

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Gros, V., 2013. Hidrološko hidravlična analiza Ljubljanskega barja. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Mikoš, M., somentor Fazarinc, R.): 53 str.

University  
of Ljubljana

Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Gros, V., 2013. Hidrološko hidravlična analiza Ljubljanskega barja. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Mikoš, M., co-supervisor Fazarinc, R.): 53 pp.

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ  
GRADBENIŠTVA  
HIDROTEHNIČNA SMER

Kandidatka:

**VESNA GROS**

**HIDROLOŠKO HIDRAVLIČNA ANALIZA  
LJUBLJANSKEGA BARJA**

Diplomska naloga št.: 3338/HS

**HYDROLOGIC AND HYDRAULIC ANALYSIS OF THE  
LJUBLJANA MOORS**

Graduation thesis No.: 3338/HS

**Mentor:**

prof. dr. Matjaž Mikoš

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Somentor:**

viš. pred. mag. Rok Fazarinc

**Član komisije:**

izr. prof. dr. Jože Panjan

Ljubljana, 25. 10. 2013

## **POPRAVKI**

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

**IZJAVE**

Podpisana Vesna Gros izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Hidrološko hidravlična analiza Ljubljanskega barja«.

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

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

Kranj, 3.10.2013

Vesna Gros

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>556.166(497.4Ljubljansko barje)(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Vesna Gros</b>
<b>Mentor:</b>	<b>prof. dr. Matjaž Mikoš</b>
<b>Somentor:</b>	<b>mag. Rok Fazarinc, univ. dipl. inž. grad.</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Hidrološko hidravlična analiza Ljubljanskega barja</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>diplomsko delo</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>53 str., 10 pregl., 47 sl.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>Ljubljansko barje, Ljubljana, poplava, nestalni tok, HEC-RAS</b>

### **Izvleček**

V diplomskem delu so predstavljene osnovne značilnosti Ljubljanskega barja in reke Ljubljanice, ki počasi teče po njegovem površju. Predstavljena je njuna zgodovina in opisani so različni posegi, s katerimi so želeli Ljubljansko barje osušiti ter se zavarovati pred vsakoletnimi poplavami. Predstavljene so značilnosti poplav in ukrepi za izboljšanje poplavne nevarnosti. Opisane so tri največje poplave, ki so zajele Ljubljansko barje. V nadaljevanju so opisani različni programi, s katerimi je bilo diplomsko delo izvedeno. Predstavljeni so pridobljeni podatki in različni izračuni za določitev modela Ljubljanskega barja in Ljubljanice. V programu HEC-RAS je bilo z nestalnim tokom izvedeno umerjanje na podlagi poplave septembra 2010. Predstavljeni so rezultati umerjanja in rezultati pri poizkusu izboljšanja modela, s povečevanjem hidroloških količin. Na koncu je bil model preizkušen tudi za visoke vode z 10-letno, 100-letno in 500-letno povratno dobo.

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 556.166(497.4Ljubljansko barje)(043.2)  
**Author:** Vesna Gros  
**Supervisor:** Prof. Matjaž Mikoš, Ph.D.  
**Cosupervisor:** M.Sc. Rok Fazarinc  
**Title:** Hydrologic and hydraulic analysis of Ljubljana moors  
**Document type:** Graduation Thesis – University studies  
**Scope and tools:** 53 p., 10 tab., 47 fig.  
**Keywords:** Ljubljansko barje, Ljubljanica, flood, unsteady flow, HEC-RAS

**Abstract**

Graduation thesis presents basic characteristics of Ljubljana Moors and river Ljubljanica that flows slowly through its surface. Through history there were used different regulations on Ljubljana Moors and river Ljubljanica. With these regulations people wanted to drain Ljubljana Moor and protect their property from annual flooding. In our research we described the characteristics of floods, but on the other hand we also presented the measures that could improve the flood hazard. In the first place we described the three of Ljubljana Moors biggest floods, but then we focused only on the flood in September 2010. Our study was conducted on various computer programs which helped us with various calculations for the model of Ljubljana Moors and river Ljubljanica. With the program HEC-RAS we performed the calibration using unsteady flow. At the end of our research we presented the results of the calibration and the results of experiment that could improve the model by increasing hydrological data. Moreover, we also formed the model which was calculated for high water with 10-year, 100-year and 500-year return period.

## **ZAHVALA**

Za pomoč pri izdelavi diplomske naloge se iskreno zahvaljujem svojemu mentorju prof. dr. Matjažu Mikošu in svojemu somentorju mag. Roku Fazarincu.

Zahvaljujem se tudi vsem zaposlenim v podjetju IZVO-R, ki so mi z nasveti in izkušnjami pomagali pri izdelavi diplomske naloge, še posebej Katji Mikec in Matjažu Udovču.

Prav tako se zahvaljujem svoji družini in fantu, ki so mi stali ob strani skozi moja študijska leta.

**KAZALO VSEBINE**

1	UVOD .....	1
2	OPIS OBMOČJA IN VODOTOKA .....	2
2.1	Ljubljansko barje.....	2
2.2	Ljubljanica.....	6
2.3	Padavine .....	9
3	POPLAVNA NEVARNOST OBMOČJA .....	10
3.1	Značilnosti poplav .....	10
3.2	Zgodovina poplavljanja.....	11
3.3	Ukrepi za izboljšanje poplavne nevarnosti.....	13
3.4	Poplave septembra 2010.....	14
3.5	Poplave novembra 1998.....	15
3.6	Poplave septembra 1965.....	16
4	UPORABA SATELITSKEGA IN LETALSKEGA DALJINSKEGA ZAZNAVANJA PRI DOLOČANJU VODNIH POVRŠIN .....	17
5	HIDRAVLICNI MODEL .....	20
5.1	Programi .....	20
5.1.1	AutoCAD Civil 3D 2013.....	20
5.1.2	Aquaterra.....	20
5.1.3	MIKE 11.....	20
5.1.4	HEC-RAS.....	20
5.2	Vodomerne postaje.....	21
5.3	Volumni poplavnih območij.....	23
5.4	Hidrološki model.....	25
5.5	Model Ljubljanice .....	26
5.6	Izračun v programu HEC-RAS (nestalni tok) .....	27
5.6.1	Geometrijski podatki .....	27
5.6.2	Robni in začetni pogoji .....	30
5.6.3	Rezultati .....	30
5.6.4	Komentar rezultatov .....	33
5.7	Izračun v programu HEC-RAS (spreminjanje hidroloških podatkov) .....	35
5.8	Izračun v programu HEC-RAS ( $Q_{10}$ ) .....	38
5.8.1	Geometrijski podatki .....	38
5.8.2	Robni in začetni pogoji .....	38



5.8.3	Rezultati .....	39
5.9	Izračun v programu HEC-RAS ( $Q_{100}$ ).....	42
5.9.1	Geometrijski podatki .....	42
5.9.2	Robni in začetni pogoji .....	42
5.9.3	Rezultati .....	43
5.10	Izračun v programu HEC-RAS ( $Q_{500}$ ).....	46
5.10.1	Geometrijski podatki .....	46
5.10.2	Robni in začetni pogoji .....	46
5.10.3	Rezultati .....	47
6	ZAKLJUČEK.....	50
	VIRI.....	51

**KAZALO SLIK**

Slika 1: Ljubljansko barje .....	2
Slika 2: Rezanje šote .....	4
Slika 3: Mostiščarsko naselje .....	4
Slika 4: Gruberjev prekop .....	5
Slika 5: Reka sedmerih imen.....	7
Slika 6: Ljubljanica na Ljubljanskem barju .....	8
Slika 7: Porečje Ljubljanice .....	9
Slika 8: Opozorilna karta poplav.....	10
Slika 9: Premajhen in delno zamašen propust čez Volar pri križišču Ižanske in Črnovaške ceste .....	13
Slika 10: Hidrogram pretoka Ljubljanice (vodomerna postaja Moste I) med 17.9.2010 in 25.9.2010.	14
Slika 11: Hidrogram pretoka Ljubljanice (vodomerna postaja Moste I) med 4.11.1998 in 10.11.1998	15
Slika 12: Hidrogram pretoka Ljubljanice (vodomerna postaja Moste) med 1.9.1965 in 8.9.1965 .....	16
Slika 13: Prikaz snemanja z LIDAR tehnologijo .....	19
Slika 14: Položaj vodomernih postaj na Ljubljanskem barju.....	21
Slika 15: Vodomerna postaja Vrhnika II.....	22
Slika 16: Vodomerna postaja Kamin .....	22
Slika 17: Vodomerna postaja Moste I.....	22
Slika 18: Poplavna območja na Ljubljanskem barju .....	23
Slika 19: Batimetrije območij 1, 2, 3 in 4 .....	24
Slika 20: Hidrogrami Ljubljanice in njenih pritokov .....	25
Slika 21: 3D potek terena (sotočje Ljubljanice in Borovniščice).....	26
Slika 22: Obravnavani odsek Ljubljanice z vzdolžno in prečnimi osmi .....	27
Slika 23: Situacija obravnavanega odseka Ljubljanice v programu HEC - RAS.....	27
Slika 24: Mostna konstrukcija pri prečnem profilu 10.....	28
Slika 25: Mostna konstrukcija pri prečnem profilu 34.....	28
Slika 26: Mostna konstrukcija pri prečnem profilu 76.....	29
Slika 27: Poplavna območja, bočni prelive in povezave med njimi .....	29
Slika 28: Gladina vzdolž Ljubljanice 19.9.2010 ob 6:00 .....	31
Slika 29: Časovni prikaz poteka gladine in pretoka na območjih 1, 2, 3 in 4 za leto 2010.....	32
Slika 30: Primerjava hidrogramov pretoka na vodomernih postajah (umerjeni model) .....	33
Slika 31: Most pri Podpeči posnet iz zraka ob septembrskih poplavah leta 2010.....	34
Slika 32: Območje pri Podpeči s prikazanimi višinskimi kotami .....	34
Slika 33:Primerjava hidrogramov pretoka na vodomernih postajah (pretok na VP Vrhnika II povečan za 4-krat) .....	36

Slika 34:Primerjava hidrogramov pretoka na vodomernih postajah (pretok na VP Bistra povečan za 4-krat) .....	37
Slika 35:Primerjava hidrogramov pretoka na vodomernih postajah (pretok na VP Bistra povečan za 5-krat) .....	37
Slika 36: Hidrogram pretoka na VP Vrhnika II ( $Q_{2010}$ in $Q_{10}$ ) .....	38
Slika 37: Hidrogram gladin na VP Moste I ( $Q_{2010}$ in $Q_{10}$ ).....	39
Slika 38: Gladina vzdolž Ljubljanice pri $Q_{10}$ .....	40
Slika 39: Časovni prikaz poteka gladine in pretoka na območjih 1, 2, 3 in 4 za $Q_{10}$ .....	41
Slika 40: Hidrogram pretoka na VP Vrhnika II ( $Q_{2010}$ , $Q_{100}$ in $Q_{10}$ ).....	42
Slika 41: Hidrogram gladin na VP Moste I ( $Q_{2010}$ , $Q_{100}$ in $Q_{10}$ ) .....	43
Slika 42: Gladina vzdolž Ljubljanice pri $Q_{100}$ .....	44
Slika 43: Časovni prikaz poteka gladine in pretoka na območjih 1, 2, 3 in 4 za $Q_{100}$ .....	45
Slika 44: Hidrogram pretoka na VP Vrhnika II ( $Q_{2010}$ , $Q_{500}$ , $Q_{100}$ in $Q_{10}$ ).....	46
Slika 45: Hidrogram gladin na VP Moste I ( $Q_{2010}$ , $Q_{500}$ , $Q_{100}$ in $Q_{10}$ ) .....	47
Slika 46: Gladina vzdolž Ljubljanice pri $Q_{500}$ .....	48
Slika 47: Časovni prikaz poteka gladine in pretoka na območjih 1, 2, 3 in 4 za $Q_{500}$ .....	49

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Večje znane poplave na Ljubljanskem barju (Trontelj, 1997, Kobold, 2010) .....	11
Preglednica 2: Prostornine območij v odvisnosti od nadmorske višine .....	24
Preglednica 3: Primerjava izmerjenih in izračunanih gladin.....	30
Preglednica 4: Najvišje gladine, prostornine ter pripadajoči čas za poplavna območja.....	31
Preglednica 5: Gladine pri $Q_{10}$ in leta 2010.....	39
Preglednica 6: Najvišje gladine in prostornine na poplavnih območjih za $Q_{10}$ ter $Q_{2010}$ .....	40
Preglednica 7: Gladine pri $Q_{100}$ in leta 2010 .....	43
Preglednica 8: Najvišje gladine in prostornine na poplavnih območjih za $Q_{100}$ ter $Q_{2010}$ .....	44
Preglednica 9: Gladine pri $Q_{500}$ in leta 2010 .....	47
Preglednica 10: Najvišje gladine in prostornine na poplavnih območjih za $Q_{500}$ ter $Q_{2010}$ .....	48

## **KRATICE**

ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
GURS	Geodetska uprava Republike Slovenije
MOL	Mestna občina Ljubljana
VP	Vodomerna postaja

Ta stran je namenoma prazna.

## 1 UVOD

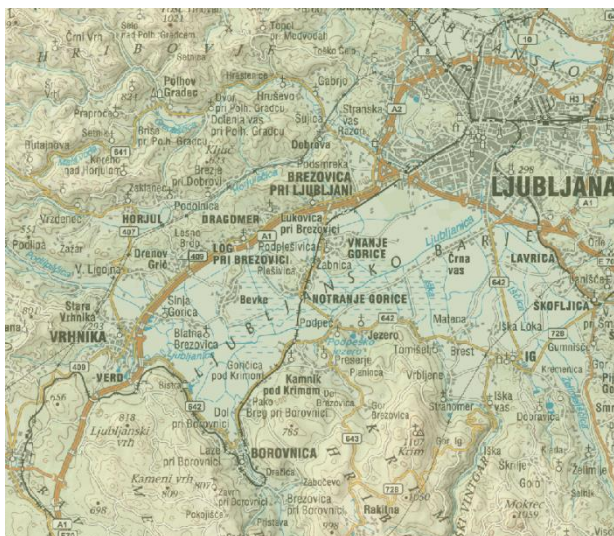
Slovenija je vodno zelo bogata država, saj je na njeni površini okoli 28000 km vodotokov in več kot 1300 jezer večjih od enega hektara. Razdeljena je na črnomorsko povodje, ki obsega 80 odstotkov celotnega slovenskega ozemlja, in na jadransko povodje, ki obsega ostalih 20 odstotkov. Prostorska in časovna raznolikost padavin je v Sloveniji velika, zaradi njene geografske lege in razgibanosti površja. Na zahodu lahko ekstremne dnevne padavine dosežejo polovično vrednost povprečnih letnih padavin vzhodnega dela države. Zaradi obilice dežja in taljenja snega poplave v Sloveniji niso neznanka. Najbolj pogoste so spomladi, ko jih povzročijo odjuga, padavine in taljenje snega, ter jeseni, ob zaključku daljšega obdobja dežja. Poletne poplave so manj pogoste (hudourniki). Poplave so dinamične in neponovljive, zato je njihovo napovedovanje zelo težko. Na Ljubljanskem barju se poplave pojavijo vsako leto. Prebivalci Ljubljanskega barja so se skozi zgodovino naučili s poplavami živeti in so postavljali domove na višje ležečih predelih ali pa so jih ustrezno povišali. Z raznimi ukrepi so poplave skušali omejiti, vendar jim to ni nikoli popolnoma uspelo. Z jarki so sicer uspeli poplave znižati, vendar odpravili jih niso. Veliko je k izboljšanju poplavnega stanja na Ljubljanskem barju pripomogel Gruberjev prekop.

Z diplomsko nalogo bom preučila hidravlične značilnosti Ljubljanskega barja. S programom HEC-RAS bom naredila model Ljubljanice od sotočja z Ljubijo do Špice, kjer se Ljubljanica razdeli. Dogajanje na barju bom umerjala s poplavnim dogodkom septembra 2010, nato pa ga bom analizirala še za poplave z 10-letno, 100-letno in 500-letno povratno dobo.

## 2 OPIS OBMOČJA IN VODOTOKA

### 2.1 Ljubljansko barje

Ljubljansko barje je ravnina v osrednjem delu Slovenije, med alpskim in dinarskim svetom. Na severu ga obdaja Polhograjsko hribovje, na vzhodu Dolenjsko gričevje ter na jugu Krmsko hribovje. V ravninskem delu se dvigajo z gozdom poraščeni osamelci, ob katerih so se razvila manjša naselja (Bevke, Notranje in Vnanje Gorice...). Med osamelci se razprostirajo razsežni nižinski, mokrotni travniki, logi, poplavni gozdni sestoji in nizi drevja ter grmičevja. Južni in zahodni rob Ljubljanskega barja sestavljajo apnenčaste in dolomitne kamnine, ki ustvarjajo za vodo prepusten kraški svet z vrtačami, jamami in podzemnimi rečnimi tokovi. Ob robu barja je zato veliko kraških izvirov, kjer voda nadaljuje pot čez ravnino. V Močilniku in Retovju med Vrhniko in Verdrom so izviri Ljubljanice, v katere se stekajo vode Cerkniškega in Planinskega polja. Kraški izviri so tudi v Bistri (Bistra) in na Igu (Ižica). Voda poleg kraških izvirov doseže Ljubljansko barje tudi po površju. Na južni del barja pritečejo Želimeljščica, ki izvira v Želimeljski dolini, Iška, ki je v dolomitno podlago vrezala globoko sotesko (Iški Vintgar), s Pokojiške planote pa pada v petih večjih in mnogih manjših slapovih Borovniščica. S severa na barje pritekajo številni manjši potočki po podlagi iz glinastih skrilavcev. Večja pritoka sta Mali Graben in Gradaščica, katerih vode se zbirajo iz Polhograjskega hribovja. Zelena voda ponikalnic in površinskih pritokov se na Ljubljanskem barju sreča z rdeče rjavo barjansko vodo, obarvano s huminskimi kislinami šote. Iz ostankov šote in šotne zemlje se izceja v mrežo osuševalnih prekopov, ki jih morajo občasno obnavljati, ker se zaraščajo z bujnim rastlinjem (Gogala, 2008).



Slika 1: Ljubljansko barje (elektronski vir:

[http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas\\_Okolja\\_AXL@Arso](http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso) (3.4.2013))



Ljubljansko barje ima za seboj razgibano geološko preteklost. Oblikovati se je začelo pred okoli 800 000 leti, saj so toliko stari najstarejši sedimenti v globini 100 metrov, ki pa se nahajajo tudi na površju. Tako različen položaj sedimentov nakazuje na znatne tektonske premike po njihovem nastanku. Tedanji relief Ljubljanskega barja je bil razgiban, sedimentacija pa se je začela v najnižjih predelih. Omogočil jo je tektonski dvig območja med Polhograjskim hribovjem in Golovcem. Le-ta je preprečeval prenašanje sedimentov z rečnim transportom proti vzhodu. Večino sedimentnega materiala so naplavljali vodotoki iz bližnjih dolin Podlipščice, Gradaščice, Glinščice, Želimejščice, Iške in Borovniščice. Nastajati so začele prodnate, peščene in meljaste plasti. Prihajalo je do manjših ojezeritev, ki so povzročile usedanje glinastih plasti z organsko primesjo. V enem izmed hladnih obdobij zgornjega pleistocena (22000 – 14000 let pred sedanostjo), je Sava s prodnatimi sedimenti dosegla Ljubljansko barje in s svojimi naplavinami zaprla iztok nekdanje Ljubljanice med Rožnikom in Golovcem. Nastalo je jezero, v katerem se je začela usedati jezerska kreda, imenovana tudi polžarica, zaradi velike vsebnosti lupin mehkužcev. Zaradi intenzivnega zasipavanja s sedimenti, je okolje postopoma iz jezerskega prehajalo v močvirsko in barjansko. Nizko barje je obsegalo večino Ljubljanskega barja. Odtok vode iz območja si je utrl pot proti vzhodu čez nekdanjo Ljubljanico, med Golovcem in Rožnikom. Takrat je nastalo razmeroma stabilno rečno korito Ljubljanice (Andrič in sod, 2009). Iz nizkega barja, za katerega je že značilno nalaganje šote in je občasno še poplavljeno ter v stiku s tekočo vodo, se je razvilo visoko barje, ki ga tekoče vode ne dosežejo več. Ker so edini vir vode za rastline padavine, voda visokega barja ne vsebuje veliko mineralnih snovi. Na tako revnih tleh uspevajo le posebej prilagojene rastline, med katerimi prevladujejo šotni mahovi. Posledica izjemnih razmer (pomanjkanje hranilnih snovi in kisika, kislost, prisotnost huminskih kislin) je bilo nastajanje šote iz globljih odmrlih delov šotnega mahu, katere globina je bila različna, od 1 do 2 metra, ponekod celo več kot 6 metrov (Gogala, 2008).



Slika 2: Rezanje šote (elektronski vir: <http://www.ljubljanskobarje.si/ljubljansko-barje/sota> (3.4.2013))

Arheološka izkopavanja potrjujejo, da je bilo Ljubljansko barje naseljeno že pred drugim tisočletjem pred našim štetjem, ko je kotlino še vedno prekrivalo jezero. Tedanji prebivalci so si lesena, pletena in ometana bivališča postavljali na kolih, zabitih v jezersko dno. Kultura mostiščarjev naj bi trajala več kot 2000 let (Jančar, 2001).



Slika 3: Mostiščarsko naselje (elektronski vir: <http://www.dj-slovenija.si/reportaze/na-igu-ozivljenju-koliscarjev> (3.4.2013))

S prvimi melioracijskimi deli pa naj bi začeli že Rimljani v času Emone, da bi omogočili plovnost Ljubljanice in graditev cest. Drugo strugo so izkopali južno od prvotne struge, da so lahko po reki tovorili podpeški marmor do tedanje Emone. Prvotna struga se je zamočvirila in skopnela, v veljavi pa je ostala novejša struga, po kateri še danes teče Ljubljanica (Geister, 1995). Vodni tokovi so potem ostali nespremenjeni vse do 18. stoletja, ko so Ljubljančani začeli z načrtnim izsuševanjem in intenzivnim rezanjem šote. Zgledu Zorna, ki je na svoje stroške izkopal kanal (Cornovec) in začel z izsuševanjem, so sledili tudi okoliški kmetje in bistriška opatija. Nastajati je začela mreža odcednih kanalov. Po ukazih Marije Terezije o osuševanju barja, je tedanja oblast izdelavo osuševalnega načrta zaupala Gabrieju Gruberju. Leta 1769 je pripravil načrt za zgraditev prekopa za gradom (Gruberjev prekop), ki naj bi odvajal vodo z barja. Gradnja prekopa se je zaključila leta 1780 in znižala vodno gladino na barju za okrog 70 cm (Andrič in sod, 2009).



