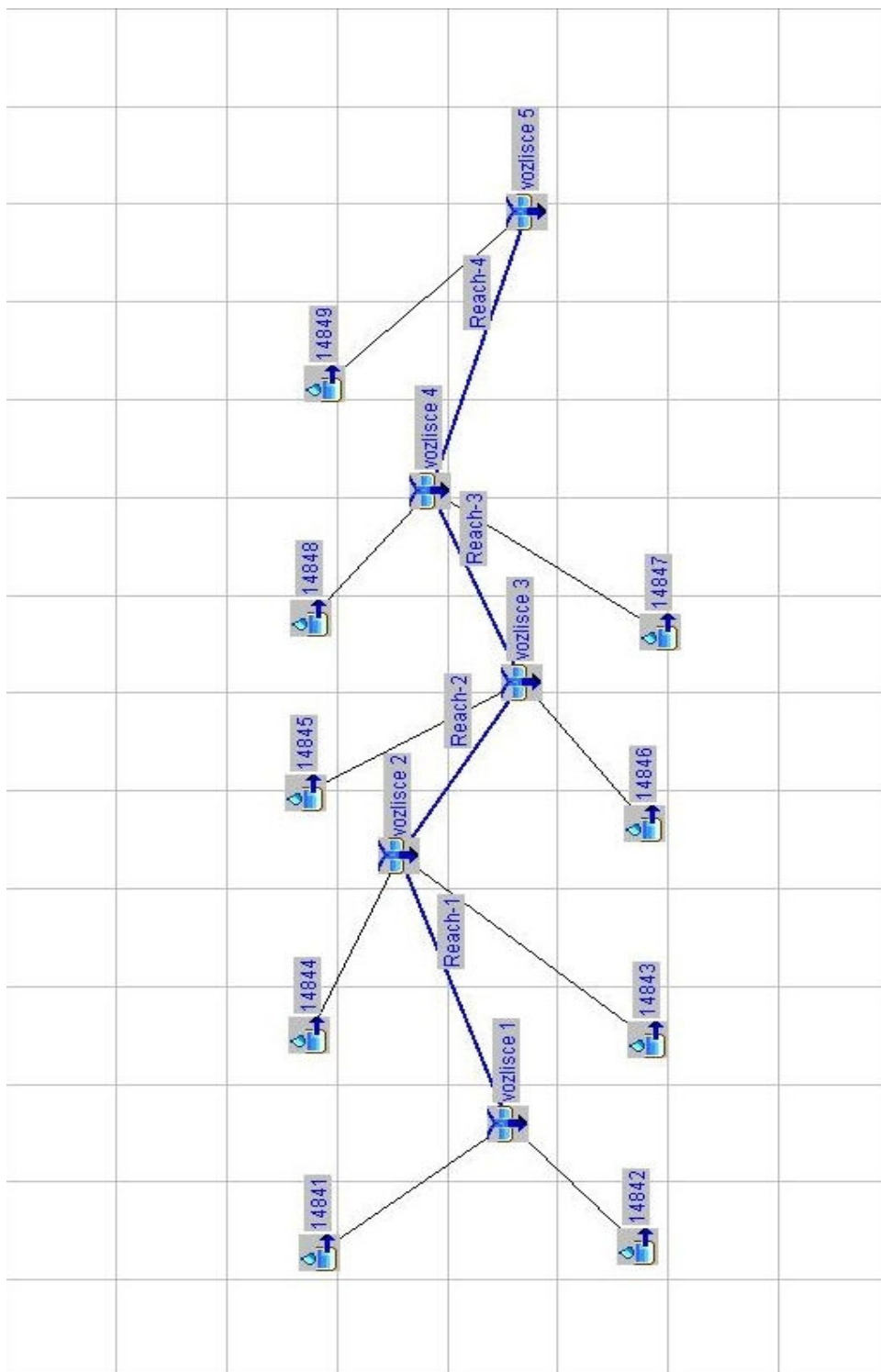
PRILOGA E: Izračunani sintetični hidrogrami