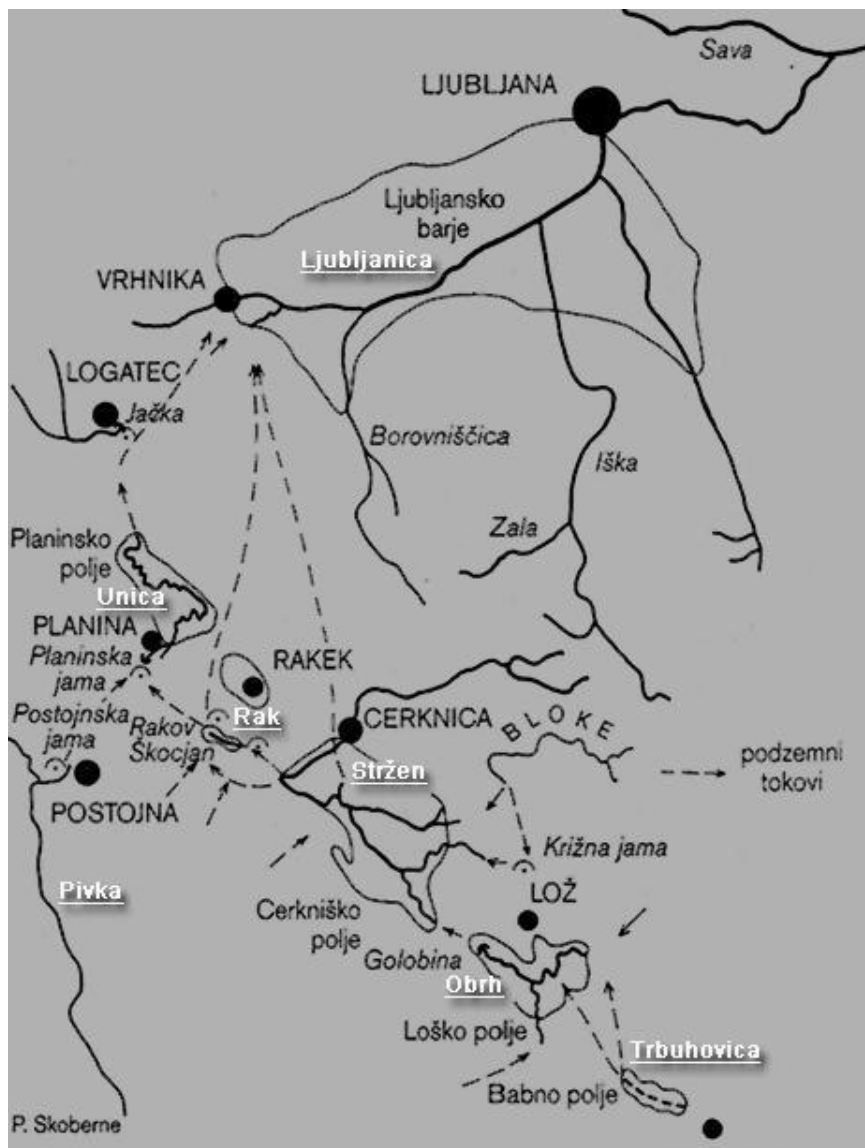
*Slika 4: Gruberjev prekop*

Z izkopom prekopa, dodatnih odvodnih kanalov, odstranitvijo nekaterih jezov na Ljubljanici in poglobitvijo struge skozi mesto je bilo sklenjeno prvo obdobje preurejanja in osuševanja Ljubljanskega Barja. Začelo se je naglo poseljevanje. Zaradi mehkih barjanskih tal, se je razvila nova zvrst stavbarstva (graditev hiš na pilotih). Zgradili so tudi prvo cestno povezavo – Ižansko cesto, ki je bila zgrajena na butarah iz dračja in zasuta s peskom (Zupanc, 2004). Da bi pridobili obdelovalno zemljo, so kmetje začeli požigati šotne plasti. Kmalu je kmetijstvo zamrlo, saj so z rezanjem in prodajanjem šote za kurivo bolje zaslužili. Odkopane šotne plasti so pričele na

zraku trohneti in se sesedati, zato so se kmetje znova vrnili k obdelovanju zemlje, rezanje šote pa je kasneje postalo prepovedano. Po drugi svetovni vojni so ponovno pospeševali kmetijsko rabo Ljubljanskega barja, zato so izdelali program melioracije. V prvem načrtu (inženir Uhliř) je bila predlagana izgradnja 1,7 km dolgega kanala s ponikvo, 1,5 km dolgega predora skozi Golovec in 2 km kanala do Ljubljanice pri Fužinah. Na celotnem odvodniku je bil predviden padeč 12 metrov. Drugi načrt (inženir Kerin) je obsegal izgradnjo nasipov ob vodotokih, ki naj bi preprečevali poplavljanje kmetijskih zemljišč in naselij. Izdelovalci investicijskega programa so se bolj zanimali za drugi načrt, saj se jim je zdel cenejši in zanesljivejši, vendar pa so po poskusni izgradnji treh nasipov, ki so se ugrezali in dvigovali okoliško zemljišče, tudi tega opustili (Geister, 1995). Do osemdesetih let prejšnjega stoletja so bile dodatne poglobitve strug, akumulacije, nasipi, odvodni kanali, črpalne postaje... stalnica razvojnih načrtov in planskih dokumentov, dokler se niso srečali s pomanjkanjem denarja in opozorili ljubiteljev narave. Zavedanje, da se je z raznimi melioracijskimi posegi na Ljubljanskem barju uničilo naravno okolje, se je tako uveljavilo šele v zadnjih desetletjih (Zupanc, 2004).

## 2.2 Ljubljanica

Reka sedmerih imen, kakor tudi imenujejo kraško Ljubljanico, privre zadnjič na dan na zahodnem robu Ljubljanskega barja. V svojem toku večkrat ponikne in se spet prikaže na površju. Na Babnem polju teče kot Trebuhovica, na Loškem polju kot Obrh, na Cerkniskem jezeru kot Stržen, v Rakovem Škocjanu kot Rak, po Planinskem polju kot Unica, eden glavnih pritokov pa je Pivka, ki teče skozi Postojnsko jamo. Ljubljanica izvira iz kraških izvirov med Verdom in Vrhniko, med katerimi so najbolj znani izviri v Močilniku in Retovju (Gogala, 2008).



Slika 5: Reka sedmerih imen (elektronski vir: <http://spletnik.si/dm08/ljubljana.html> (3.4.2013))

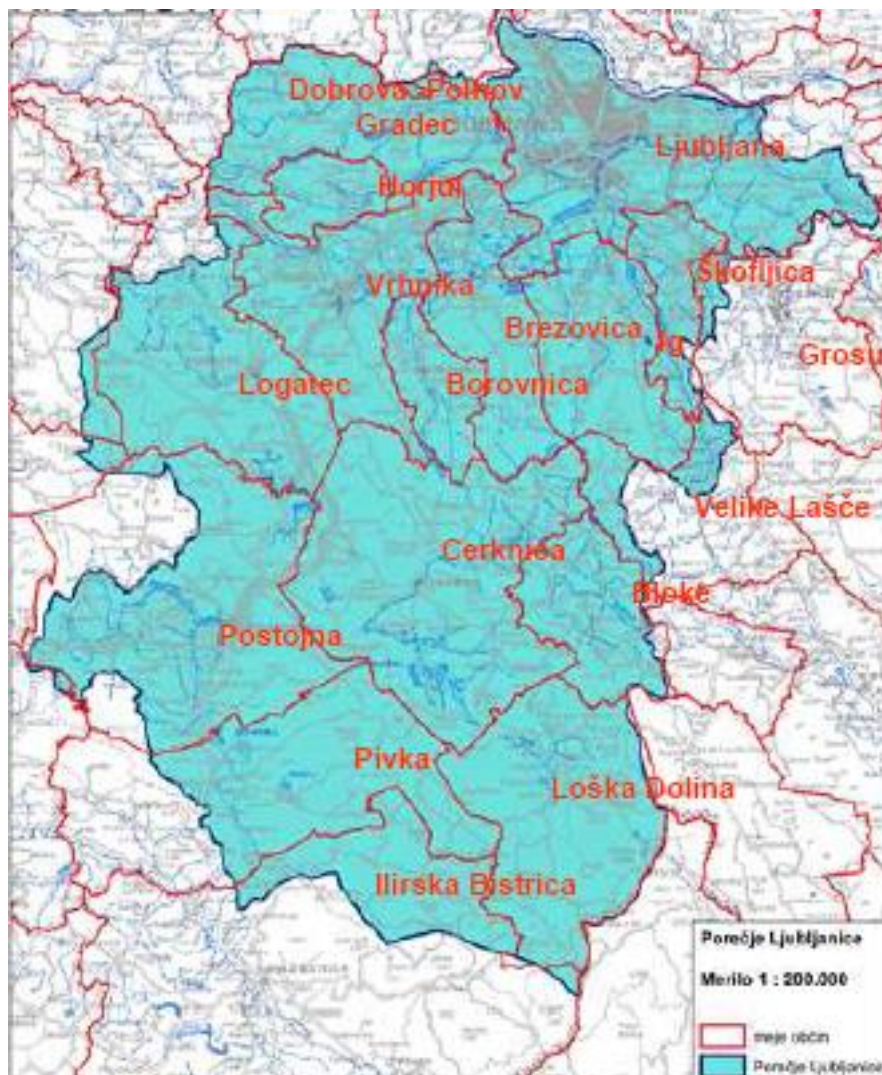
Svojo pot Ljubljanica nadaljuje po sredini Ljubljanskega barja proti Ljubljani, v njeno strugo pa pritekajo vode iz Krimskega hribovja na desni in Polhograjskega hribovja na levi strani. Njen tok je miren in počasen, saj ima med Vrhniko in Ljubljano zelo majhen padec. Pri Vrhniki je dno Ljubljanice na nadmorski višini 286,0 m, pri izlivu Zornice na 281,1 m, pri izlivu Borovniščice na 282,0 m, pri izlivu Radne na 282,1 m, pri izlivu Iščice na 279,5 m, pri izlivu Cornovca na 280,1 m, na Špici (razcep Ljubljanice in Gruberjevega prekopa) 283,1 m, pod Tromostovjem v Ljubljani na 282,1 m, pri sotočju z Gruberjevim prekopom na 278,8 m itd. Ti podatki nam kažejo, da struga Ljubljanice ne pada povsod od izvira do izliva, temveč se ponekod vzpenja čez grebene in pragove, zaradi katerih prihaja do zajezev (Lah, 1965). Počasen tok vode je deloma tudi posledica zajezev s pritoki v spodnjem toku Ljubljanice. Tem hudourniškim pritokom se ob izdatnejših padavinah pretok nekajkrat poveča, zaradi česar na sotočju zajezi Ljubljanico. Medtem, ko so bregovi Ljubljanice na Ljubljanskem barju gosti,

strnjeno in skoraj neprežno obrasli z drevjem in grmovjem, je v sami Ljubljani struga ujeta v betonsko korito. Stene korita segajo do višine visokih voda, proti obrežnemu robu do poti in cest pa segajo strmi travnati bregovi. V delu struge, ki teče skozi središče, pa segajo stene do vrha in se zaključijo z zidanimi ograjami. Po spojitvi Gruberjevega prekopa z Ljubljanico (Moste) teče reka dalje v okljukih in se pri Podgradu izlije v Savo. Na tem delu so struga in sipine prodnate, kar je posledica naplavljanja proda reke Save ob nastajanju Ljubljanskega barja (Jančar, 2001).



*Slika 6: Ljubljanica na Ljubljanskem barju*

Ljubljanica je od izvira pri Vrhniku do izliva v Savo dolga 41 km, površina njenega porečja pa se razteza na 1889,5 km<sup>2</sup>. Njen povprečni pretok v Vrhniku znaša 25 m<sup>3</sup>/s, v Mostah pa 55 m<sup>3</sup>/s. Na vodomerni postaji Moste je bil največji zabeležen pretok septembra 2010, ko je znašal kar 355 m<sup>3</sup>/s. Ljubljanica spada v dežno – snežni rečni režim, za katerega sta značilna dva viška visokih voda in dva nižka. Primarni višek nastopi spomladi (marec, april, maj), sekundarni pa v novembru, ki mu sledi december. Primarni nižek nastopi avgusta, sekundarni pa nastopi pozimi (elektronski vir, »ARSO«).



Slika 7: Porečje Ljubljance (elektronski vir: <http://www.postojna.si/podrocje.aspx?id=2583> (3.4.2013))

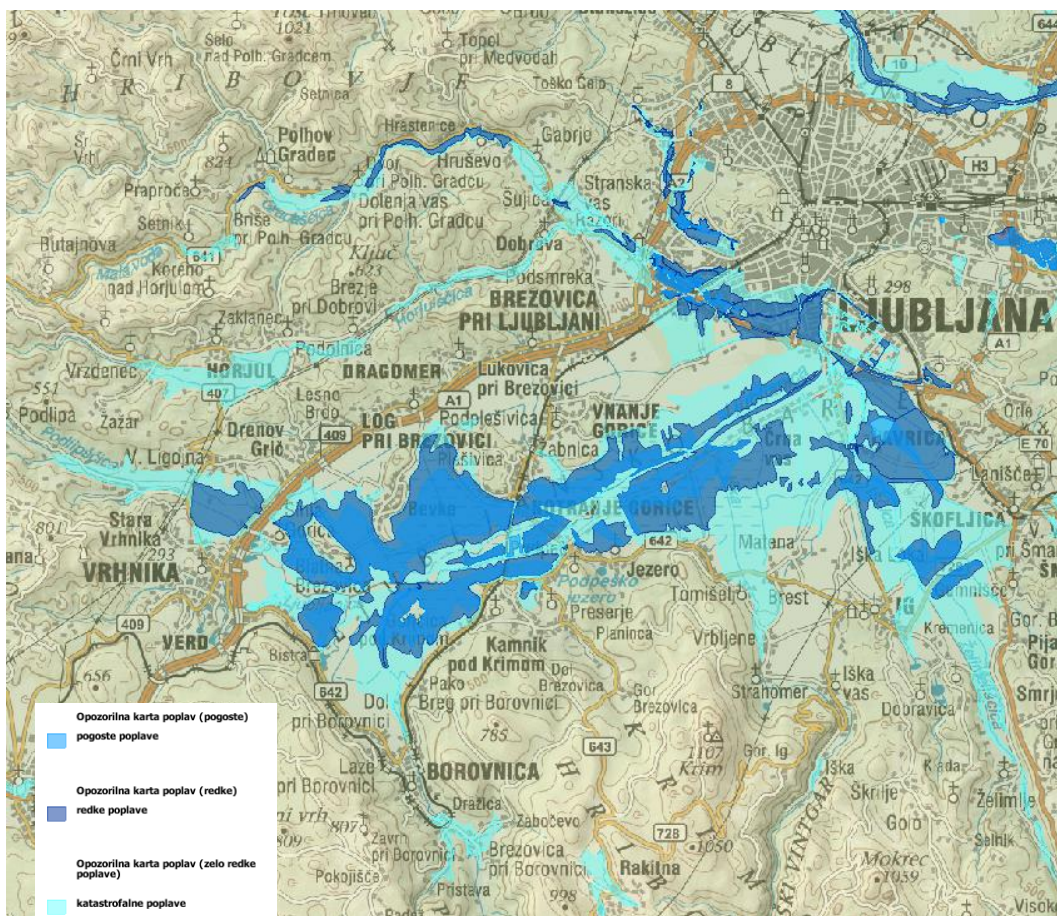
### 2.3 Padavine

V Sloveniji imamo zelo raznoliko intenziteto padavin. Največja intenziteta nastopa na zahodu, v Julijskih Alpah, nato pa se zmanjšuje proti vzhodnemu delu države, kjer je lahko tudi do trikrat manjša. Ekstremne dnevne padavine lahko v Posočju presežejo 400 mm, kar znaša polovico povprečnih letnih padavin v Prekmurju, v osrednji Sloveniji pa lahko dosežejo polovico posoških. Na območju Ljubljanskega barja lahko v močno namočenih letih pade toliko padavin, kolikor je dolgoletno povprečje v Posočju, v sušnih letih pa se lahko Ljubljansko barje primerja celo s Prekmurjem. Leta 1937 so izmerili največjo letno višino padavin – 2379 mm, najmanjša pa je bila izmerjena leta 1946 – 872 mm. Oktobra 1992 je na območju Ljubljane zapadlo rekordnih 505 mm. Za najbolj sušen mesec pa velja januar 1968, ko padavin sploh ni bilo (Natek, 2011).

### 3 POPLAVNA NEVARNOST OBMOČJA

#### 3.1 Značilnosti poplav

Ljubljansko barje spada med poplavna območja neproduktivnih rek izven krasa. Je ravninsko poplavno območje, za katerega so značilne majhne višinske razlike. Celotna kotlina visi rahlo proti jugu, zaradi česar je poplavno območje na desni stani Ljubljanice skoraj dvakrat večje kot na levi. Iz opozorilne karte poplav so razvidne povečane površine katastrofalnih poplav na južnem in jugovzhodnem delu Ljubljanskega barja. Opazno se povečajo tudi območja ob nekaterih malih vodotokih (Gradaščica in Mali graben). Poplave na Ljubljanskem barju v večji meri povzročajo pritoki, medtem ko Ljubljanica vpliva na trajanje poplav. Najprej se na poplavna območja izlijejo pritoki, ki imajo hudourniški značaj, potem pa čas poplave podaljšuje kraška voda. Na trajanje in obseg poplav vplivajo dolgotrajne padavine in prisotnost talne vode (Natek, 2011).



Slika 8: Opozorilna karta poplav (elektronski vir):

[http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas\\_Okolja\\_AXL@Arso](http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso) (3.4.2013))



Ljubljansko barje je območje vsakoletnih poplav. Območje je poplavljenost vsaj dvakrat letno – spomladi ob deževju in taljenju snega ter jeseni ob dolgotrajnem deževju. Poleti lahko pride tudi do kratkotrajnih poplav (hudourniških poplav), ko ob poletnih nevihtah na ravnino s silovito močjo pritečejo hudourniški pritoki. Ob vsakoletnih poplavah voda prekrije 15 odstotkov površine Ljubljanskega barja (nad 2300 ha površine) in navadno odteče v tednu dni (Bat, 2003). Pri izjemno velikih poplavah voda prekrije kar polovico celotne površine Ljubljanskega barja (okoli 8000 ha). Na poplavno ogroženih območjih živi 6 odstotkov (v 11 odstotkih objektov) prebivalstva mestne občine Ljubljana, poseljevanje na teh območjih pa se nadaljuje. Med obstoječimi objekti so bili številni zgrajeni brez dovoljenj in ustrezne gradbene dokumentacije (Pak, 2002).

### 3.2 Zgodovina poplavljanja

Poplave na Ljubljanskem barju niso nič nenavadnega, vendar pa vsakoletne poplave včasih postanejo katastrofalne. Večje poplave na Ljubljanskem barju so podane v preglednici 1.

Preglednica 1: Večje znane poplave na Ljubljanskem barju (Trontelj, 1997, Kobold, 2010)

Leto	Mesec	Vzrok poplav	Obseg in škoda
1703	Oktober	Štirinajstdnevno deževje	- v Krakovem in Trnovem hiše na pol pod vodo - v cerkvi Sv. Lovrenca voda za pol moža visoko
1707	Oktober	Deževje vso jesen, posebno zadnjih 10 dni	V Ljubljani na Bregu voda do hiš
1833			Poplave na Ljubljanskem barju
1862			Poplave na Ljubljanskem barju
1876	Maj		- poplava v Ljubljani - voda visoka 6 m - velika škoda
1881	Avgust	Dolgotrajno deževje	- poplave na Ljubljanskem barju - popolnoma uničeni poljski pridelki
1885	Spomladi in jeseni		Poplave na Ljubljanskem barju
1888	Marec	Deževje in taljenje snega	- poplave na Ljubljanskem barju - najhujše prizadete vasi so bile Hauptmanca, Črna vas in Lipe - hiše do streh v vodi
	Oktober		- poplave na Ljubljanskem barju - najhujše prizadeta vas so bile Lipe
1889	Oktober		- poplave na Ljubljanskem barju - ceste pod vodo - v Lipah voda v hišah
1893	September		Poplave na Ljubljanskem barju

se nadaljuje...

... nadaljevanje preglednice 1

1895	Marec		Poplave na Ljubljanskem barju
	Oktober		- poplave na Ljubljanskem barju - v Črni vasi voda v stanovanjih
1901	September in oktober		Poplave na Ljubljanskem barju
1903	December		Poplave na Ljubljanskem barju
1907	Oktober	Veliko deževje	- poplave na Ljubljanskem barju - v Črni vasi, Ilovici, Hauptmancah, Karolinski zemlji uničeni poljski pridelki - poplavljen poslopja
1908	September		- poplave na Ljubljanskem barju - uničene poljščine
1909	December		Poplave na Ljubljanskem barju
1912	September		Poplave na Ljubljanskem barju
1923	November		Poplave na Ljubljanskem barju
1924	Avgust	Silno neurje v Polhograjskem hribovju	Poplavljanje Gradaščice
1925	November		Poplave na Ljubljanskem barju (vse pod vodo)
1926	September	Močni nalivi	- poplave na Ljubljanskem barju - poplavljanje Gradaščice
1933	September	Obilne padavine	Poplave na Ljubljanskem barju
1934	Julij		Poplave na Ljubljanskem barju
1936	Januar	Šest tednov trajajoče deževje	- poplave na Ljubljanskem barju - poplavljanje Gradaščice
1942	Februar		Poplave na Ljubljanskem barju
1964	Oktober	Obilne padavine	Poplave na Ljubljanskem barju
1965	September		Poplave na Ljubljanskem barju
1970	April		Poplave na Ljubljanskem barju (trajale so 19 dni)
1978	Oktober		Poplavljanje Malega Grabna
	December		Poplave na Ljubljanskem barju
1992	Oktober	Obilne padavine	Poplave na Ljubljanskem barju
1995	Februar in marec	Deževje in taljenje snega	Poplave na Ljubljanskem barju
1996	November		- poplave na Ljubljanskem barju - poplavljanje Malega Grabna
1998	November		Poplave na Ljubljanskem barju
2004	Oktober		- poplave na Ljubljanskem barju - poplavljanje Gradaščice
2009	December	Obilne padavine in taljenje snega	Poplave na Ljubljanskem barju
2010	September	Obilne padavine	- poplave na Ljubljanskem barju - poplavljanje Gradaščice

### 3.3 Ukrepi za izboljšanje poplavne nevarnosti

Na Ljubljanskem barju je bilo v preteklosti narejenih že veliko posegov, s katerimi so poizkušali zmanjšati nevarnost poplav (osuševanje, Gruberjev prekop). Do neke mere jim je to le uspelo, vendar poplave ostajajo stalnica Ljubljanskega barja. Mestna občina Ljubljana načrtuje, da bi z naslednjimi ukrepi izboljšali poplavno varnost (elektronski vir: <http://www.ljubljana.si/si/zivljenje-v-ljubljani/v-srediscu/75598/detail.html> (4.4.2013)):

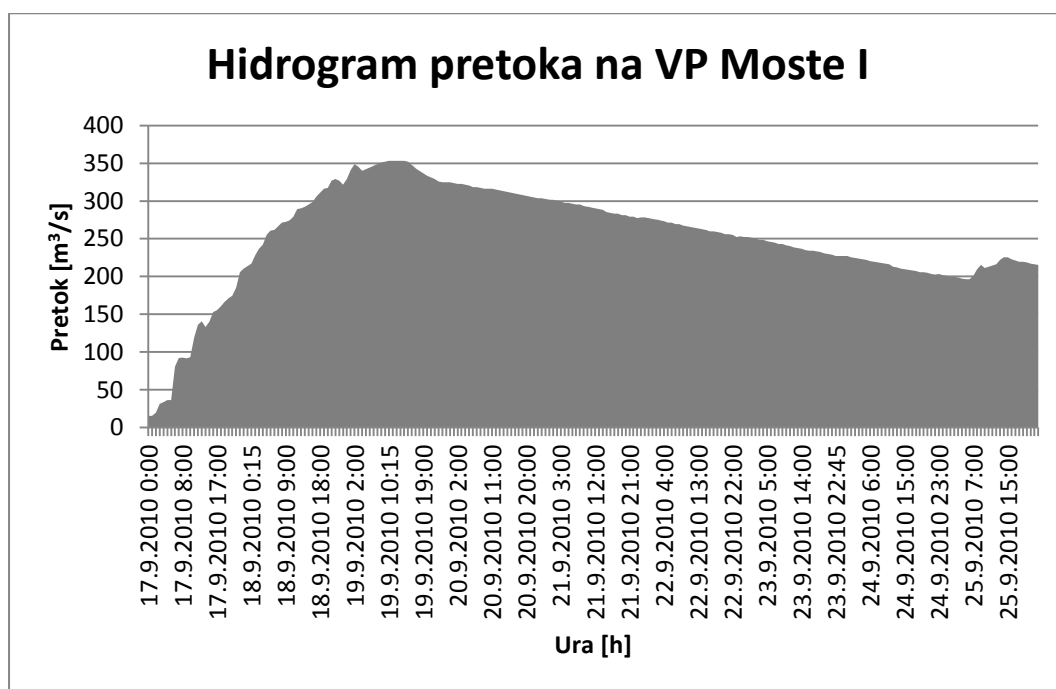
- izgradnja nasipov,
- povečanje propustov ali izgradnja novih,
- čiščenje odvodnikov,
- zamenjava poddimenzioniranih premostitev z izdelavo zapornic na tistih, ki ogrožajo poseljena območja,
- čiščenje struge Ljubljanice in Gruberjevega prekopa,
- povečanje odtoka po Ljubljanici,
- izgradnja zadrževalnikov,
- upravljanje zapornic na Ljubljanici in Grubarjevem prekopu z vzpostavitvijo vodomernih postaj,
- prepoved gradnje na poplavnih območjih.