PRILOGA F: Delovanje zapornice

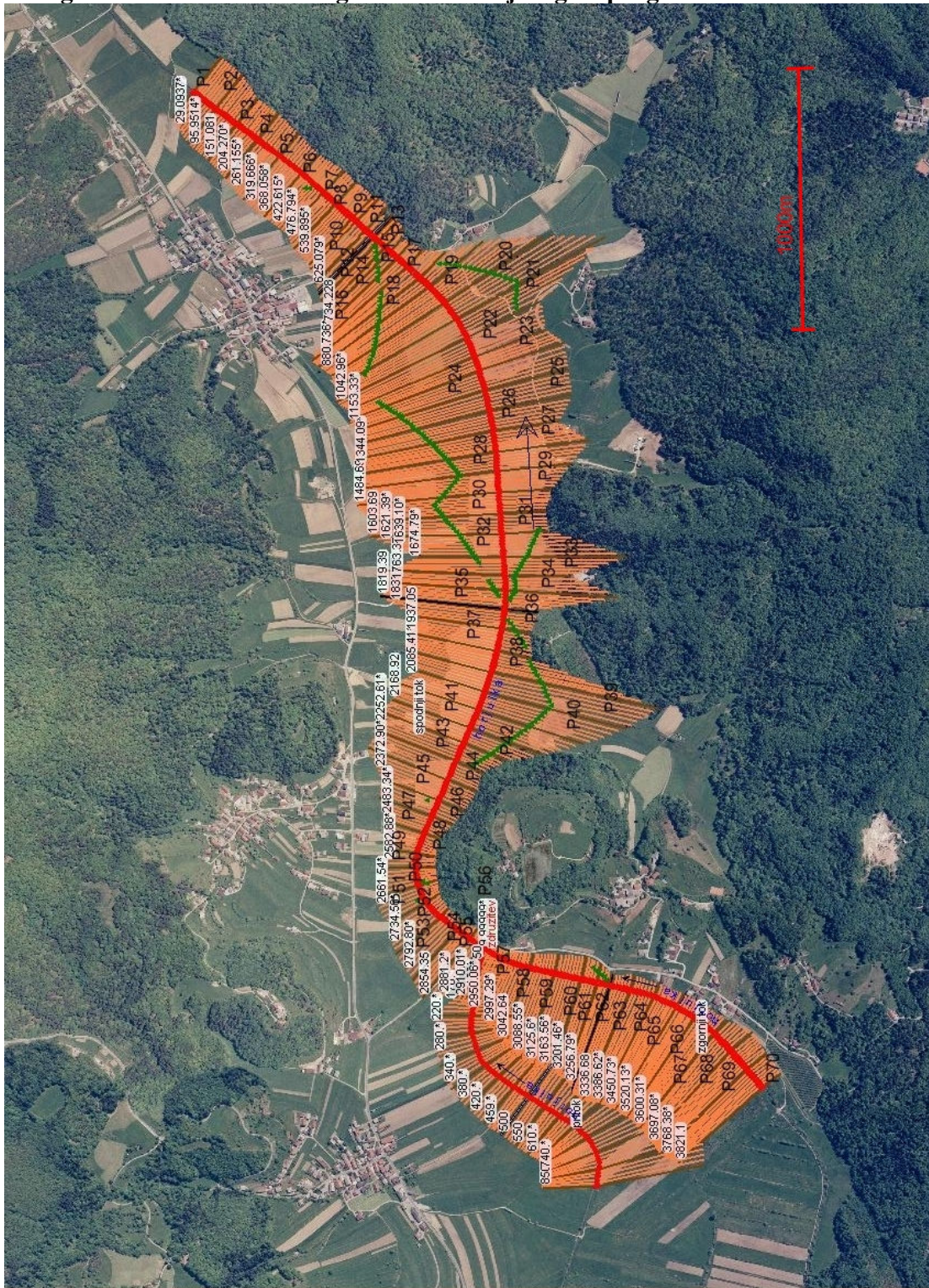
PRILOGA G: Lokacija zadrževalnika Brezje