*Slika 9: Premajhen in delno zamašen propust čez Volar pri križišču Ižanske in Črnovaške ceste (Globevnik, Vidmar, 2010)*

### 3.4 Poplave septembra 2010

Poplave septembra 2010 spadajo med tri največje znane poplave na Ljubljanskem barju (1926, 1933, 2010). Vzrok obsežnih poplav s 100-letno povratno dobo, so bile močne in obsežne padavine med petkom (17.9.2010) in nedeljo (19.9.2010), ki so zajele zahodni del Slovenije. V Ljubljani je padlo 271 mm dežja, v zaledju Ljubljanice okoli  $420 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ . Barje je začelo poplavljeni v soboto popoldne, ko so se napolnile podzemne vode kraškega zaledja in so začele pritekati vode iz izvirov ob vznožju Krimskega pogorja. Prav tako so v soboto popoldan začele poplavljeni Iška, Iščica in Ljubljanica. Ljubljanica je imela tekom poplave en poplavni val s konico v nedeljo med 11:30 in 15:30 ( $355 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Z dodatno namočitvijo barjanskih tal je k poplavam pripomogla tudi arteška podtalnica (Globevnik, Vidmar, 2010).

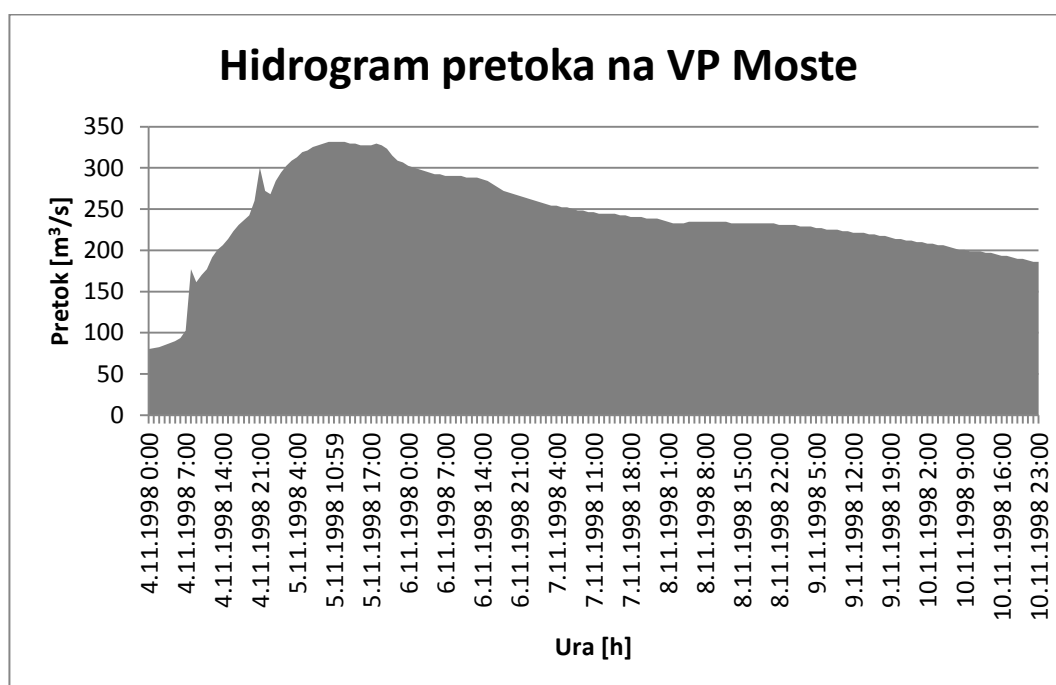


Slika 10: Hidrogram pretoka Ljubljanice (vodomerna postaja Moste I) med 17.9.2010 in 25.9.2010

Največji obseg so poplave dosegle v ponedeljek, 20.9.2010, ko je bilo poplavljeno  $76,8 \text{ km}^2$  veliko območje. Na vzhodnem delu Ljubljanskega barja je voda ponekod dosegla tudi 95 cm višine. Skoraj  $34 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  vode se je na območju Ljubljanskega barja zadrževalo 7 dni. Odtekanje vode iz območja je ponekod omejeno zaradi cest (Ižanska cesta, Črnovaška cesta), ki delujejo kot visokovodni nasipi. Ceste so dvignjene do 2 m nad terenom in imajo premajhne propuste, ki se ob poplavah dodatno zmanjšajo zaradi naplavin (Globevnik, Vidmar, 2010).

### 3.5 Poplave novembra 1998

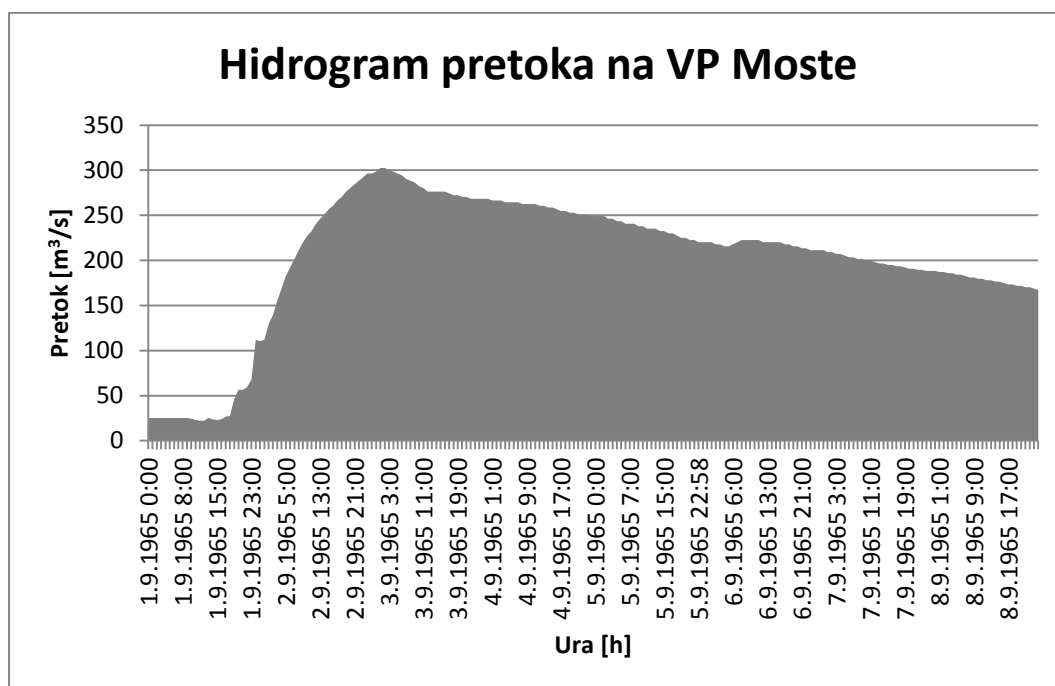
Novembra 1998 so obilne padavine po vsej Sloveniji sprožile poplave, hudourne vode in zemeljske plazove. Zahodni del so zajele 3.11.1998, naslednji dan pa so se razširile nad vso Slovenijo. Na zahodu je padlo od 200 do 300 litrov, v osrednji Sloveniji več kot 100 litrov, na skrajnem vzhodu države pa celo več kot 70 litrov dežja na kvadratni meter (Šipec, 1999). Ljubljansko barje so poplavile vode s 5-letno povratno dobo. Poplave so povzročile narasle reke v kraškem zaledju Ljubljanice, Ljubljanica ob svojih izvirih ter pritoka Iška in Borovniščica. Dodatno so k poplavam pripomogli številni pobočni in kraški izviri na robu Krimskega pogorja. Na južnem delu Ljubljane je poplave povzročila Gradaščica (Polajnar, 1999). Ljubljanica je imela tekom poplave en poplavni val, s konico 5. novembra med 10. in 12. uro ( $332 \text{ m}^3/\text{s}$ ).



Slika 11: Hidrogram pretoka Ljubljanice (vodomerna postaja Moste I) med 4.11.1998 in 10.11.1998

### 3.6 Poplave septembra 1965

Septembra 1965 so na Ljubljanskem barju nastopile večje poplave, ki so jih povzročile močne padavine. Padavine so iz sosednje Italije in Avstrije zajele zahodni in jugozahodni del Slovenije. V prvih štirih dneh je na območju Ljubljane zapadlo 138,3 mm padavin. Ljubljanica je imela tekom poplave en poplavni val, s konico 3. septembra ob 2. uri zjutraj (303 m<sup>3</sup>/s) (Kolbezen, 1994).



Slika 12: Hidrogram pretoka Ljubljanice (vodomerna postaja Moste) med 1.9.1965 in 8.9.1965

#### **4 UPORABA SATELITSKEGA IN LETALSKEGA DALJINSKEGA ZAZNAVANJA PRI DOLOČANJU VODNIH POVRŠIN**

Poplave so v Evropi najbolj pogoste naravne nesreče. 75 odstotkov vseh odškodninskih zahtevkov izhaja zaradi njihovih uničujočih posledic. Satelitski posnetki dajejo vedno večje zmožnosti ocenjevanja in predvidevanja naravnih nesreč, kar močno pripomore pri zaščiti nepremičnin, infrastrukture ter najpomembneje pri varovanju človeških življenj. Za opazovanje poplav je pomembno, da se satelitski podatki zagotovijo v čim krajšem času po poplavi ter da so ti podatki v primerni prostorski ločljivosti (Lamovec in sod, 2013).

Površinske vode imajo na zemeljskem površju lahko dokaj stalno lego (morja, jezera, vodotoki) ali pa se spreminjajo zaradi sezonskih in vremenskih vplivov (močvirja, presihajoča jezera, hudourniki, visoke vode). Z daljinskim zaznavanjem so površinske vode dobro določljive, vseeno pa imajo te metode nekaj pomanjkljivosti. Premajhna prostorska ločljivost, ki določa razmerje med velikostjo pik in ravniyo podrobnosti (manjše vodne površine), slaba dejanska vidnost (zaraščeni bregovi, neločljivost sence in vode) in čas zajema podatkov (poplave, suša) so tri najpomembnejše omejitve (Veljanovski, 2012).

Daljinsko zaznavanje je tehnologija, s katero opazujemo, merimo in kartiramo zemeljsko površje. Natančnost zaznavanja je odvisna od prostorske ločljivosti zajetih podatkov. Vrst daljinskega zaznavanje je več, in sicer:

- satelitski in zračni opazovalni sistemi,
- optični in radarski opazovalni sistemi,
- mono- in večspektralni opazovalni sistemi,
- sistemi z enkratnim ali sistematičnim načinom opazovanja.

Medtem, ko satelitsko daljinsko zaznavanje poteka zunaj Zemljine atmosfere (sateliti), zračno poteka s pomočjo letal, helikopterjev in balonov. Optično daljinsko zaznavanje je mogoče le podnevi, saj deluje po principu izsevane energije zemeljskega površja (energija iz Sonca se na Zemlji deloma odbije, deloma absorbira in znova izseva od površja skozi atmosfero). Za radarsko daljinsko zaznavanje je značilen lasten vir elektromagnetnega valovanja. Pri snemanju radarski senzorji oddajajo valovanje v smeri površja in beležijo intenziteto odbitega valovanja. Radarsko daljinsko zaznavanje ima pred optičnim kar dve prednosti. Ker deluje v mikrovalovnem delu elektromagnetnega spektra, je neodvisno od vremenskih in drugih razmer (oblaki, dež, prah), snemanje pa lahko poteka tudi ponoči. Radarski sistem je prav tako uporaben za merjenje vlažnosti tal ter spremljanje ledenikov in plazov. Radarsko daljinsko zaznavanje je primerno za naravno okolje, v urbanem okolju pa njegova uporaba odpove. Zato je nadvse primerno za sprotno opazovanje in spremljanje dogodkov na velikih površinah, kot je

na primer Ljubljansko barje. Optično daljinsko zaznavanje lahko uporabljamo za ugotavljanje poplavljenosti v naravnem in urbanem okolju, vendar je obdelava podatkov zahtevnejša in daljša (Veljanovski, 2012).

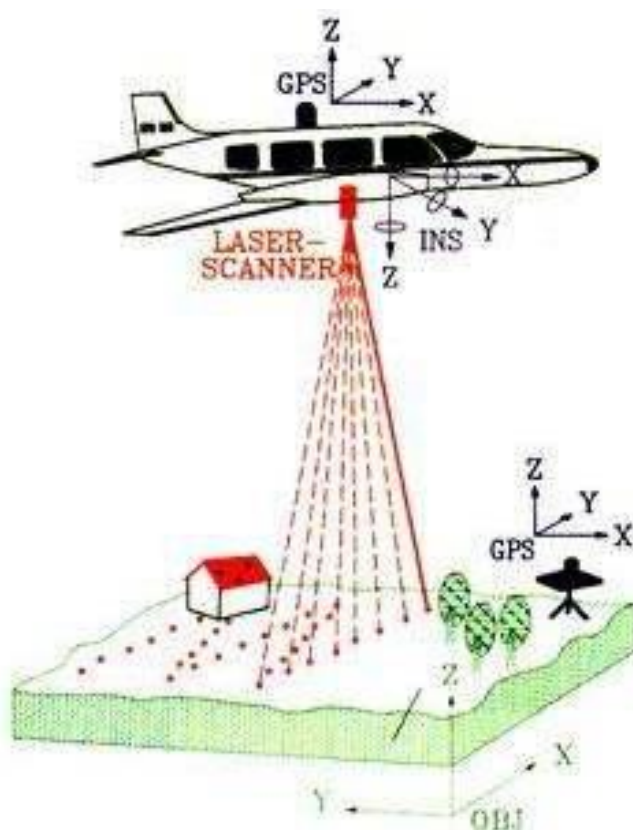
Podobno kot radarsko daljinsko zaznavanje deluje tudi LIDAR tehnologija, le da namesto mikro- in radarskih valov, ki jih uporablja radarski sistem, LIDAR uporablja laserje, ki delujejo v vidnem in infrardečem delu elektromagnetnega spektra. LIDAR za določanje zemeljskega površja uporablja laserske pulze in merjenje časa potovanja elektromagnetnega pulza znotraj atmosfere. Trenutno LIDAR tehnologija omogoča najbolj natančne podatke o oblikovanosti in pokrovnosti površja. Njeno slabost predstavljajo ogromne količine podatkov za obdelavo in interpretacija zapletenejših upodobitev podatkov. Zahtevnejše pri LIDAR snemanju je tudi odkrivanje vodnih površin. Pri radarskih posnetkih je odkrivanje vodnih površin dokaj enostavno, saj je radarski povratni signal na gladki vodni površini nezaten. Voda je na radarski posnetkih lahko določljiva, vendar le pri večjih vodnih površinah in pri mirnih vodnih gladinah. Pri LIDAR snemanju je zaradi velike gostote točk in večjih podrobnosti površja odkrivanje vodnih površin zahtevnejše, zato so LIDAR podatki primernejši za pripravo topografskih podatkov o geometriji vodnih teles in površin ter izračunu njihovih prostornin (Veljanovski, 2012).

Satelitske in letalske posnetke je potrebno po njihovi pridobitvi obdelati. Namen je, da se posnetke pripravi tako, da bo lahko njihova interpretacija omogočala kakovostno prepoznavanje površja Zemlje. Najboljše rezultate dobimo, če med seboj kombiniramo podatke različnih vrst daljinskega zaznavanja (satelitski in letalski podatki, LIDAR podatki, talne meritve). Še posebno je priporočljivo, da se pri natančnih študijah, kot so topografsko kartiranje, hidrološke analize in poplavne analize, podatke satelitskih in letalskih sistemov kombinira s podatki zračnega laserskega skeniranja. Le to ima namreč zaradi velike gostote točk in zmožnosti prodiranja skozi vegetacijo možnost prikaza mikoreliefa. S pomočjo teh posnetkov je omogočeno zmanjšanje terenskega dela in preverjanje ali izboljšanje hidroloških modelov (Veljanovski, 2012).

Za poplavo na Ljubljanskem barju septembra 2010, so izdelali študijo (Lamovec, Mikoš, Oštir), v kateri so pomočjo tehnike strojnega učenja izdelali karto poplavljenih območij. V študiji so uporabili radarske in optične satelitske posnetke, digitalni model reliefa in hidrološko mrežo. S tehniko strojnega učenja je možno hitro in natančno določanje poplavljenih območij. Pri postopku kartiranja je več korakov. Prvi in verjetno najpomembnejši je priprava vhodnih podatkov (določitev poplavljenega območja). Pri študiji so uporabili optični posnetek (RapidEye) s prostorsko ločljivostjo 6,5 m. Posnetek je bil posnet štiri dni po poplavi, ko je bila



poplavljenega še večina območja. S štirimi radarskimi posnetki (ENVISAT in RADARSAT) v dveh tednih, so spremljali upadanje poplav na območju. S pomočjo točk in segmentov so določili poplavljenega in nepoplavljenega območja. Rezultati so pokazali, da so na naravnih območjih realnejše rezultate dobili s točkami, ker so manjši, poplavljeni segmenti padli pod nepoplavljenega območja. Težave so nastale tudi pri območjih, poraščenih z drevesi in visokimi kulturnimi rastlinami, ki so prav tako pripadla nepoplavljenemu območju. Naslednji in zadnji korak predstavlja kartiranje poplavljenega območja. Pri izdelavi študije so naleteli na težave pri urbanih območjih in območjih, poraščenih z drevesi in visokimi rastlinami, saj se to rastlinje dviguje nad poplavno vodo. Rešitev za te težave bi bila uporaba LIDAR daljinskega zaznavanja, ki omogoča pridobitev podatkov z veliko natančnostjo (Lamovec, 2013).



Slika 13: Prikaz snemanja z LIDAR tehnologijo (elektronski vir:

[http://www.gu.gov.si/fileadmin/gu.gov.si/pageuploads/novice/Teksti\\_novic/LIDAR\\_opis.pdf](http://www.gu.gov.si/fileadmin/gu.gov.si/pageuploads/novice/Teksti_novic/LIDAR_opis.pdf)  
(4.4.2013))

## 5 HIDRAVLIČNI MODEL

### 5.1 Programi

#### 5.1.1 AutoCAD Civil 3D 2013

AutoCAD je svetovno najbolj razširjen CAD program, ki omogoča 2D načrtovanje, 3D modeliranje in vizualizacije (AutoCad, 2013). Z njegovo pomočjo sem izdelala relief Ljubljanskega barja, saj omogoča vnos točk, pridobljenih z LIDAR tehnologijo.

#### 5.1.2 Aquaterra

Aquaterra je dodatek k programu AutoCAD, s katerim je omogočeno urejanje in reguliranje vodotokov. S programom je omogočena hitra obdelava podatkov. Sestavljajo ga moduli Situacija, Osi, Vzdolžni profili, Prečni profili in vmesniki za HEC-RAS, MIKE 11 in MIKE 21. Z moduli je omogočeno vnašanje višinskih točk terena, izdelovanje osi (vzdolžne in prečne osi), izvoz podatkov v hidrotehnične programe HEC-RAS, MIKE 11 in MIKE 21 in še veliko drugih uporabnih ukazov. Z Aquaterra sem pripravila profile reke Ljubljanice, ki sem jih potrebovala za nadaljnje delo v programu HEC-RAS.

#### 5.1.3 MIKE 11

MIKE 11 je 1D hidravlični program za modeliranje toka vode, polutantov in premeščanja plavin. Uporablja se za študije in načrtovanje na naslednjih področjih:

- modeliranje poplavnih valov in načrtovanje protipoplavnih ukrepov,
- napovedovanje poplav v realnem času,
- analiza porušitev pregrad,
- optimizacija delovanja zadrževalnikov,
- kvaliteta vode in ekološki modeli rek in poplavnih območij,
- premeščanje plavin in enostavni morfološki model.

Uporaben je predvsem za računanje nestalnega toka velikega števila medsebojno povezanih vodotokov (CGSplus, 2013). S programom MIKE 11 sem izračunala prostornine območij v odvisnosti od nadmorske višine.

#### 5.1.4 HEC-RAS

Program HEC-RAS so razvili pri U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, za potrebe 1D hidravličnih izračunov. V program je mogoče vnašati že pripravljeno

geometrijo (podatki o vzdolžni osi, prečnih profilih, bregovih), možen pa je tudi ročni vnos geometrije. V geometriji imamo možnost vnosa različnih elementov, kot so mostovi, zadrževalniki, bočne konstrukcije... Program omogoča izračun stalnega toka, nestalnega toka, premeščanja sedimentov in analizo kvalitete vode. Rezultate si lahko ogledamo v grafični (3D pogled, X – Y pogledi, prečni profili, hidrografi...) ali tabelarni obliki (HEC-RAS, 2013). S programom HEC-RAS sem naredila izračune za nestalen tok.

## 5.2 Vodomerne postaje

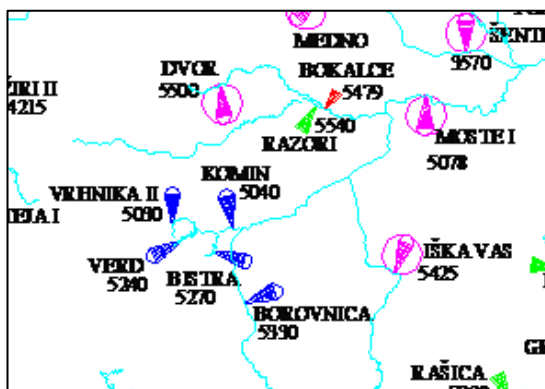
Na Ljubljanskem barju se nahaja 7 vodomernih postaj. Na Ljubljani so postavljene vodomerne postaje:

- na Vrhniku (VP Vrhnika II),
- južno od naselja Bevke, pred izlivom Borovniščice (VP Kamin),
- v Mostah v Ljubljani (VP Moste I).

Ostale vodomerne postaje so postavljene na pritokih Ljubljanice:

- na pritoku Ljubija pri naselju Verd (VP Verd I),
- na pritoku Bistra pri naselju Bistra (VP Bistra),
- na pritoku Borovniščica pri naselju Borovnica (VP Borovnica),
- na pritoku Iška pri Iški vasi (VP Iška vas).

Nekatere vodomerne postaje na Ljubljani so bile tekom let nadomeščene z novimi. Vodomerno postajo Vrhnika Most (1947 – 1952) in kasneje vodomerno postajo Vrhnika I (1953 – 1960) je nadomestila vodomerna postaja Vrhnika II, vodomerno postajo Moste (1947 – 2005) pa je nadomestila vodomerna postaja Moste I. Kar nekaj vodomernih postaj pa so ukinili, in sicer vodomerno postajo Lipe in vodomerno postajo Lipe I, vodomerno postajo Špica, vodomerno postajo Vevče ter vodomerno postajo Zgornji Kašelj (ARSO, 2013).



Slika 14: Položaj vodomernih postaj na Ljubljanskem barju (elektronski vir: [http://www.arso.gov.si/vode/podatki/arhiv/hidroloski\\_arhiv.html](http://www.arso.gov.si/vode/podatki/arhiv/hidroloski_arhiv.html) (6.5.2013))



Slika 15: Vodomerne postaja Vrhnika II (elektronski vir:

[http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov\\_arhiv\\_tab.php?p\\_vodotok=Ljubljanica&p\\_postaja=5030&p\\_let=2010&b\\_arhiv=Prika%C5%BEi](http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php?p_vodotok=Ljubljanica&p_postaja=5030&p_let=2010&b_arhiv=Prika%C5%BEi) (6.5.2013))



Slika 16: Vodomerne postaja Kamin (elektronski vir:

[http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov\\_arhiv\\_tab.php?p\\_vodotok=Ljubljanica&p\\_postaja=5040&p\\_let=2010&b\\_arhiv=Prika%C5%BEi](http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php?p_vodotok=Ljubljanica&p_postaja=5040&p_let=2010&b_arhiv=Prika%C5%BEi) (6.5.2013))

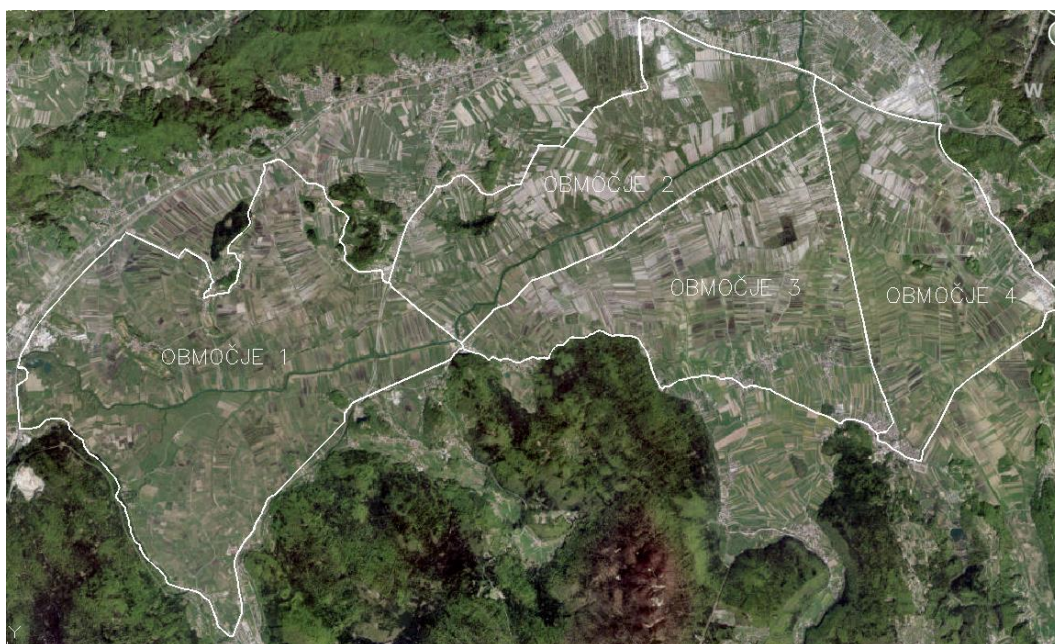


Slika 17: Vodomerne postaja Moste I (elektronski vir:

[http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov\\_arhiv\\_tab.php?p\\_vodotok=Ljubljanica&p\\_postaja=5078&p\\_let=2010&b\\_arhiv=Prika%C5%BEi](http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php?p_vodotok=Ljubljanica&p_postaja=5078&p_let=2010&b_arhiv=Prika%C5%BEi) (6.5.2013))

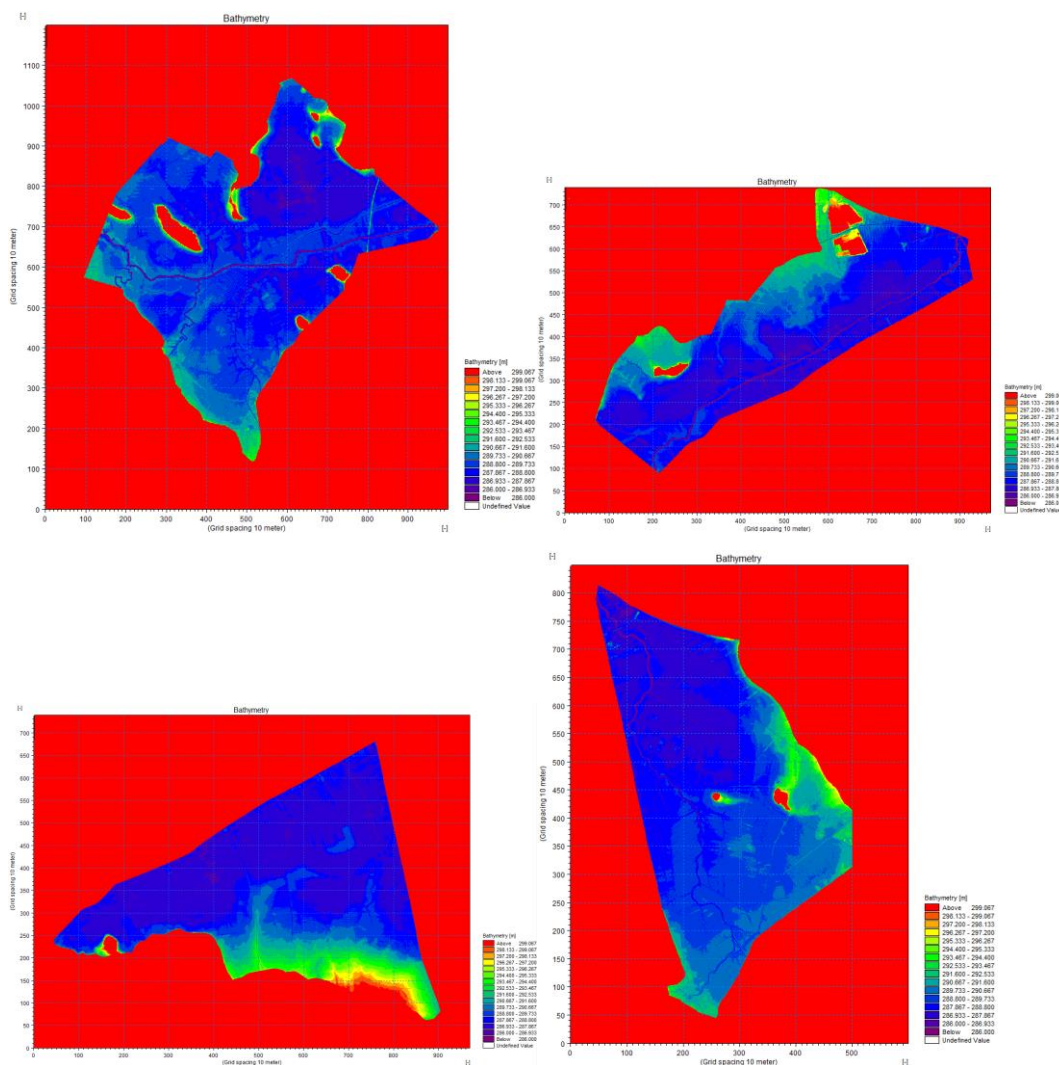
### 5.3 Volumni poplavnih območij

Poplavna območja na Ljubljanskem barju sem razdelila na 4 območja. Območje 1 se nahaja ob zgornjem toku Ljubljanice in sega do Podpeči. Obsega poplavna območja na desnem in levem bregu Ljubljanice. Območje 2 se nahaja na desnem in levem bregu Ljubljanice od Podpeči do južne ljubljanske obvoznice. Območje 3 obsega območje na desnem bregu Ljubljanice od Podpeči do Ižanske ceste (južno od ceste Črna vas). Območje 4 obsega območje na desnem bregu Ljubljanice, med Ižansko in Dolenjsko cesto. Vsa območja so jasno prikazana na sliki 18.



Slika 18: Poplavna območja na Ljubljanskem barju

S pomočjo programa MIKE 11 sem določila, kolikšna je prostornina območja na določeni nadmorski višini. Za vsako območje posebej sem pripravila batimetrijo, v katero sem uvozila prostorske podatke o terenu (LIDAR točke). S pomočjo programa sem lahko izračunala, kakšno prostornino bi zapolnila poplavna voda na določeni nadmorski višini. Rezultati so prikazani v preglednici 2. Dobljene podatke sem nato uporabila pri izračunu v programu HEC-RAS.



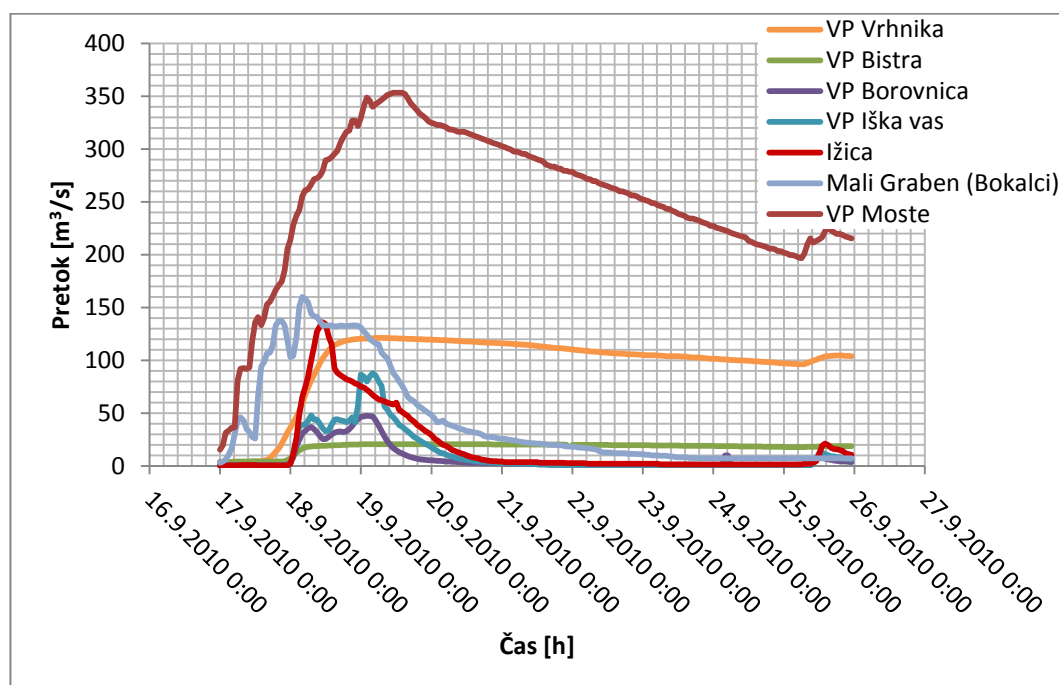
Slika 19: Batimetrije območij 1, 2, 3 in 4

Preglednica 2: Prostornine območij v odvisnosti od nadmorske višine

Območje 1		Območje 2		Območje 3		Območje 4	
H [m n. v.]	V [m <sup>3</sup> ]	H [m n. v.]	V [m <sup>3</sup> ]	H [m n. v.]	V [m <sup>3</sup> ]	H [m n. v.]	V [m <sup>3</sup> ]
286.5	150969	286.5	164448	286.5	19264	286.5	43520
287	433488	287	514720	287	141270	287	153094
287.5	1472960	287.5	2060646	287.5	2209842	287.5	707310
288	4393565	288	5391892	288	7653126	288	2563464
288.5	9461088	288.5	10555424	288.5	14681380	288.5	5701680
289	17186624	289	17050752	289	22687063	289	9656172
289.5	28340058	289.5	24259616	289.5	31232950	289.5	14807375
290	41778864	290	31912971	290	40378396	290	21390200

#### 5.4 Hidrološki model

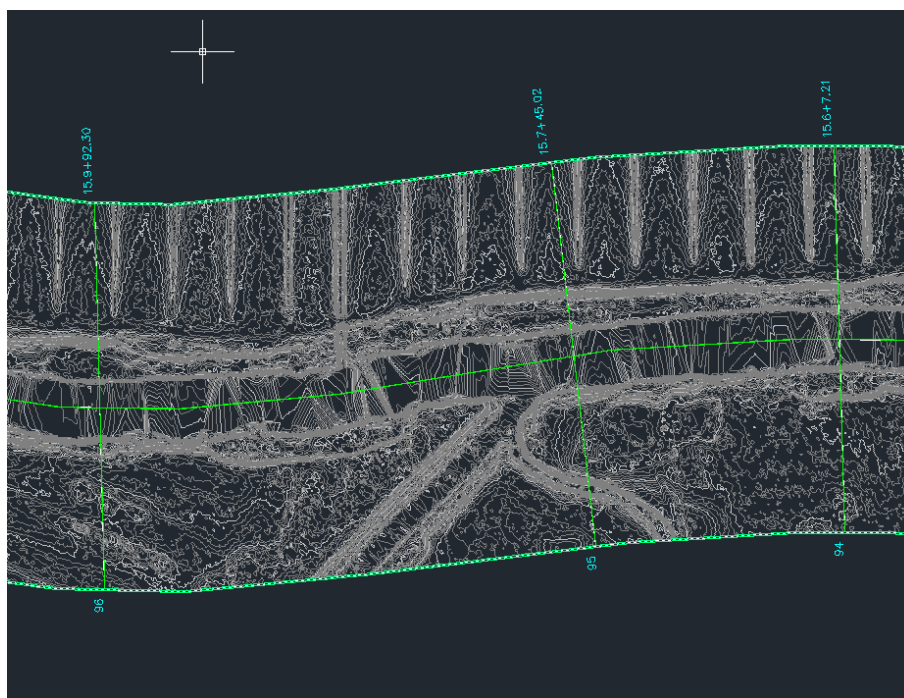
Podatke za izdelavo hidrogramov na vodomernih postajah sem pridobila od Agencije Republike Slovenije za okolje. Hidrograme sem izdelala za leto 2010 (september). Na sliki 20 so prikazani hidrogrami na vodomernih postajah Vrhnika II, Bistra, Borovnica, Iška vas, Moste I ter na pritokih Ižica in Mali Graben. Hidrogram na Ižici sem izdelala na podlagi grafa iz poročila Analiza poplavnih dogodkov v septembru 2010 v Sloveniji (Globevnik, 2012), ki ga je izdelal Inštitut za Vode Republike Slovenije. Hidrogram na Malem Grabnu pa sem povzela po študiji Določitev vpliva načrtovanih ureditev na porečju Gradaščice na Barje, območje Rudnika in Vevč, ki jo je izdelalo podjetje IZVO - R.



Slika 20: Hidrogrami Ljubljance in njenih pritokov

## 5.5 Model Ljubljanice

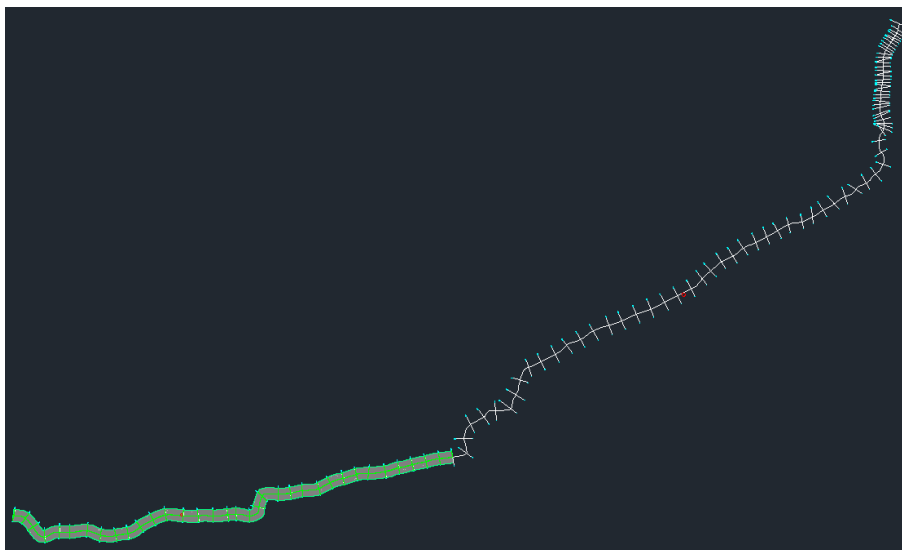
Model Ljubljanice sem pripravila s pomočjo programa AutoCAD Civil 3D. V program sem uvozila terenske podatke pridobljene s pomočjo LIDAR tehnologije (naročnika GURS in MOL) in dobila 3D potek terena.



Slika 21: 3D potek terena (sotočje Ljubljanice in Borovnišče)

Na 3D terenu se jasno vidi struga Ljubljanice, po kateri sem potegnila vzdolžno os. Vzdolžna os je definirana med sotočjem Ljubije in Ljubljanice ter Špico, kjer se Ljubljanica razdeli na mestno Ljubljanico in Gruberjev kanal. Na območju od Podpeči do Špice sem uporabila že izdelan model, ki ga je naredilo podjetje IZVO – R, ter ga združila z modelom, ki sem ga izdelala sama iz terenskih točk. Ker je bil teren posnet samo do gladine Ljubljanice, sem problem rešila tako, da sem profilom ročno dodala strugo reke. Uporabila sem strugo, ki sem jo dobila iz študije vodomerne postaje Kamin, ki jo je izdelalo podjetje IZVO – R. Prečne osi sem definirala na približno vsakih 200 m. Dolžina modela od sotočja do Špice znaša 19580,70 m, vseh prečnih profilov na odseku pa je 111. Model sem nato s pomočjo vmesnika izvozila v program HEC-RAS.



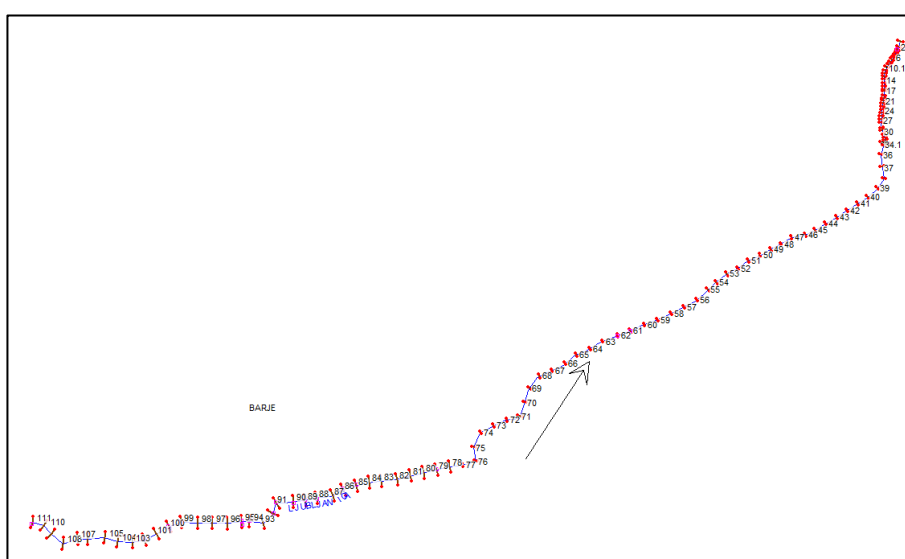


Slika 22: Obravnavani odsek Ljubljanice z vzdolžno in prečnimi osmi

## 5.6 Izračun v programu HEC-RAS (nestalni tok)

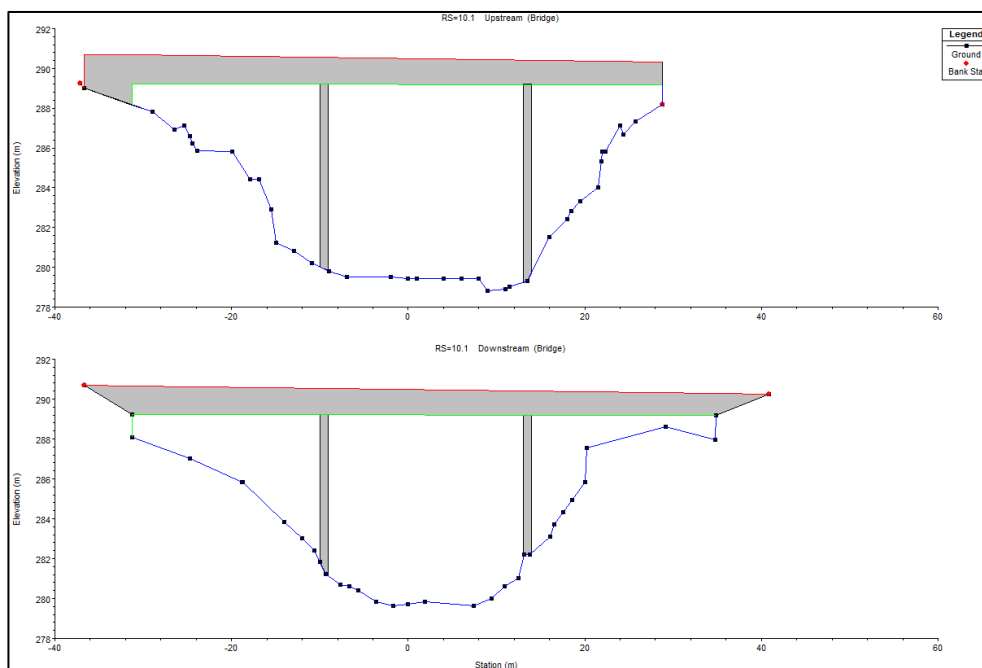
### 5.6.1 Geometrijski podatki

S pomočjo vmesnika sem v program HEC-RAS vnesla model Ljubljanice (prečni profili, situacija). Manningov koeficient sem določila na podlagi preglednice (elektronski vir, [http://www.engineeringtoolbox.com/mannings-roughness-d\\_799.html](http://www.engineeringtoolbox.com/mannings-roughness-d_799.html) (2.6.2013)), kjer sem za strugo določila koeficient 0,035 (naravna struga, večje reke), za poplavna območja pa 0,075 (poplavna območja, zaraščena).