PRILOGA H: Prikaz poplavljenih površin pri polnem zadrževalniku

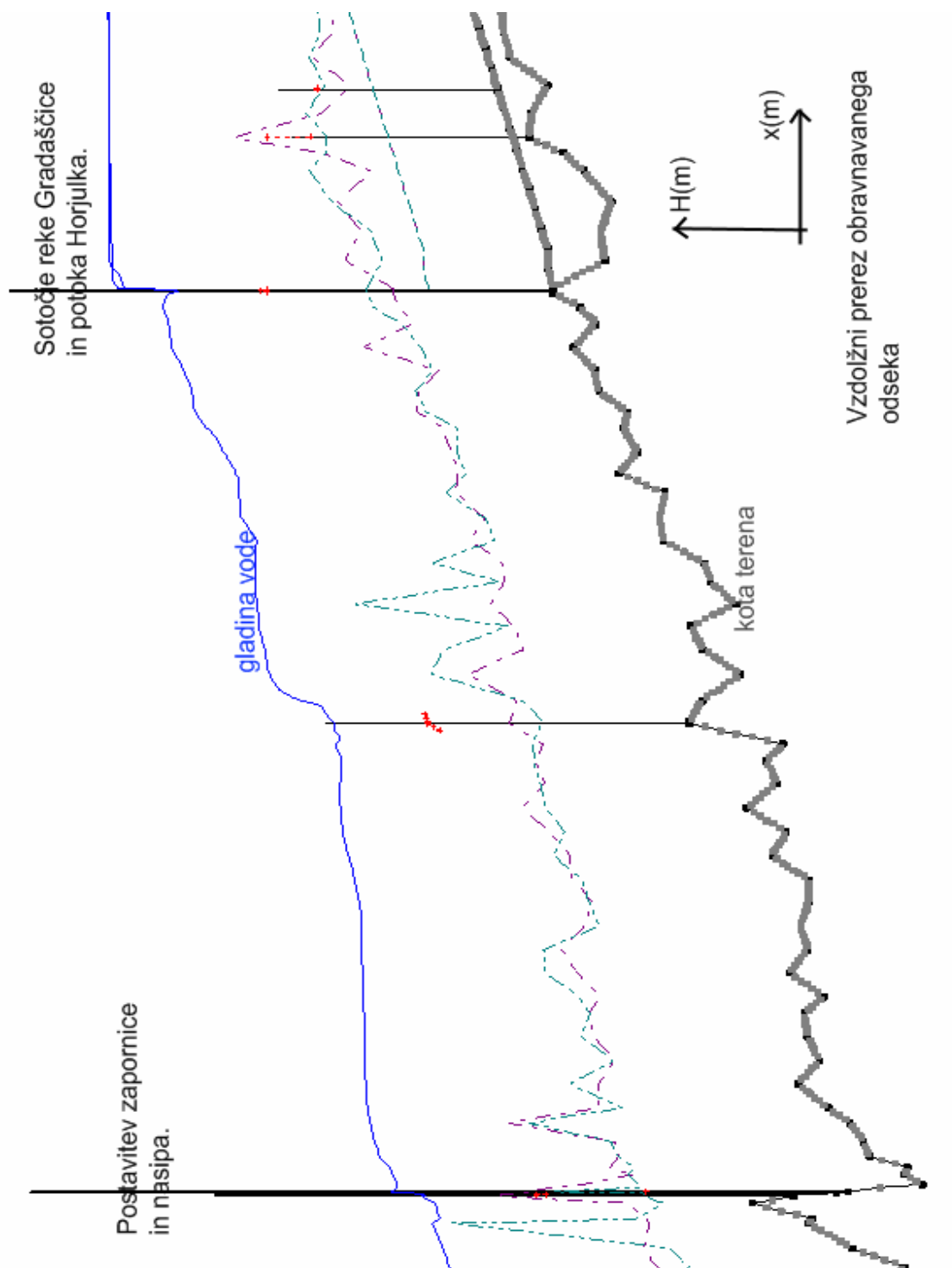
Priloga A: Shema hidrološkega modela narejena v programu HEC-HMS