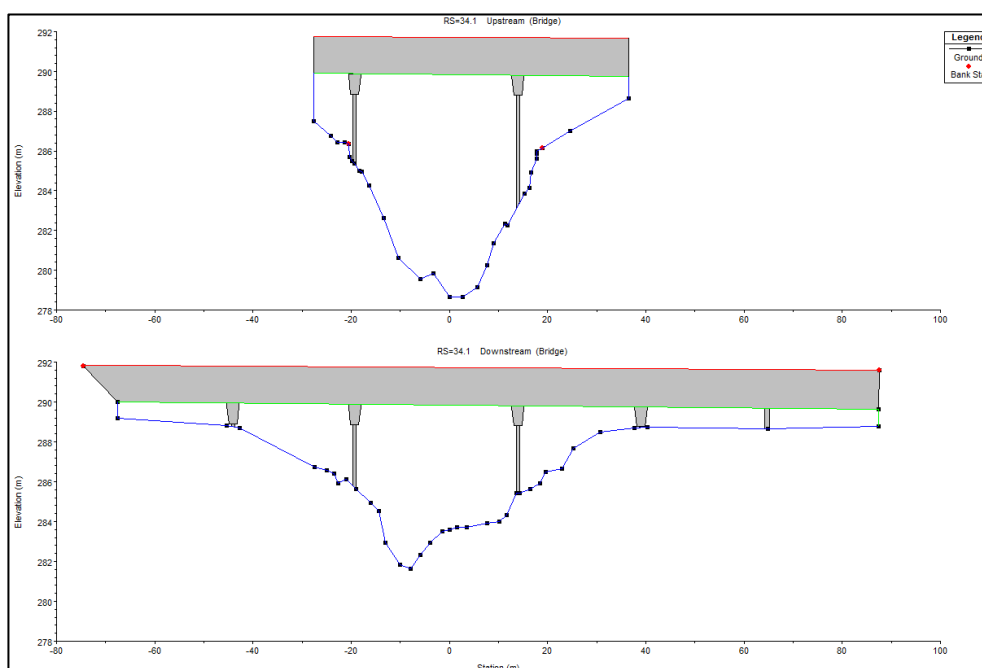


Slika 23: Situacija obravnavanega odseka Ljubljanice v programu HEC - RAS

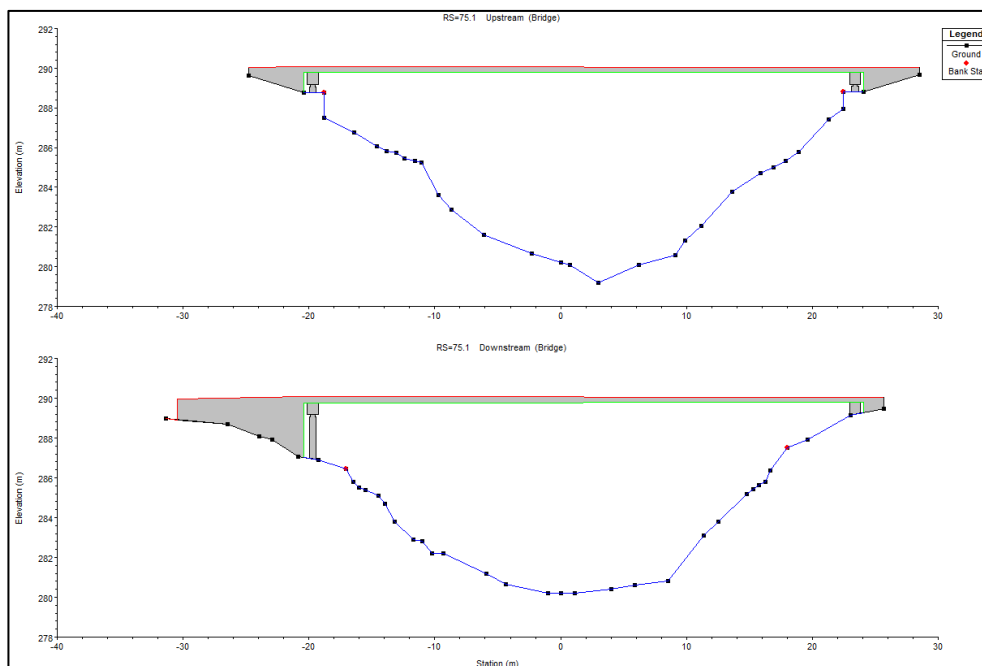
V model sem ročno vnesla tri konstrukcije mostov, ki se nahajajo pri profilih 10, 34 in 76. Podatke, ki sem jih potrebovala za vnos mostov sem povzela po modelu, ki ga je izvedlo podjetje IZVO – R. Uporabila sem podatke o oddaljenosti mostov od gorvodnega profila, širino mostov ter geometrijo gorvodne in dolvodne strani mostov.



Slika 24: Mostna konstrukcija pri prečnem profilu 10

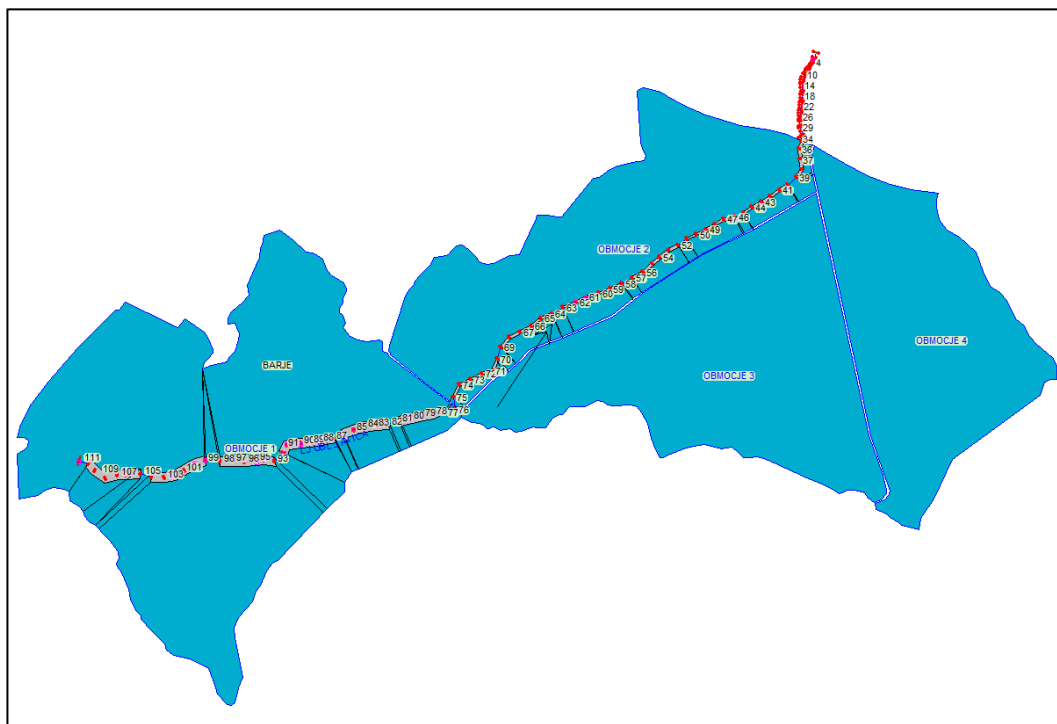


Slika 25: Mostna konstrukcija pri prečnem profilu 34



Slika 26: Mostna konstrukcija pri prečnem profilu 76

Na območju Ljubljanskega barja sem določila 4 poplavna območja, ki sem jih vrisala v model. Vsakemu poplavnemu območju sem določila prostornino poplavne vode glede na nadmorsko višino. Poplavna območja sem z vodotokom povezala z bočnimi prelevi. Bočni prelevi se tekom Ljubljanice enakomerno spuščajo. Vsak bočni preliv vsebuje 5 ali 6 prečnih profilov.



Slika 27: Poplavna območja, bočni prelevi in povezave med njimi

### 5.6.2 Robni in začetni pogoji

Robne in začetne pogoje sem vnesla za nestalni tok. Vneseni podatki izhajajo iz poplave septembra 2010. Za začetni pogoj sem vzela začetni pretok na vodomerni postaji Vrhnika II, ki je znašal  $3,571 \text{ m}^3/\text{s}$ . Začetne pogoje sem morala vnesti tudi za poplavna območja. Vsi začetni pogoji za poplavna območja so na nadmorski višini 286 m. Robnih pogojev je bilo nekaj več. Za zgornji robni pogoj sem določila hidrogram pretoka na vodomerni postaji Vrhnika II, za spodnji robni pogoj pa sem določila hidrogram gladine na vodomerni postaji Moste I. K robnim pogojem sem dodala še hidrograme pretoka petih pritokov na Ljubljanico. Glede na oddaljenost vodomernih postaj od Ljubljanice, sem podatke o pretokih nekoliko zamaknila. Hidrograme pretoka na pritoku Bistra nisem zamaknila, ker se vodomerna postaja Bistra nahaja sorazmerno blizu Ljubljanice. Hidrogram pretoka na pritoku Borovniščica sem zamaknila za 1 uro, hidrogram pretoka na pritoku Iška pa za 12 ur. Prav tako sem za 12 ur zamaknila hidrogram pretoka na pritoku Ižica. Hidrogram pretoka na pritoku Mali Graben sem zamaknila za 1 uro. Hidrograme sem dodajala na prečnih profilih, kjer se pritoki izlijejo v Ljubljanico. Bistra se v Ljubljanico izlije v prečnem profilu 103, Borovniščica v prečnem profilu 95, Iška v prečnem profilu 55, Ižica v prečnem profilu 33 in Mali Graben v prečnem profilu 4.

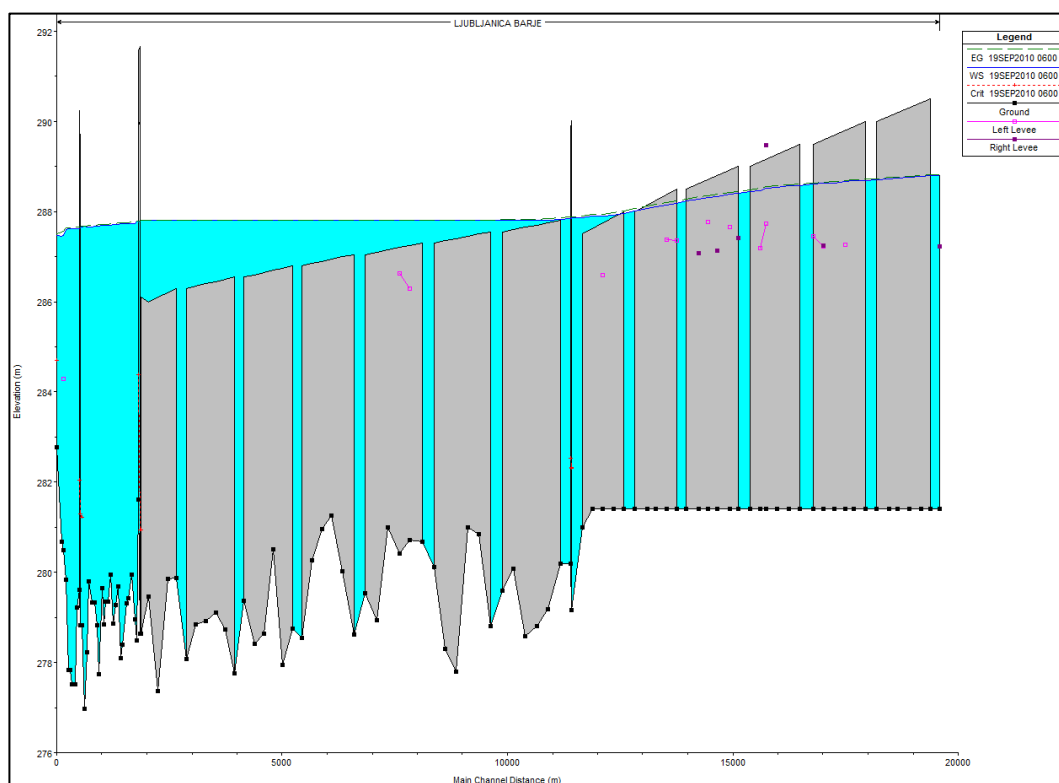
### 5.6.3 Rezultati

Rezultate sem dobila z umerjanjem na zabeležene gladine pri poplavah septembra 2010. Da sem dobila približne vrednosti, sem spreminjala vrednost Manningovega koeficienta, preizkušala različno zamaknjene hidrograme, spreminjala število bočnih prelivov ter dvigala in spuščala bočne prelive. Zgoraj navedeni podatki so že umerjeni podatki. V preglednici 3 so prikazane merjene gladine (podatke sem pridobila od podjetja IZVO – R) in najbolj primerljive izračunane gladine na različnih prečnih profilih.

Preglednica 3: Primerjava izmerjenih in izračunanih gladin

Profil	Posebnost	$H_{\text{merjeno}}$ [m n.v.]	$H_{\text{izračunano}}$ [m n.v.]	Čas konice
4	pritok Mali Graben	/	287.62	19.9.2010 09:00
5,6	merilno mesto Livada	287.58	287.63	19.9.2010 09:00
33	pritok Ižica	/	287.85	19.9.2010 12:00
50-55	merilno mesto Črna vas	288.31	287.92	19.9.2010 14:00
55	pritok Iška	/	287.92	19.9.2010 14:00
57	VP Lipe	288.36	287.92	19.9.2010 14:00
95	pritok Borovniščica	/	288.54	19.9.2010 04:00
98	VP Kamin	289.65	288.60	19.9.2010 04:00
103	pritok Bistra	/	288.70	19.9.2010 04:00

Hitrost toka se tekom Ljubljanice spreminja. Na zgornjem odseku, od sotočja Ljubljanice in Bistre do Podpeči, so hitrosti večje (od 0,6 m/s do 1,1 m/s), na odseku med Podpečjo in južno ljubljansko obvoznico se hitrosti močno zmanjšajo (ponekod pade hitrost pod 0 m/s), potem pa se hitrost ponovno poveča (do 1,4 m/s). Podobno se spreminja tudi Freudovo število (od 0,08 do 0,15 zgoraj, potem pada - tudi do 0, ter narašča proti koncu do 0,23).

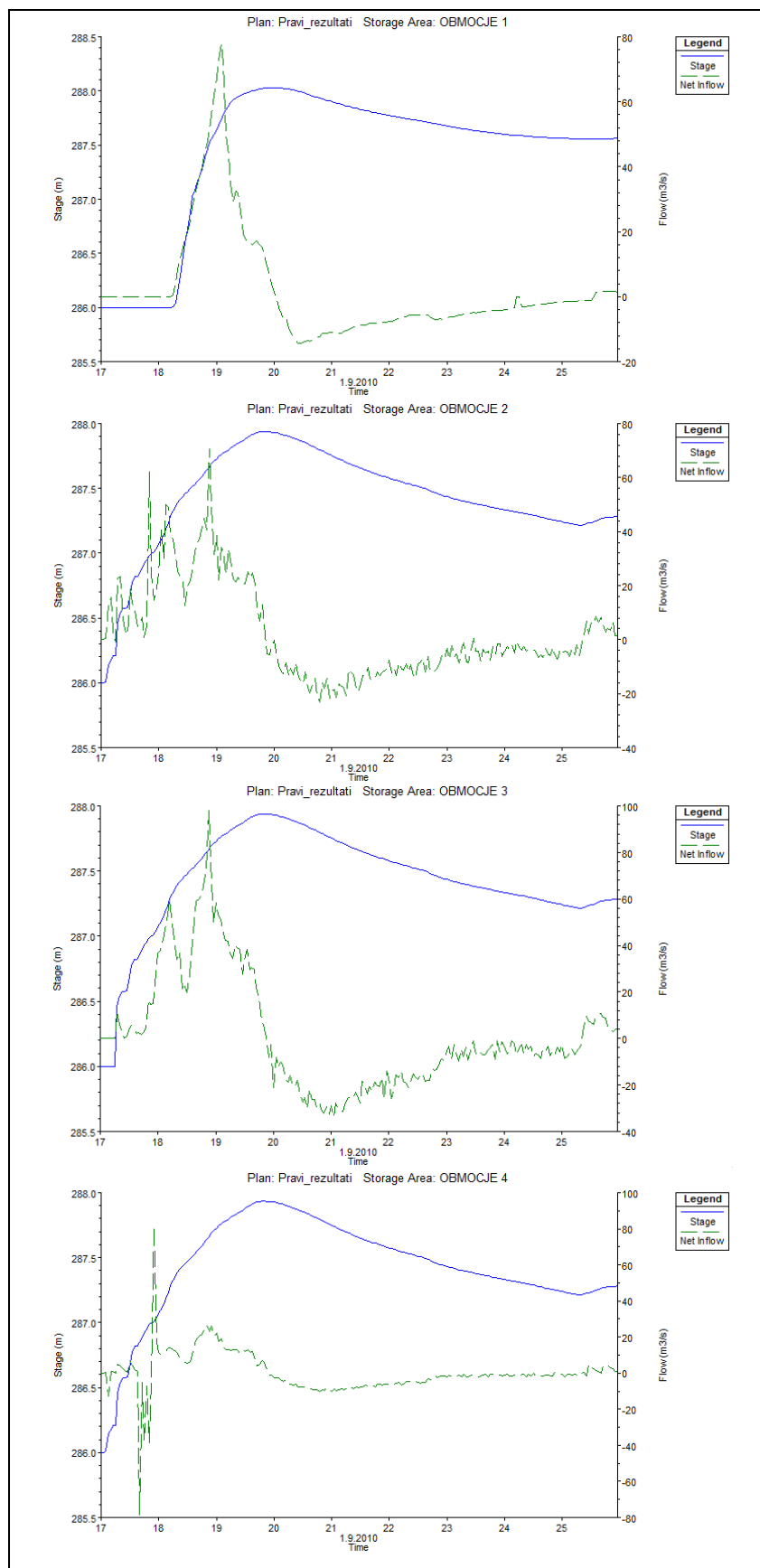


Slika 28: Gladina vzdolž Ljubljanice 19.9.2010 ob 6:00

Na poplavnih območjih sem kot rezultate dobila višine gladin, prostornine poplavljenih območij ter pripadajoči časi. Najmanj je bilo poplavljen območje 4, najbolj pa območje 3. Medtem, ko so območja 2, 3 in 4 imela konico 19.9.2010 ob 19:00, je območje 1 doseglo višek 5 ur kasneje. Najvišjo gladino je poplavna voda dosegla na območju 1, najmanjšo pa na območju 4.

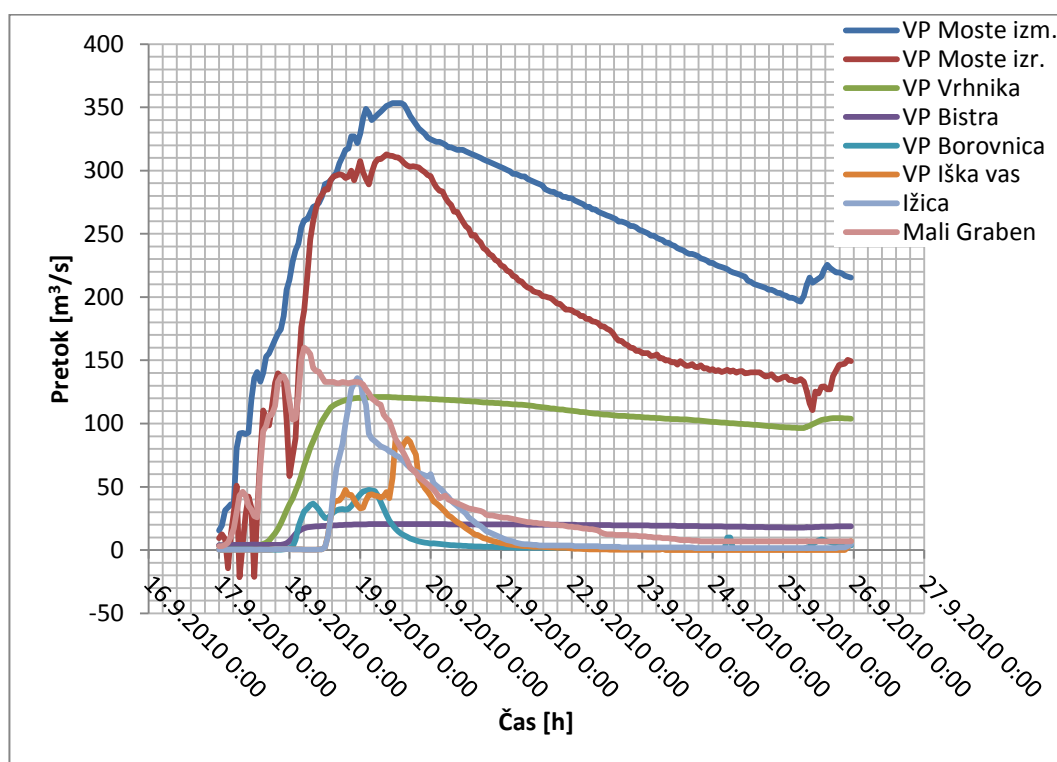
Preglednica 4: Najvišje gladine, prostornine ter pripadajoči časi za poplavna območja

	Hmax [m n. v.]	t [h]	V [1000 m <sup>3</sup> ]
Območje 1	288.02	19.9.2010 18:00	4564.3
Območje 2	287.92	19.9.2010 16:00	4850.44
Območje 3	287.92	19.9.2010 16:00	6774.71
Območje 4	287.91	19.9.2010 16:00	2246.7



Slika 29: Časovni prikaz poteka gladine in pretoka na območjih 1, 2, 3 in 4 za leto 2010

Maksimalni dotok na obravnavano območje je znašal 573,038 m<sup>3</sup>/s (seštevek maksimalnih pretokov Ljubljanice pri vodomerni postaji Vrhnika II, Bistre, Borovniščiце, Iške, Ižice in Malega Grabna), maksimalni odtok pri vodomerni postaji Moste I pa je znašal 312,8 m<sup>3</sup>/s. Primerjava hidrogramov pretoka je prikazana na sliki 30. Izračunan pretok je od dejanskega pretoka iz leta 2010 manjši, kar pomeni, da je v modelu premalo vode.