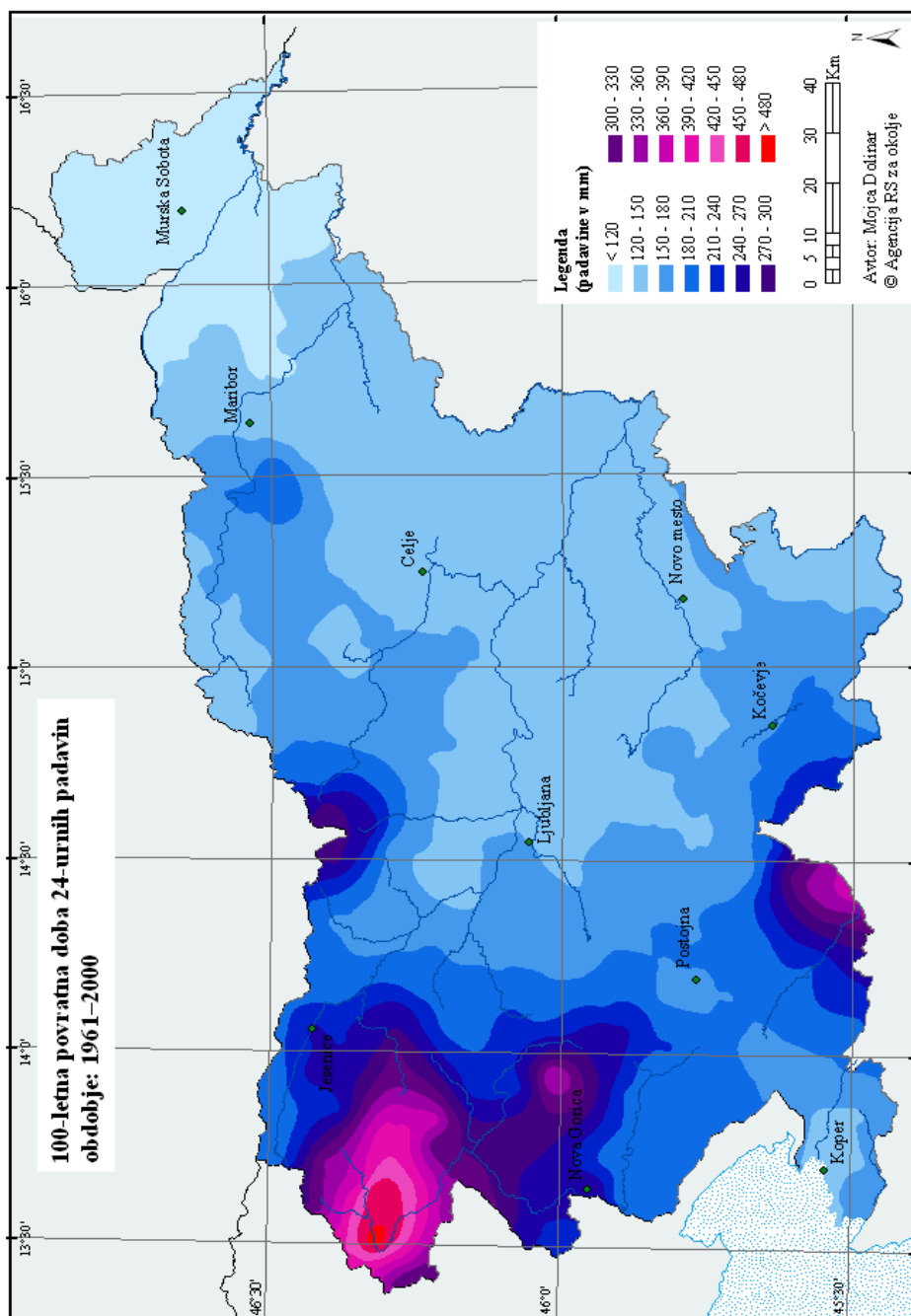
Priloga B: Shema hidravličnega modela narejenega v programu HEC-RAS