Slika 30: Primerjava hidrogramov pretoka na vodomernih postajah (umerjeni model)

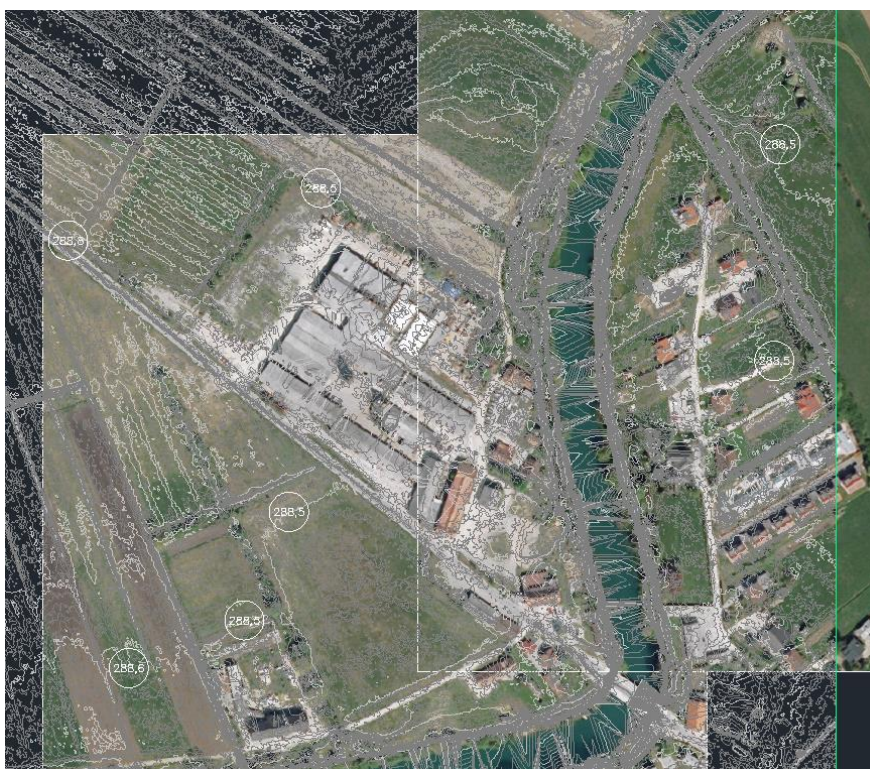
#### 5.6.4 Komentar rezultatov

Rezultati dobljeni z umerjanjem ne predstavljajo dejanskega hidravličnega stanja Ljubljanskega barja pri poplavih leta 2010. Izračunana gladina na zgornjem toku Ljubljanice se od dejanske izmerjene gladine na vodomerni postaji Kamin razlikuje za približno 1 m. Razlika v gladinah je lahko posledica tega, da je model Ljubljanskega barja zelo težaven, saj ima Ljubljanica mnogo pritokov. Zaradi tako velike razlike v višinah, sem s pomočjo video posnetka na spletni strani Youtube, ki ga je objavil MORStudio, preverila, kolikšna je bila višina vode ob mostu pri Podpeči. Na posnetku sem določila očitne robove poplave (označeno z modrimi krogi) ter mesta približno označila na risbi v programu AutoCad. Za lažje prepoznavanje teh mest, sem imela v programu AutoCad pod plastnicami, narejenimi iz LIDAR točk, podlogo iz Atlasa okolja.



Slika 31: Most pri Podpeči posnet iz zraka ob septembrskih poplavah leta 2010 (elektronski vir: <http://www.youtube.com/watch?v=PPiJRdhZ3HI> (24.9.2013))

V programu AutoCad sem odčitala višinske kote terena na določenih mestih in tako dobila kote poplavnih robov. Označena mesta so bila na višini okoli 288,5 m n. v., torej lahko rečemo, da so podatki iz vodomernih postaj točni.



Slika 32: Območje pri Podpeči s prikazanimi višinskimi kotami

Eno izmed težav predstavlja tudi polnjenje poplavnih območij. Glede na rezultate umerjanja, naj bi poplavna voda na območju 1 dosegla svojo najvišjo vrednost dve uri kasneje kot ostala območja, vendar bi se moralo območje 1 napolniti prvo, ker leži ob zgornjem toku Ljubljanice.

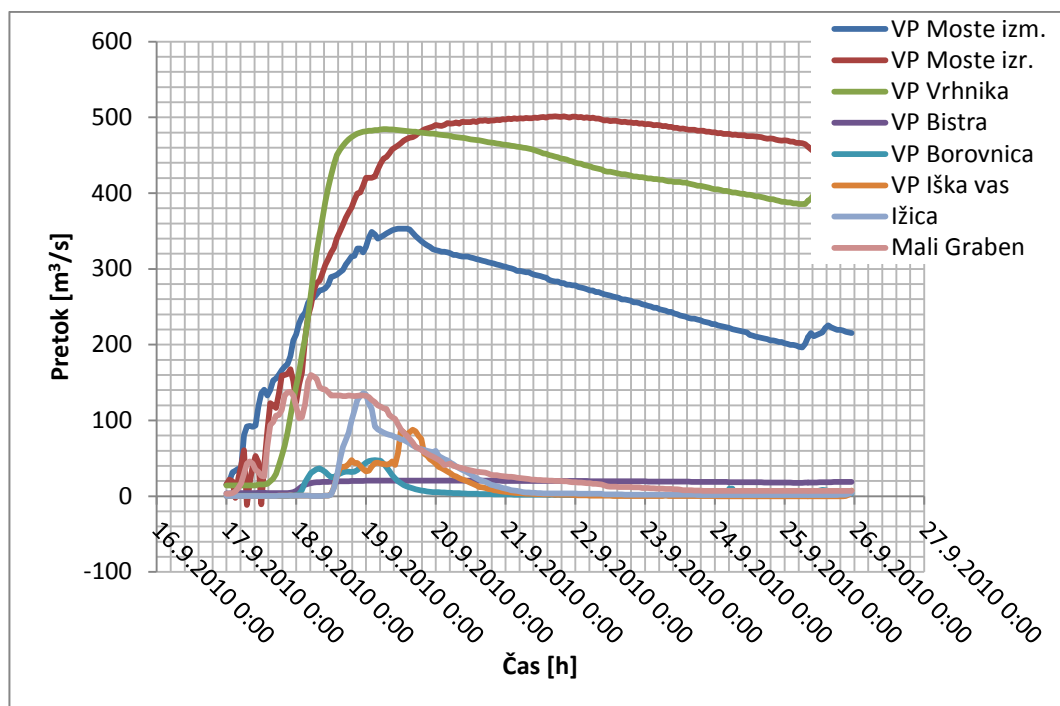


### 5.7 Izračun v programu HEC-RAS (spreminjanje hidroloških podatkov)

Z umerjanjem modela na poplave 2010, sem dobila prenizke gladine na zgornjem odseku Ljubljanice in napačno časovno polnjenje poplavnih območij. To sem poizkušala popraviti s spreminjanjem hidroloških podatkov. Naredila sem izračune tako, da sem:

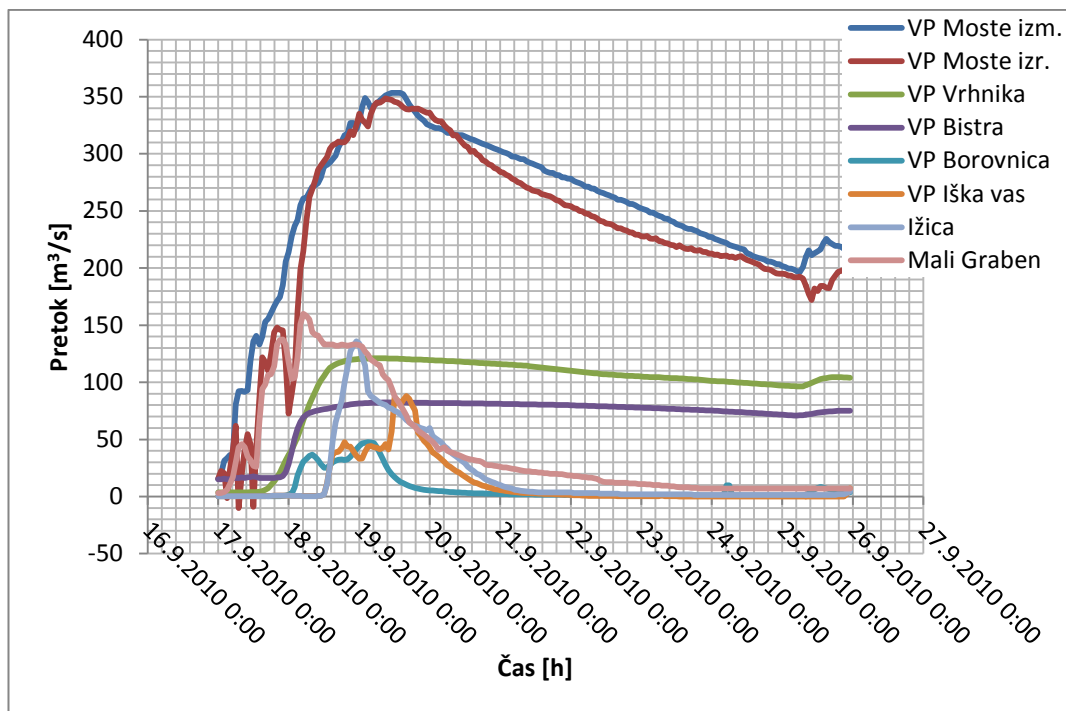
- odštela pretoke iz hidrogramov pretoka na vodomerni postaji Moste I (dejanske od izračunanih) ter dobljeno razliko prištela hidrogramu na vodomerni postaji Vrhnika II,
- povečala vhodni hidrogram na vodomerni postaji Vrhnika II (za 1-krat, 2-krat, 3-krat in 4-krat),
- povečala vse pritoke (2-krat in 3-krat),
- povečala le pritok Bistra (4-krat in 5-krat),
- povečala pritoka Bistra in Borovniščico (2-krat, 3-krat, 3,5-krat, 3,9-krat, 4,5-krat, 5-krat in 6-krat).

Gladine na zgornjem delu Ljubljanice, pri vodomerni postaji Kamin, nisem dosegla pri nobenem izračunu. Še najbližje koti 289,65 m n. v., sem prišla s povečanjem pretoka na vodomerni postaji Vrhnika II za 4-krat. Ta kota je znašala 289,53 m n. v., torej je bila za 12 cm nižja od izmerjene. Popravilo se je tudi polnjenje poplavnih območij. Poplavna voda na območju 1 je dosegla svojo najvišjo vrednost 7 ur pred ostalimi območji. Vendar je bil pretok pri tem izračunu na vodomerni postaji Moste I občutno prevelik, saj je maksimalni odtok dosegel vrednost 501,49 m<sup>3</sup>/s (septembra 2010 je znašal izmerjeni maksimalni pretok na vodomerni postaji Moste I 353 m<sup>3</sup>/s). Iz slike 33 je razvidno, da je tudi pretok na vodomerni postaji Vrhnika II občutno prevelik, saj celo presega dejanski pretok na vodomerni postaji Moste I.

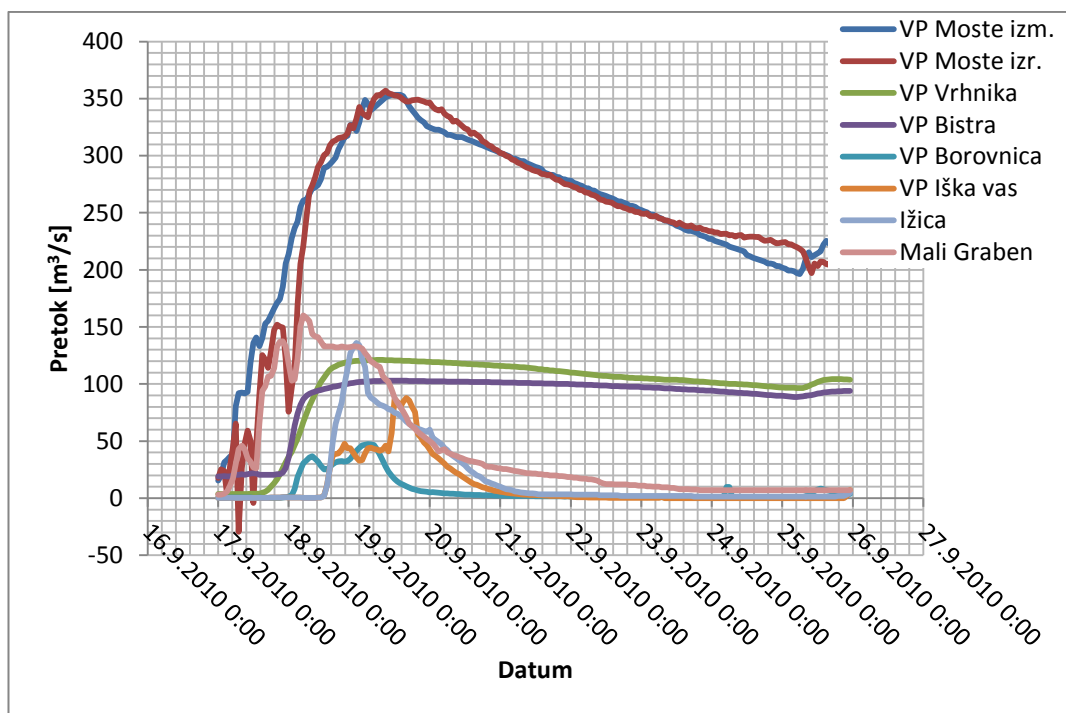


Slika 33: Primerjava hidrogramov pretoka na vodomernih postajah (pretok na VP Vrhnika II povečan za 4-krat)

Najbolj primerljiv hidrogram pretoka sem dosegla, ko sem povečevala pretok Bistri. Oba izračuna (4-krat in 5-krat povečan pretok) sta dala podoben hidrogram pretoka na vodomerni postaji Moste I, kot je bil dejanski hidrogram pretoka septembra 2010. Polnjenje poplavnih območij je bilo ponovno napačno. Pri obeh izračunih je gladina poplavne vode na območju 1 dosegla največjo vrednost nekaj ur kasneje kot na ostalih območjih. Pri teh dveh izračunih je bila gladina vode pri vodomerni postaji Kamin prenizka. Pri 4-krat povečanem pretoku Bistre je gladina Ljubljanice dosegla 289 m n. v., pri 5-krat povečanem pa je dosegla 289,11 m n. v.. Podobne rezultate sem dobila tudi pri izračunih, ko sem povečala pretok na vodomerni postaji Vrhnika II za razliko pretokov na vodomerni postaji Moste I, pri 2-krat povečanem pretoku na vodomerni postaji Vrhnika II ter pri povečanju pretokov Bistre in Borovnišnice za 2-krat, 3-krat in 3,5-krat. Vendar so imeli ti rezultati večja odstopanja.



Slika 34: Primerjava hidrogramov pretoka na vodomernih postajah (pretok na VP Bistra povečan za 4-krat)



Slika 35: Primerjava hidrogramov pretoka na vodomernih postajah (pretok na VP Bistra povečan za 5-krat)

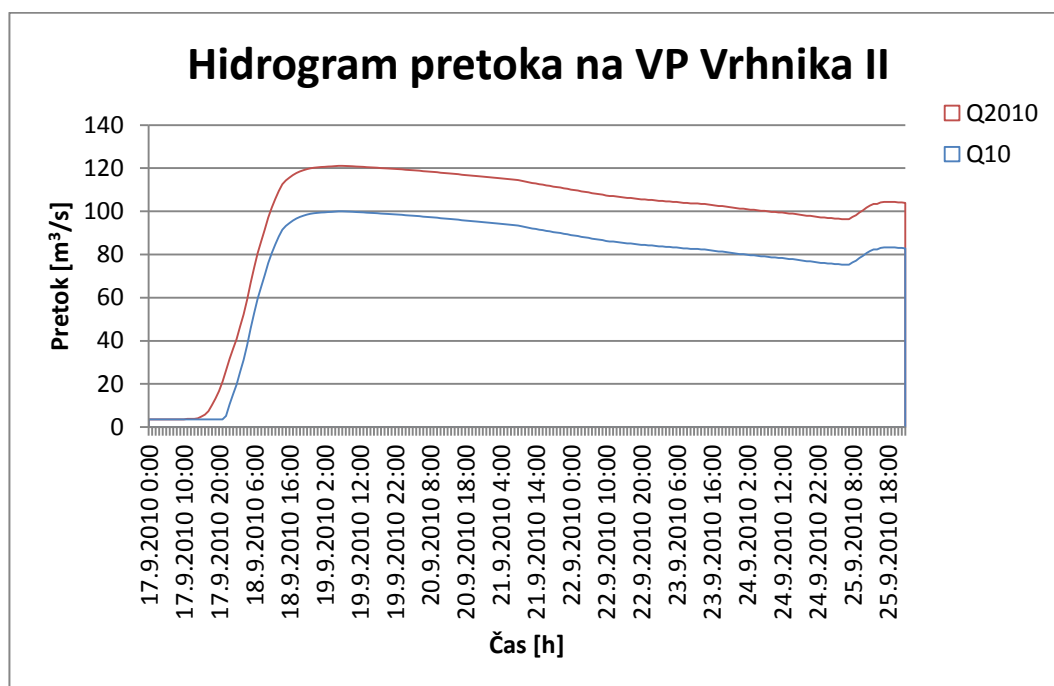
## 5.8 Izračun v programu HEC-RAS ( $Q_{10}$ )

### 5.8.1 Geometrijski podatki

Geometrijskih podatkov pri računanju  $Q_{10}$  nisem spreminjala.

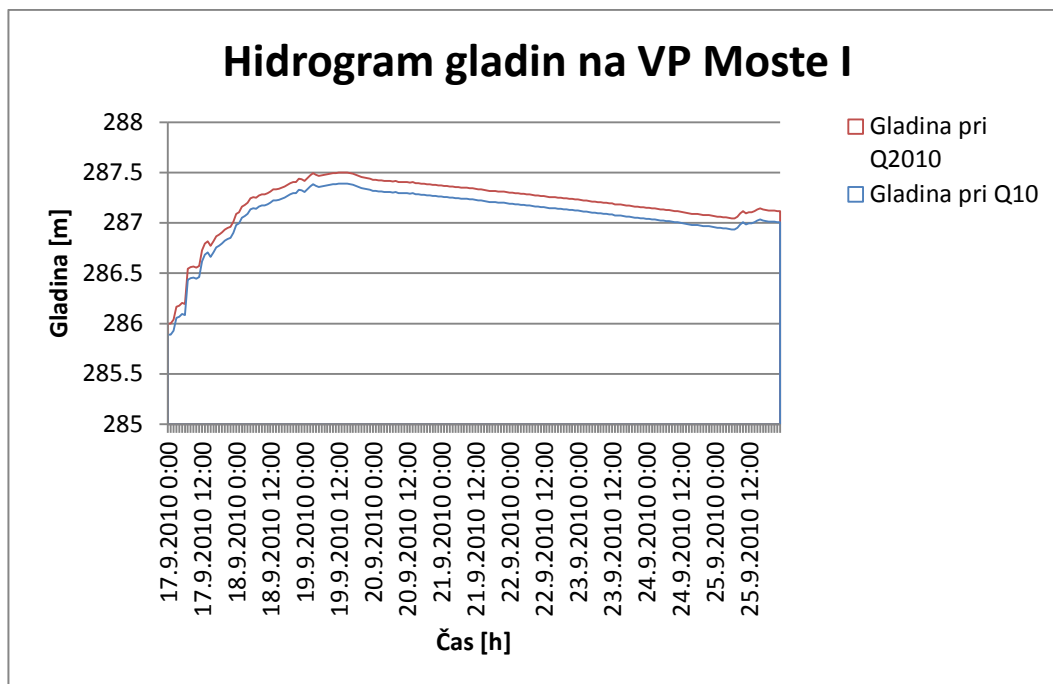
### 5.8.2 Robni in začetni pogoji

Za izračun visoke vode  $Q_{10}$ , sem morala podatke nekoliko prilagoditi. Iz študije Hidravlični izračun gladin na vodomerni postaji Vrhnika II, ki jo je izdelalo podjetje IZVO – R, sem povzela podatek o visoki vodi  $Q_{10}$ , ki znaša  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  (gladina se pri tem pretoku nahaja na  $290,24 \text{ m n. v.}$ ). Od največjega pretoka iz leta 2010 sem odštela pretok  $Q_{10}$  in dobljeno razliko uporabila za zmanjšanje hidrograma pretoka iz leta 2010.



Slika 36: Hidrogram pretoka na VP Vrhnika II ( $Q_{2010}$  in  $Q_{10}$ )

Na isti način (kot pri vodomerni postaji Vrhnika II) sem predelala hidrogram pretoka na vodomerni postaji Moste I. Podatek o visoki vodi  $Q_{10}$  sem povzela iz študije Izdelava kart poplavne nevarnosti za območje Rudnika, ki jo je izdelalo podjetje IZVO. Pretok  $Q_{10}$  znaša  $337 \text{ m}^3/\text{s}$ , gladina pri  $Q_{10}$  pa znaša  $287,39 \text{ m n. v.}$ . Ostale podatke sem pustila enake kot pri umerjanju modela.



Slika 37: Hidrogram gladin na VP Moste I ( $Q_{2010}$  in  $Q_{10}$ )

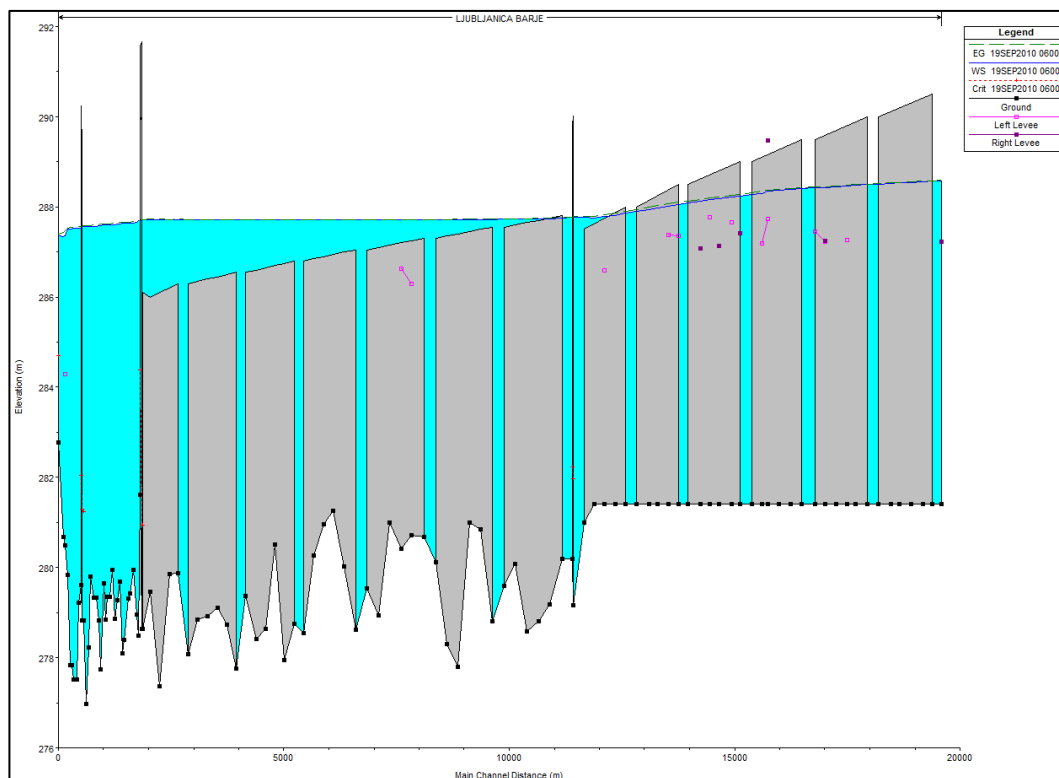
### 5.8.3 Rezultati

V preglednici 5 so prikazani rezultati računa  $Q_{10}$  in rezultati računa za leto 2010. Gladine vzdolž Ljubljance so pri izračunu  $Q_{10}$  manjše kot leta 2010, iz česar lahko sklepamo, da so poplavne vode leta 2010 presegle 10-letne visoke vode.

Preglednica 5: Gladine pri  $Q_{10}$  in leta 2010

Profil	Posebnost	$H_{2010}$ [m n.v.]	$H_{Q_{10}}$ [m n.v.]
4	pritok Mali Graben	287.62	287.52
5,6	merilno mesto Livada	287.63	287.53
33	pritok Ižica	287.87	287.74
50-55	merilno mesto Črna vas	287.94	287.81
55	pritok Iška	287.94	287.81
57	VP Lipe	287.94	287.81
95	pritok Borovniščica	288.53	288.37
98	VP Kamin	288.59	288.42
103	pritok Bistra	288.69	288.5

Hitrost toka Ljubljance ter Freudovo število se spreminjata enako in imata podobne vrednosti kot pri umerjenem modelu.

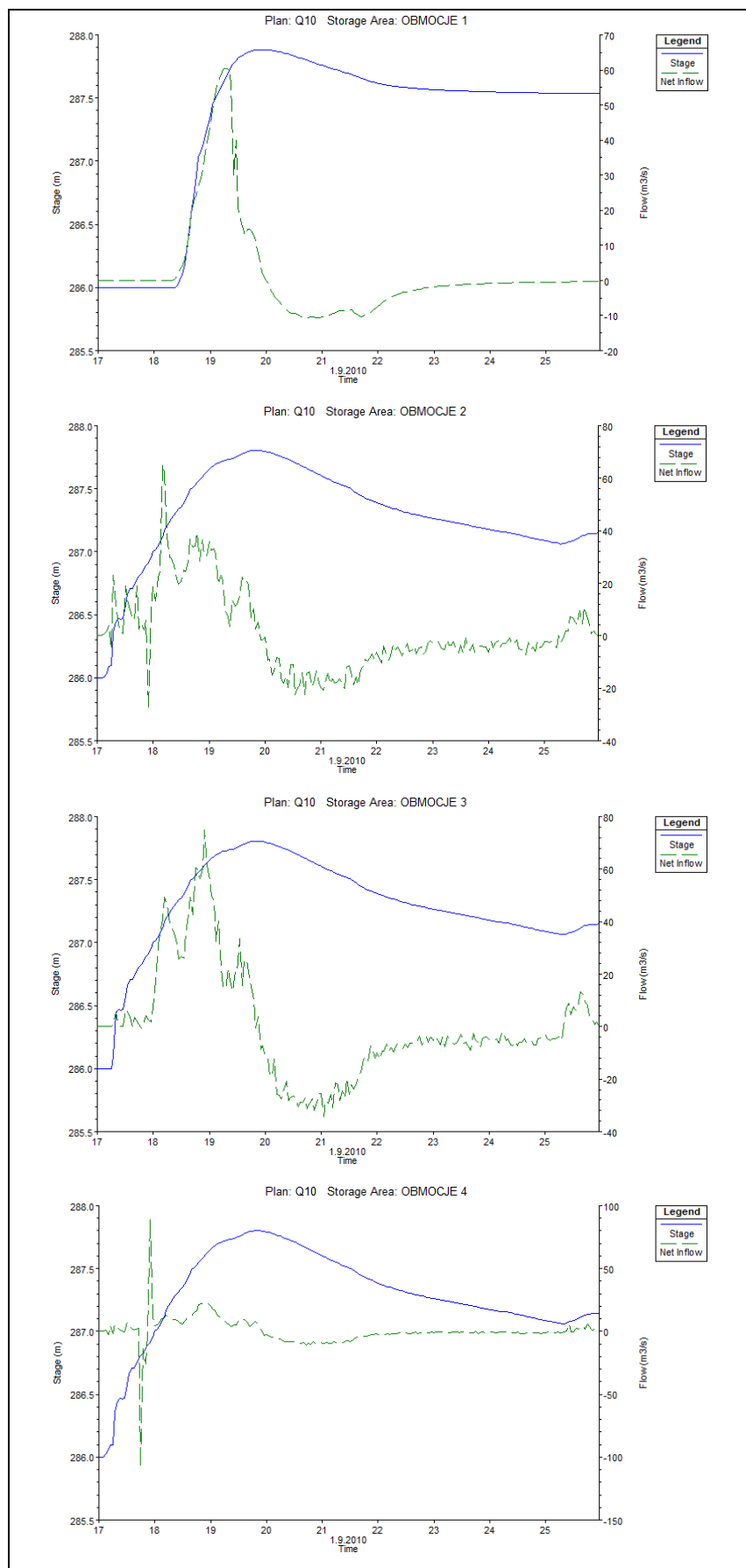


Slika 38: Gladina vzdolž Ljubljanice pri  $Q_{10}$

Gladine na poplavljenih območjih ter prostornine poplavne vode so prikazane v preglednici 6. Pri primerjavi rezultatov izračunov  $Q_{10}$  in  $Q_{2010}$  se vidi, da je pri  $Q_{10}$  prostornina poplavljenega območja veliko manjša kot leta 2010. Še vedno pa je najbolj poplavljen območje 3, najmanj pa območje 4. Prav tako je gladina na območju 1 najvišja, na območju 4 pa najnižja.

Preglednica 6: Najvišje gladine in prostornine na poplavnih območjih za  $Q_{10}$  ter  $Q_{2010}$

	$Q_{10}$		$Q_{2010}$	
	$H_{\max}$ [m n. v.]	V [1000 m <sup>3</sup> ]	$H_{\max}$ [m n. v.]	V [1000 m <sup>3</sup> ]
Območje 1	287.88	3710.65	288.03	4687.71
Območje 2	287.81	4096.93	287.94	4984.23
Območje 3	287.81	5543.79	287.94	6993.31
Območje 4	287.8	1827.53	287.93	2321.02



Slika 39: Časovni prikaz poteka gladine in pretoka na območjih 1, 2, 3 in 4 za  $Q_{10}$

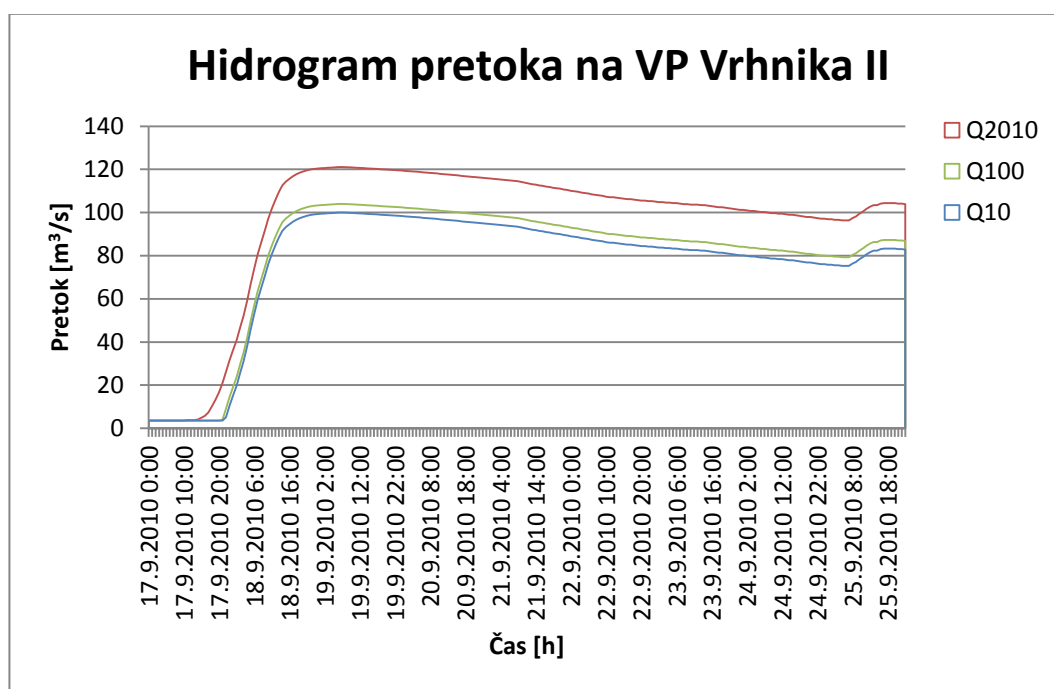
## 5.9 Izračun v programu HEC-RAS ( $Q_{100}$ )

### 5.9.1 Geometrijski podatki

Geometrijskih podatkov pri računanju  $Q_{100}$  nisem spreminjala.

### 5.9.2 Robni in začetni pogoji

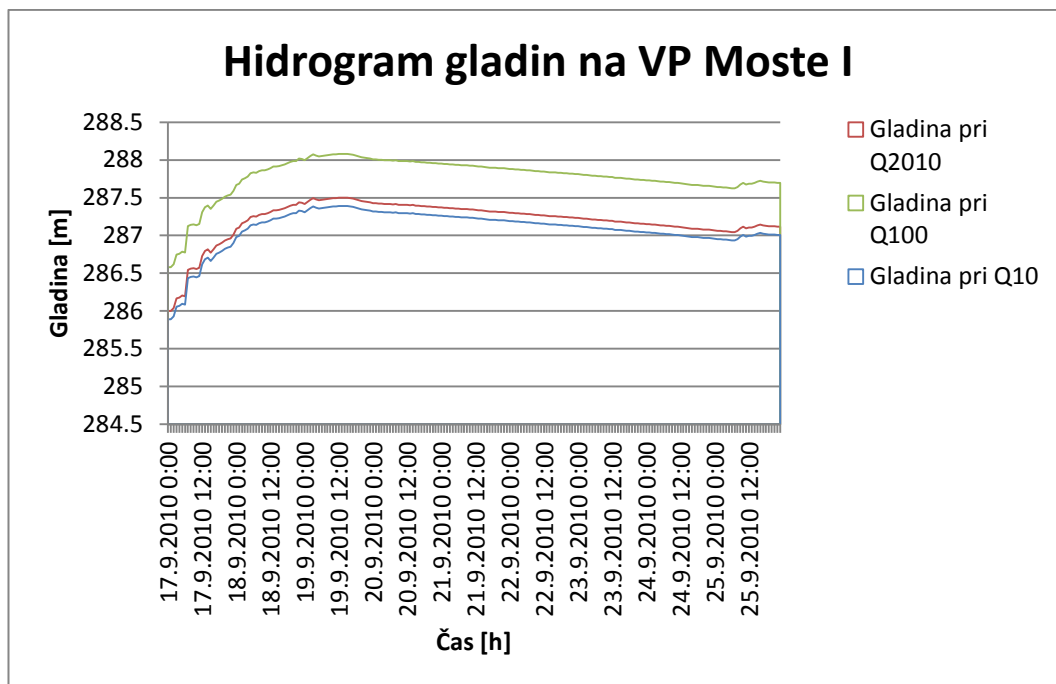
Za izračun visoke vode  $Q_{100}$ , sem morala podatke spet prilagoditi. Iz študije Hidravlični izračun gladin na vodomerni postaji Vrhnika II, ki jo je izdelalo podjetje IZVO – R, sem povzela podatek o visoki vodi  $Q_{100}$ , ki znaša  $104 \text{ m}^3/\text{s}$  (gladina se pri tem pretoku nahaja na  $290,36 \text{ m n. v.}$ ). Od največjega pretoka iz leta 2010 sem odštela pretok  $Q_{100}$  in dobljeno razliko uporabila za zmanjšanje hidrograma pretoka iz leta 2010.



Slika 40: Hidrogram pretoka na VP Vrhnika II ( $Q_{2010}$ ,  $Q_{100}$  in  $Q_{10}$ )

Na isti način (kot pri vodomerni postaji Vrhnika II) sem predelala hidrogram pretoka na vodomerni postaji Moste I, le da sem v tem primeru od pretoka  $Q_{100}$  odštela največji pretok leta 2010 ter dobljeno razliko uporabila za zvečanje hidrograma pretoka iz leta 2010. Podatek o visoki vodi  $Q_{100}$  sem povzela iz študije Izdelava kart poplavne nevarnosti za območje Rudnika, ki jo je izdelalo podjetje IZVO. Pretok  $Q_{100}$  znaša  $454 \text{ m}^3/\text{s}$ , gladina pri  $Q_{100}$  pa znaša  $288,08 \text{ m n. v.}$  Ostale podatke sem pustila enake kot pri umerjanju modela.





Slika 41: Hidrogram gladin na VP Moste I ( $Q_{2010}$ ,  $Q_{100}$  in  $Q_{10}$ )

### 5.9.3 Rezultati

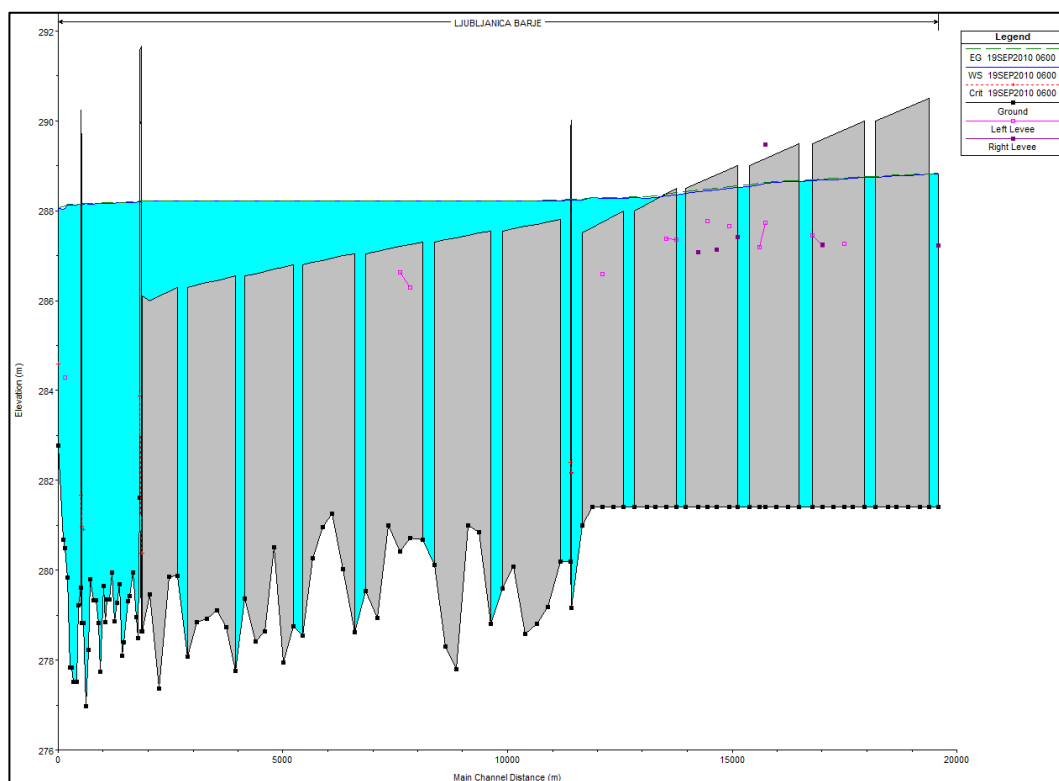
V preglednici 7 so prikazani rezultati računa  $Q_{100}$  in rezultati računa za leto 2010. Gladine vzdolž Ljubljanice so pri izračunu  $Q_{100}$  večje kot leta 2010, iz česar lahko sklepamo, da poplavne vode leta 2010 niso presegle 100-letne visoke vode.

Preglednica 7: Gladine pri  $Q_{100}$  in leta 2010

Profil	Posebnost	$H_{2010}$ [m n.v.]	$H_{Q_{100}}$ [m n.v.]
4	pritok Mali Graben	287.62	288.14
5,6	merilno mesto Livada	287.63	288.15
33	pritok Ižica	287.87	288.3
50-55	merilno mesto Črna vas	287.94	288.34
55	pritok Iška	287.94	288.34
57	VP Lipe	287.94	288.34
95	pritok Borovniščica	288.53	288.62
98	VP Kamin	288.59	288.66
103	pritok Bistra	288.69	288.73

Hitrost toka se tekom Ljubljanice spreminja. Na zgornjem odseku, od sotočja Ljubljanice in Bistre do Podpeči, so hitrosti večje (od 0,49 m/s do 0,93 m/s), na odseku med Podpečjo in južno ljubljansko obvoznico se hitrosti močno zmanjšajo (ponekod pade hitrost pod 0 m/s), potem pa se hitrost ponovno poveča (do 1,03 m/s). Hitrosti so pri  $Q_{100}$  torej nekoliko manjše kot pri  $Q_{2010}$ .

Podobno se spreminja tudi Freudovo število (od 0,07 do 0,13 zgoraj, potem pada - tudi do 0, ter narašča proti koncu do 0,16). Tudi Freudovo število je v primeru  $Q_{100}$  manjše kot pri  $Q_{2010}$ .

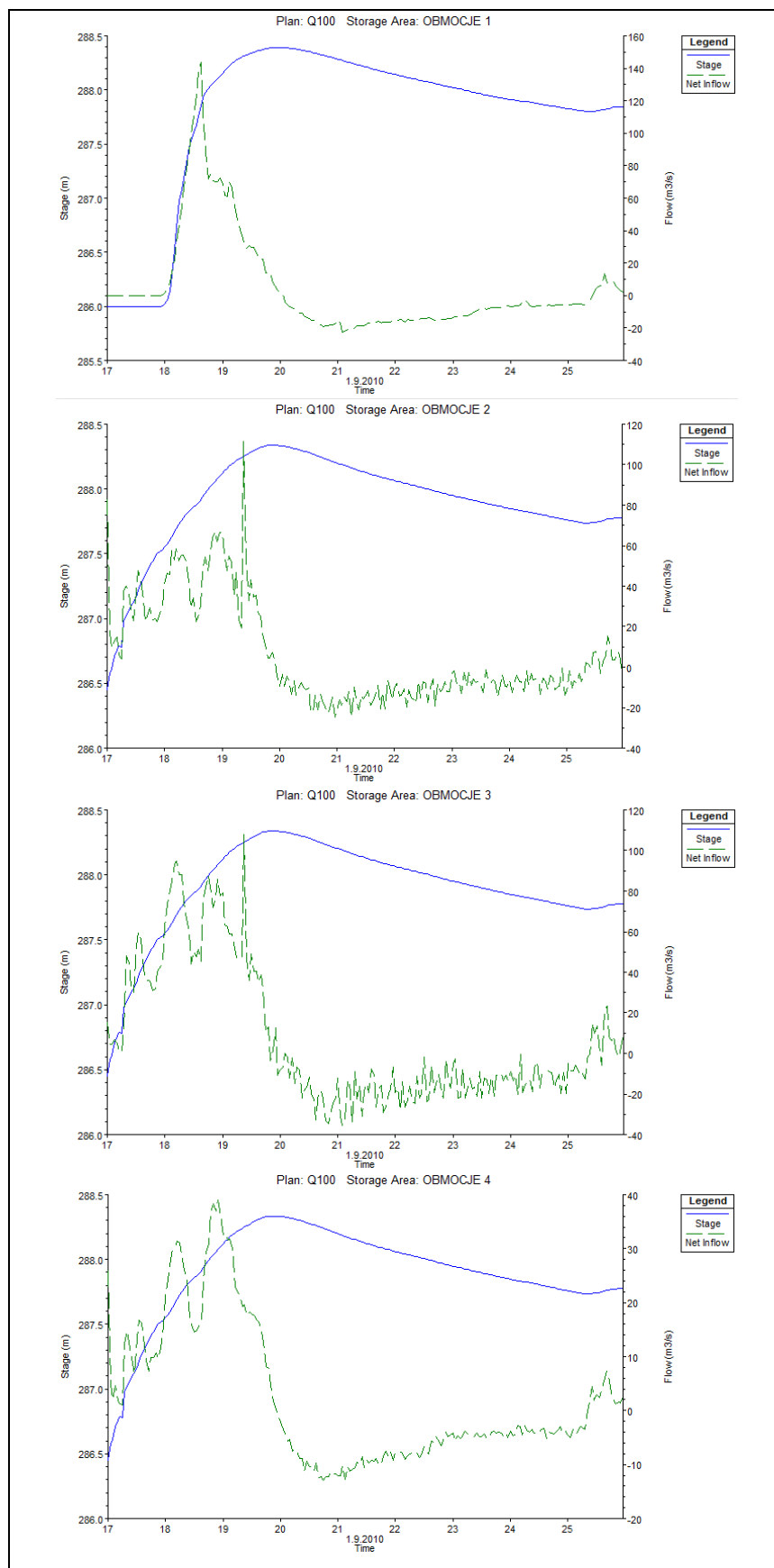


Slika 42: Gladina vzdolž Ljubljanice pri  $Q_{100}$

Gladine na poplavljenih območjih ter prostornine poplavne vode so prikazane v preglednici 8. Pri primerjavi rezultatov izračunov  $Q_{100}$  in 2010 se vidi, da je pri  $Q_{100}$  prostornina poplavljenega območja veliko večja kot leta 2010. Še vedno pa je najbolj poplavljenno območje 3, najmanj pa območje 4. Prav tako je gladina na območju 1 najvišja, na območju 4 pa najnižja.