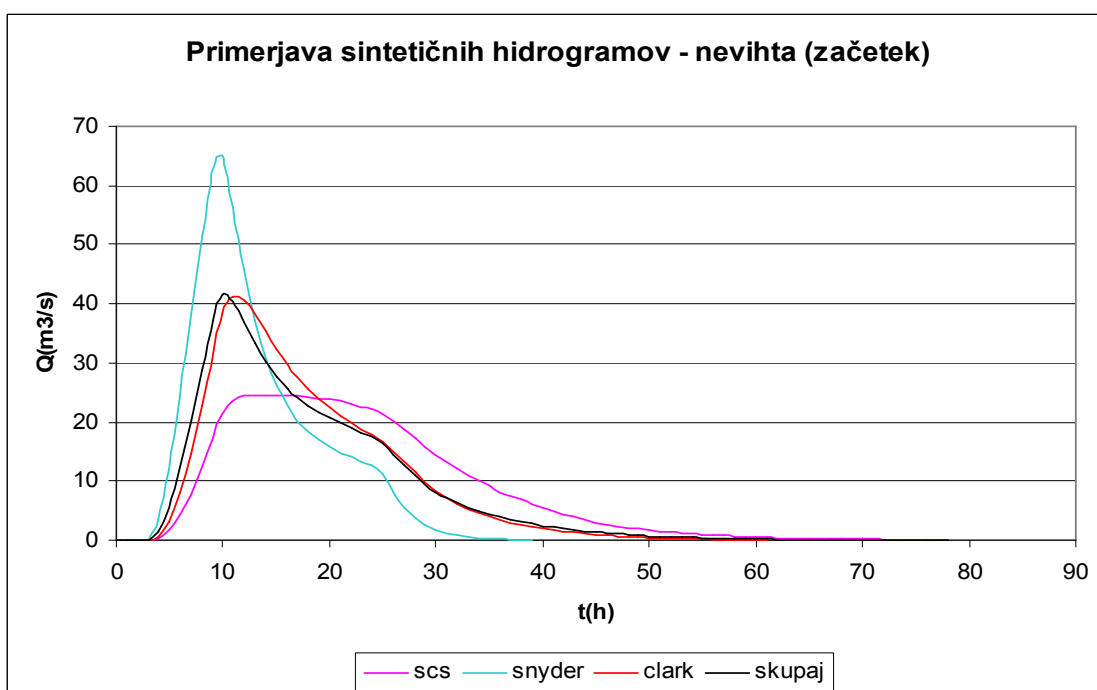
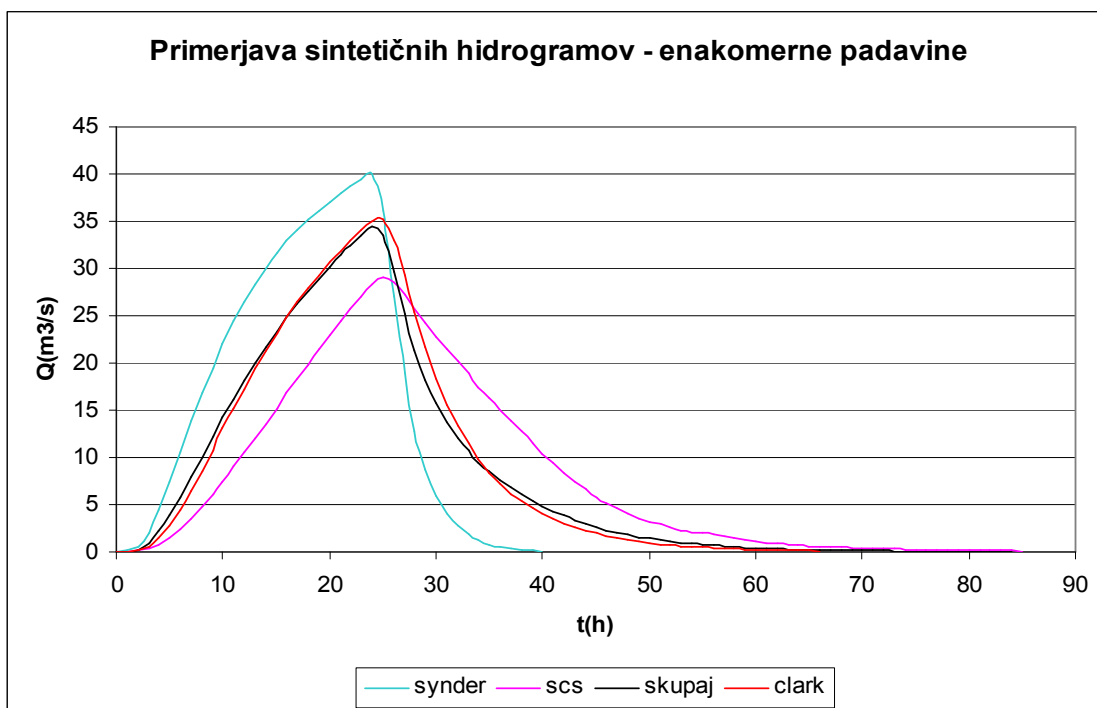
Priloga C: Vzdolžni profil reke Horjulščice za stalni tok – preverjanje dimenzij zapornice pri pretoku $Q=42 \text{ m}^3/\text{s}$



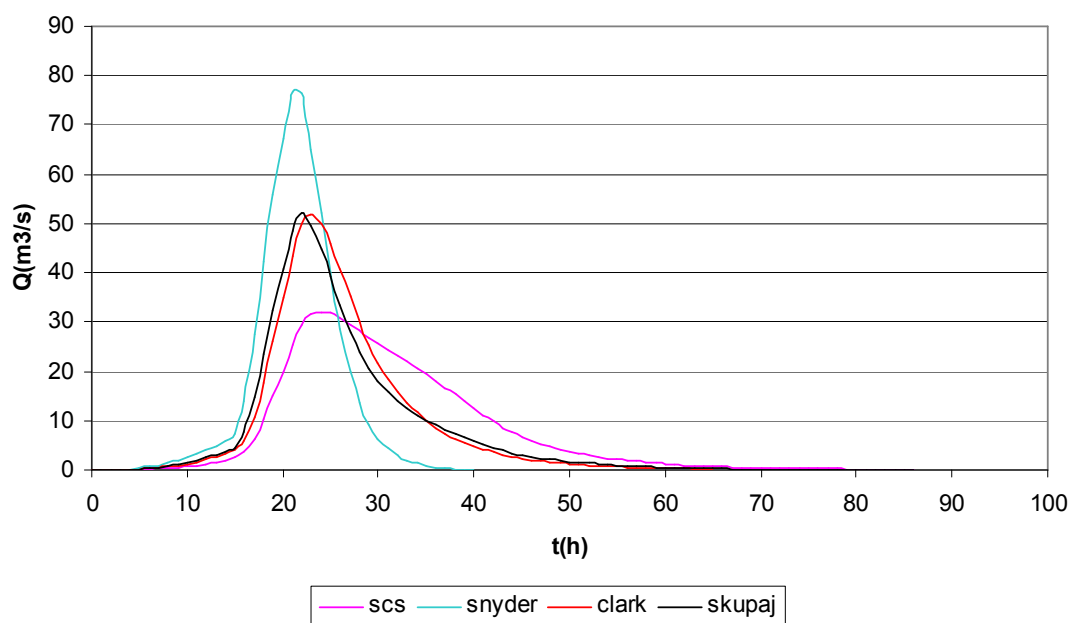
PRILOGA D: Karta 100-letnih padavin za 24 urne padavine za območje Republike Slovenije



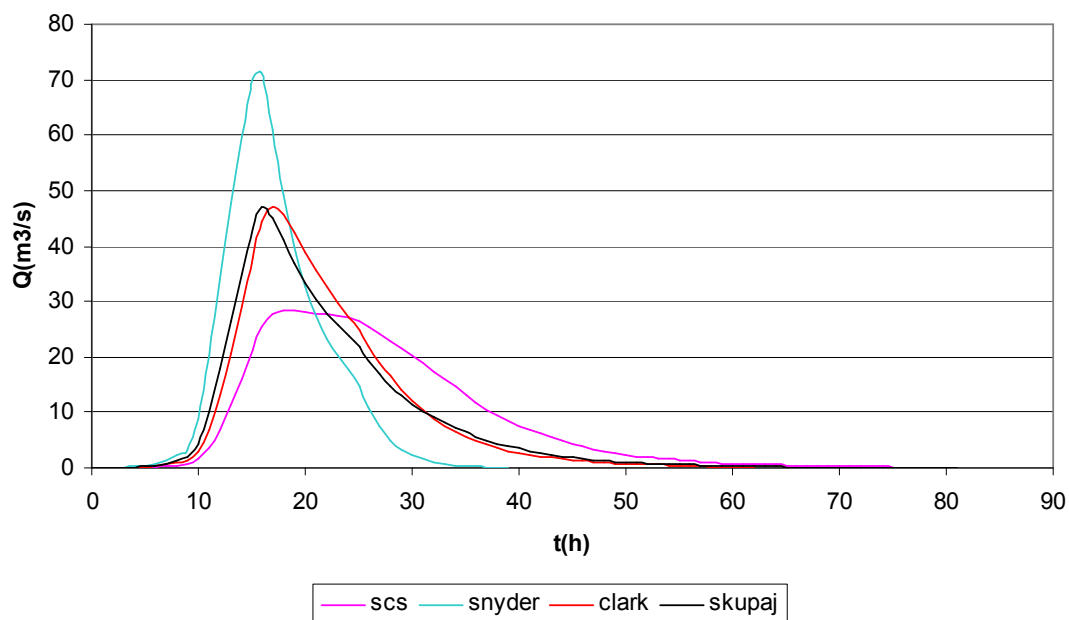
Priloga E: Izračunani sintetični hidrogrami



Primerjava sintetičnih hidrogramov - nevihta (sredina)



Primerjava sintetičnih hidrogramov - nevihta (konec)



PRILOGA F: Delovanje zapornice