Preglednica 8: Najvišje gladine in prostornine na poplavnih območjih za  $Q_{100}$  ter  $Q_{2010}$

	$Q_{100}$		$Q_{2010}$	
	$H_{\max}$ [m n. v.]	V [1000 m <sup>3</sup> ]	$H_{\max}$ [m n. v.]	V [1000 m <sup>3</sup> ]
Območje 1	288.39	8370.2	288.03	4687.71
Območje 2	288.34	8876.58	287.94	4984.23
Območje 3	288.34	12402.26	287.94	6993.31
Območje 4	288.33	4663.53	287.93	2321.02



Slika 43: Časovni prikaz poteka gladine in pretoka na območjih 1, 2, 3 in 4 za  $Q_{100}$

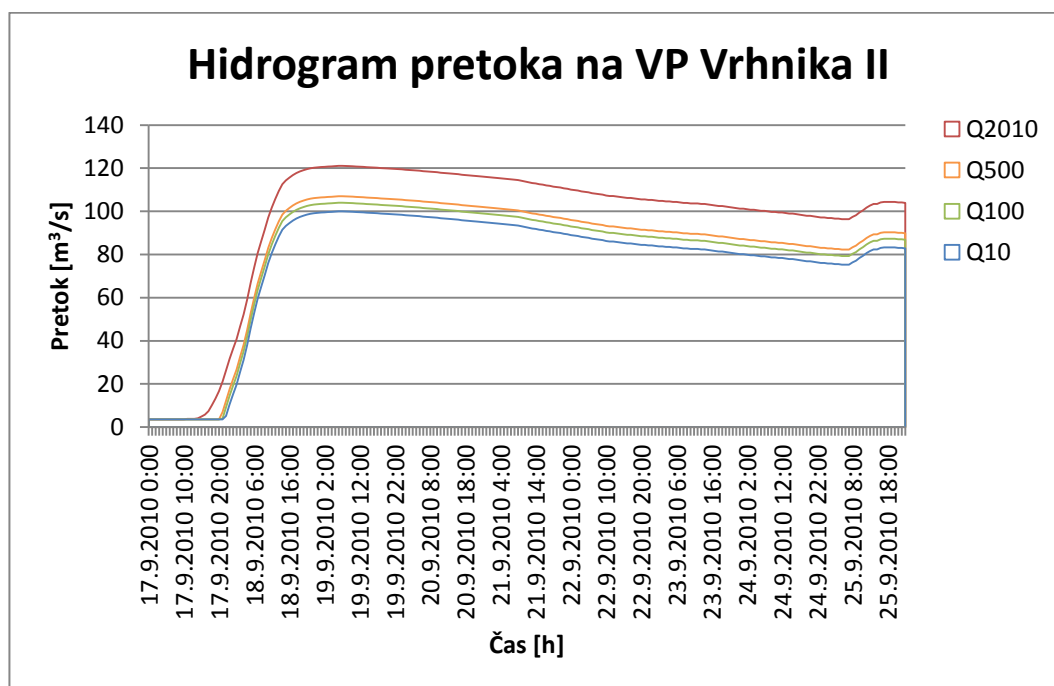
## 5.10 Izračun v programu HEC-RAS ( $Q_{500}$ )

### 5.10.1 Geometrijski podatki

Geometrijskih podatkov pri računanju  $Q_{500}$  nisem spreminjala.

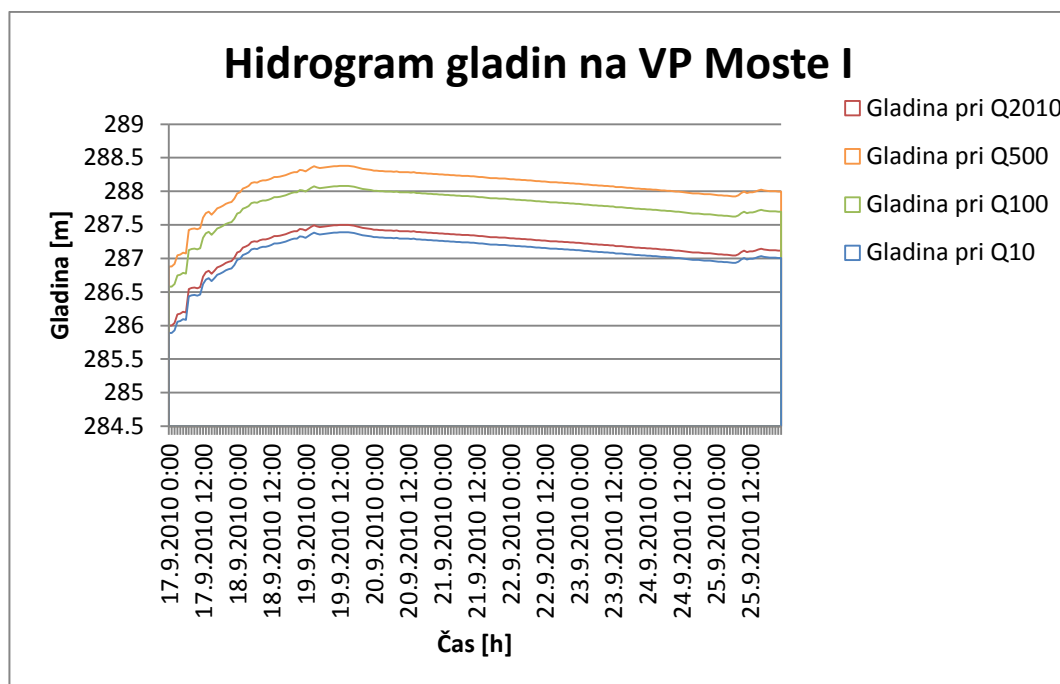
### 5.10.2 Robni in začetni pogoji

Za izračun visoke vode  $Q_{500}$ , sem morala podatke spet prilagoditi. Iz študije Hidravlični izračun gladin na vodomerni postaji Vrhnika II, ki jo je izdelalo podjetje IZVO – R, sem povzela podatek o visoki vodi  $Q_{1000}$  ( $Q_{1000}$  in  $Q_{500}$  sta skoraj enaka), ki znaša  $107 \text{ m}^3/\text{s}$  (gladina se pri tem pretoku nahaja na  $290,44 \text{ m n. v.}$ ). Od največjega pretoka iz leta 2010 sem odštela pretok  $Q_{500}$  in dobljeno razliko uporabila za zmanjšanje hidrograma pretoka iz leta 2010.



Slika 44: Hidrogram pretoka na VP Vrhnika II ( $Q_{2010}$ ,  $Q_{500}$ ,  $Q_{100}$  in  $Q_{10}$ )

Na isti način (kot pri vodomerni postaji Vrhnika II) sem predelala hidrogram pretoka na vodomerni postaji Moste I, le da sem v tem primeru od pretoka  $Q_{500}$  odštela največji pretok leta 2010 ter dobljeno razliko uporabila za zvečanje hidrograma pretoka iz leta 2010. Podatek o visoki vodi  $Q_{500}$  sem povzela iz študije Izdelava kart poplavne nevarnosti za območje Rudnika, ki jo je izdelalo podjetje IZVO. Pretok  $Q_{500}$  znaša  $505 \text{ m}^3/\text{s}$ , gladina pri  $Q_{500}$  pa znaša  $288,38 \text{ m n. v.}$  Ostale podatke sem pustila enake kot pri umerjanju modela.



Slika 45: Hidrogram gladin na VP Moste I ( $Q_{2010}$ ,  $Q_{500}$ ,  $Q_{100}$  in  $Q_{10}$ )

### 5.10.3 Rezultati

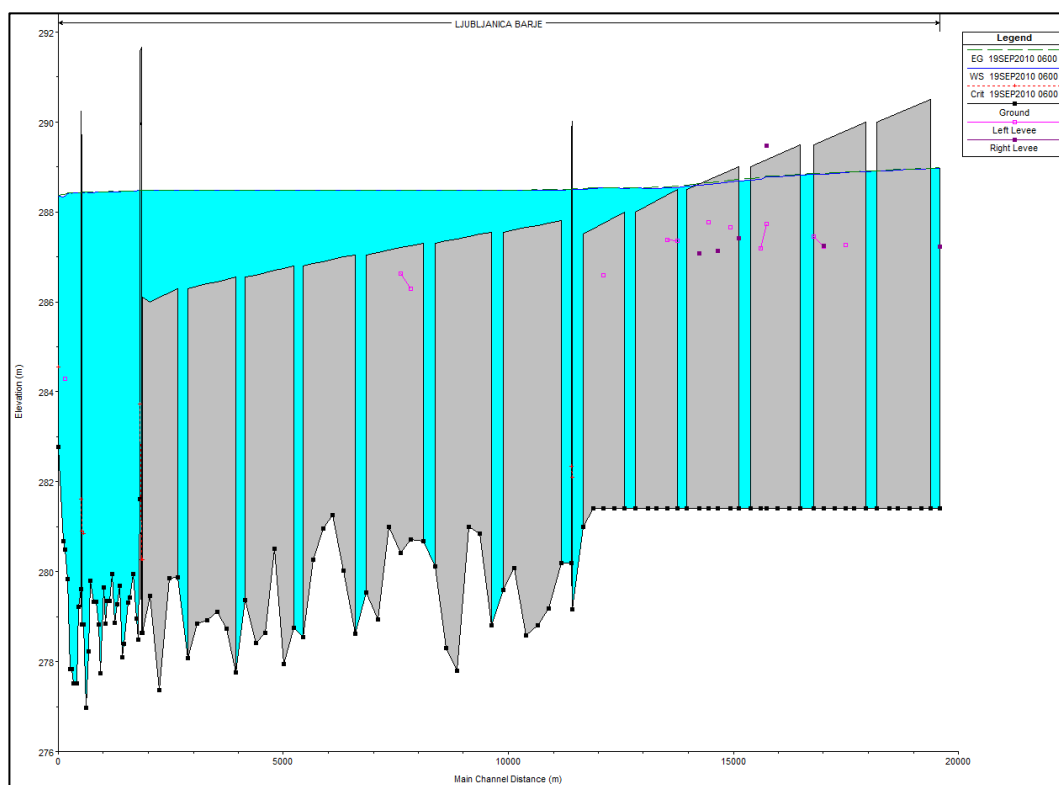
V preglednici 9 so prikazani rezultati računa  $Q_{500}$  in rezultati računa za leto 2010. Gladine vzdolž Ljubljanice so pri izračunu  $Q_{500}$  večje kot leta 2010, iz česar lahko sklepamo, da poplavne vode leta 2010 niso presegle 500-letne visoke vode.

Preglednica 9: Gladine pri  $Q_{500}$  in leta 2010

Profil	Posebnost	$H_{2010}$ [m n.v.]	$H_{Q_{500}}$ [m n.v.]
4	pritok Mali Graben	287.62	288.43
5,6	merilno mesto Livada	287.63	288.44
33	pritok Ižica	287.87	288.56
50-55	merilno mesto Črna vas	287.94	288.59
55	pritok Iška	287.94	288.59
57	VP Lipe	287.94	288.59
95	pritok Borovniščica	288.53	288.78
98	VP Kamin	288.59	288.82
103	pritok Bistra	288.69	288.89

Hitrost toka se tekom Ljubljanice spreminja. Na zgornjem odseku, od sotočja Ljubljanice in Bistre do Podpeči, so hitrosti večje (od 0,49 m/s do 0,87 m/s), na odseku med Podpečjo in južno ljubljansko obvoznico se hitrosti močno zmanjšajo (ponekod pade hitrost pod 0 m/s), potem pa se hitrost ponovno poveča (do 0,93 m/s). Hitrosti so pri  $Q_{500}$  torej nekoliko manjše kot pri  $Q_{100}$ .

Podobno se spreminja tudi Freudovo število (od 0,07 do 0,12 zgoraj, potem pada - tudi do 0, ter narašča proti koncu do 0,14). Tudi Freudovo število je v primeru  $Q_{500}$  manjše kot pri  $Q_{100}$ . Hitrost toka ter Freudovo število se torej z višanjem pretoka zmanjšujeta.

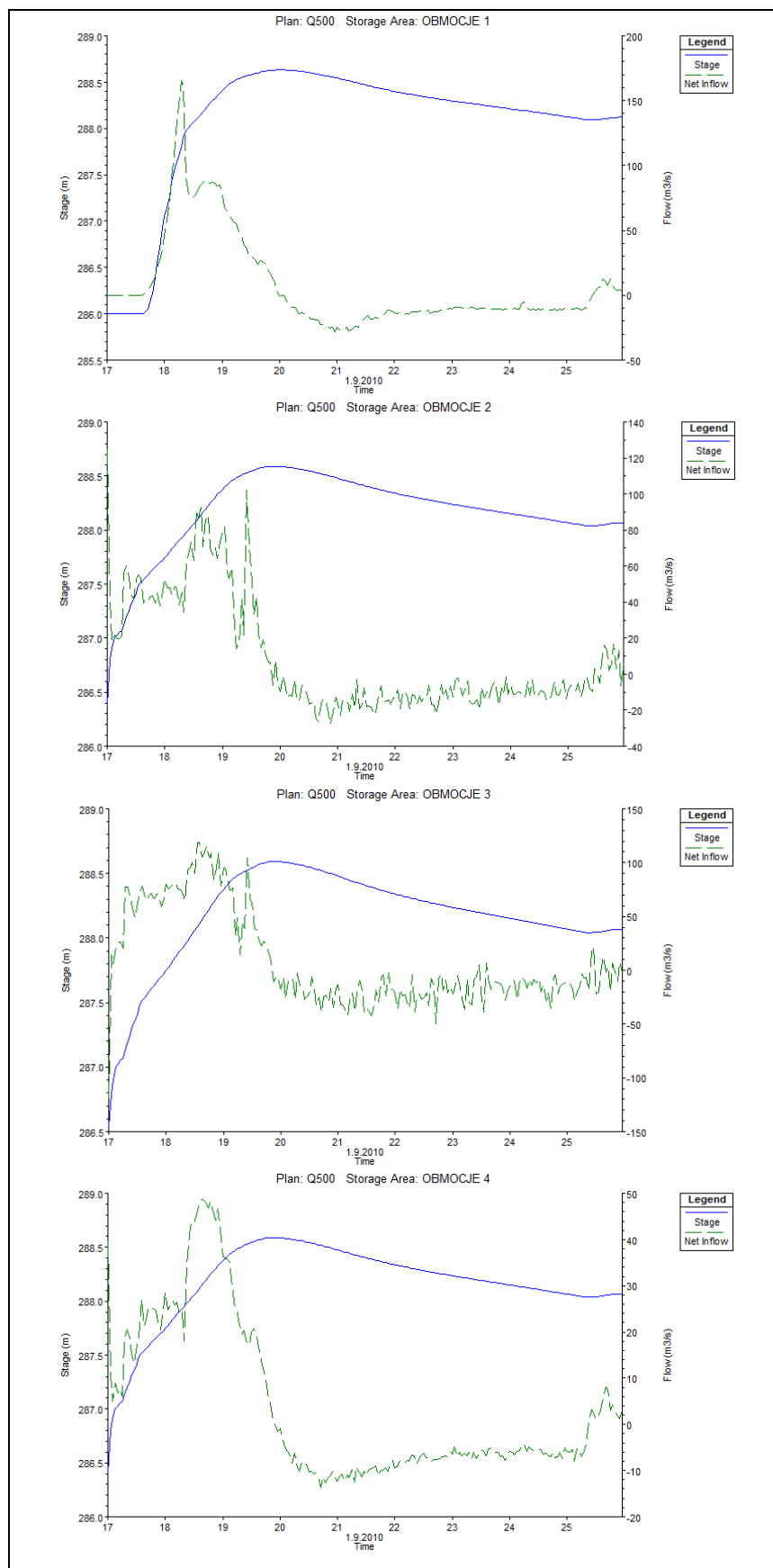


Slika 46: Gladina vzdolž Ljubljanice pri  $Q_{500}$

Gladine na poplavljenih območjih ter prostornine poplavne vode so prikazane v preglednici 10. Pri primerjavi rezultatov izračunov  $Q_{500}$  in 2010 se vidi, da je pri  $Q_{500}$  prostornina poplavljenega območja veliko večja kot leta 2010. Še vedno pa je najbolj poplavljen območje 3, najmanj pa območje 4. Prav tako je gladina na območju 1 najvišja, na ostalih treh območjih pa je enaka.

Preglednica 10: Najvišje gladine in prostornine na poplavnih območjih za  $Q_{500}$  ter  $Q_{2010}$

	$Q_{500}$		$Q_{2010}$	
	$H_{max}$ [m n. v.]	V [1000 m <sup>3</sup> ]	$H_{max}$ [m n. v.]	V [1000 m <sup>3</sup> ]
Območje 1	288.63	11510.35	288.03	4687.71
Območje 2	288.59	11739.2	287.94	4984.23
Območje 3	288.59	16146.78	287.94	6993.31
Območje 4	288.59	6401.63	287.93	2321.02



Slika 47: Časovni prikaz poteka gladine in pretoka na območjih 1, 2, 3 in 4 za  $Q_{500}$

## 6 ZAKLJUČEK

Ljubljansko barje predstavlja največje barje v Sloveniji. Po njegovi sredini počasi vijuga reka Ljubljanica, ki izvira pri Vrhniki in se kasneje izlije v Savo. Ljubljanica ima na Ljubljanskem barju mnogo pritokov, ki veliko pripomorejo k poplavljanju tega največjega poplavnega območja v Sloveniji. Poplave na Ljubljanskem barju so vsakoletne, najpogosteje se zgodijo pomladi in jeseni. Prebivalstvo Ljubljanskega barja se je skozi zgodovino naučilo sobivanja z vsakoletnimi poplavami, vendar se je v zadnjih letih povečalo število črnih gradenj, zaradi katerih se ja hkrati povečala tudi poplavna ogroženost.

Namen diplomske naloge je bil ustvariti model Ljubljanice, na podlagi hude poplave septembra 2010. Umerjanje modela v programu HEC-RAS z nestalnim tokom je bilo dolgotrajno in zamudno, rezultati pa niso bili primerljivi z omenjeno poplavo. Gladina na zgornjem delu Ljubljanice je bila prenizka, poplavna območja se niso pravilno časovno polnila in hidrogram pretoka na vodomerni postaji Moste I ni bil podoben dejanskemu. Razlog za ta neskladja je velika površina Ljubljanskega barja ter veliko število pritokov Ljubljanice. Rezultate sem poizkušala popraviti s spreminjanjem hidroloških količin, vendar sem do približnih vrednosti iz leta 2010 prišla z zelo nerealnimi hidrološkimi količinami. Za umerjeni model sem nato izračunala še situacije z različnimi visokimi vodami (10-letna, 100-letna in 500-letna visoka voda).

Ljubljansko barje je zaradi svoje velikosti in kompleksnosti eno izmed najtežjih območij za določanje poplavne nevarnosti. Vsakoletnih poplav se ne da preprečiti, lahko bi le omejili njihove posledice.



## **VIRI**

Andrič, M., Bitenc, P., Turk, P. idr. 2009. Ljubljanica - kulturna dediščina reke. Ljubljana, Narodni muzej Slovenije: 471 str.

ARSO. 2013.

[http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov\\_arhiv\\_tab.php](http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php) (Pridobljeno 6. 5. 2013.)

AutoCad. 2013.

<http://www.arhinova.si/AutoCAD/AutoCAD.htm> (Pridobljeno 6. 5. 2013.)

Bat, M., Beltram, G., Cegnar, T., idr. 2003. Vodno bogastvo Slovenije. Ljubljana, Ministrstvo za okolje, prostor in energijo, Agencija Republike Slovenije za okolje: 131 str.

Brečko, V. 1993. Poplave konec leta 1992 v luči značilnosti poplavnega sveta Ljubljanskega barja. Ujma 7: 43-47.

CGSplus. 2013.

[www.cgsplus.si/tabid/180/Default.aspx](http://www.cgsplus.si/tabid/180/Default.aspx) (Pridobljeno 6. 5. 2013.)

Geister, I. 1995. Ljubljansko barje. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije: 199 str.

Globevnik, L. 2012. Strokovna mnenja, preverbe, analize in usmeritve za potrebe urejanja voda. Analiza poplavnih dogodkov v septembru 2010 v Sloveniji. Ljubljana, Republika Slovenija, Ministrstvo za okolje in prostor: 37 f.

Globevnik L., Vidmar, A. 2010. Poplave na Ljubljanskem barju v septembru 2010.

<http://mvd20.com/LETO2010/R4.pdf> (Pridobljeno 4. 4. 2013.)

Gogala, A. (ur.). 2008. Narava Slovenije. Ljubljansko barje in Iška. Ljubljana, Prirodoslovni muzej: 67 str.

Hanžek, M. 2002. Trajnostni razvoj Mestne občine Ljubljana - strategija. Ljubljana, Mestna občina, Oddelek za urbanizem: 85 str.

HEC-RAS. 2013.

<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/features.aspx> (Pridobljeno 6. 5. 2013.)

Jančar, M. 2001. Ljubljana, mesto v zelenju. Radovljica, Didakta: 235 str.

Kolbezen, M. 1994. Velike poplave in povodnji na slovenskem – IV, poplave leta 1964 in 1965. Ujma 8: 81-87.

Lah, A. 1965. Ljubljansko barje. Problemi urejevanja in gospodarskega izkoriščanja v obdobju 1945-1961. Ljubljana, Slovenska akademija znanosti in umetnosti: 192 str.

Lamovec, P., Mikoš, M., Oštir, K. 2013. Detection of flooded areas using machine learning techniques: case study of the Ljubljana moor floods in 2010. Disaster Advances 6 (7): 4-11.  
[http://www.shankargargh.net/disaster\\_back\\_issue/disas\\_2013\\_7/1.pdf](http://www.shankargargh.net/disaster_back_issue/disas_2013_7/1.pdf) (Pridobljeno 23. 9. 2013.)

Lamovec, P., Veljanovski, T., Mikoš, M., Oštir, K. 2013. Detecting flooded areas with machine learning techniques: case study of the Selška Sora river flash flood in September 2007. Journal of Applied Remote Sensing 7: 1-13.  
<http://remotesensing.spiedigitallibrary.org/article.aspx?articleid=1687321> (Pridobljeno 23. 9. 2013.)

Lampič, B. 2008. Kmetijstvo v Mestni občini Ljubljana: relikv ali razvojni potencial. Ljubljana, Znanstvena založba Filozofske fakultete, Oddelek za geografijo: 125 str.

Natek, K. (ur.). 2011. Mali vodni tokovi in njihovo poplavno ogrožanje Ljubljane. Ljubljana, Znanstvena založba Filozofske fakultete: 119 str.

Pak, M. (ur.). 2002. Geografija Ljubljane. Ljubljana, Oddelek za geografijo Filozofske fakultete: 237 str.

Polajnar, J. 1999. Visoke vode v Sloveniji leta 1998 = High waters in Slovenia in 1998. Ujma 13: 143-150.

Šipec, S. 1999. Poplave in zemeljski plazovi jeseni leta 1998 = Floods and landslides in the autumn of 1998. Ujma 13: 160-167.

Trontelj, M. 1997. Kronika izrednih vremenskih dogodkov XX. stoletja. Ljubljana, Hidrometeorološki zavod Republike Slovenije: 135 str.

Veljanovski, T., Pehani, P., Lamovec, P., Oštir, K. 2012. Uporabnost podatkov satelitskega in letalskega daljinskega zaznavanja za opazovanje in kartiranje vodnih površin. Geodetski vestnik 56/4: 786-801.

[http://geodetski-vestnik.com/56/4/gv56-4\\_786-801.pdf](http://geodetski-vestnik.com/56/4/gv56-4_786-801.pdf) (Pridobljeno 23 .9. 2013.)

Zupanc, B. 2004. Ljubljansko barje. Miklavž na Dravskem polju, Center za kartografijo favne in flore: 40 str.