

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:

Moderc, M. 2013. Analiza občutljivosti hidravličnega modeliranja za hrapavost poplavnih površin. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Steinman, F., somentor Rak, G.): 73 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:

Moderc, M. 2013. Analiza občutljivosti hidravličnega modeliranja za hrapavost poplavnih površin. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Steinman, F., co-supervisor Rak, G.): 73 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  
VODARSTVA IN  
KOMUNALNEGA  
INŽENIRSTVA

Kandidat:

**MARJAN MODERC**

**ANALIZA OBČUTLJIVOSTI HIDRAVLIČNEGA  
MODELIRANJA ZA HRAPAVOST POPLAVNIH  
POVRŠIN**

Diplomska naloga št.: 199/VKI

**SENSITIVITY ANALYSIS OF HYDRAULIC MODELING  
FOR FLOOD AREA HYDRAULIC RESISTANCE**

Graduation thesis No.: 199/VKI

**Mentor:**

prof. dr. Franc Steinman

**Predsednik komisije:**

doc. dr. Dušan Žagar

**Somentor:**

asist. Gašper Rak

**Član komisije:**

izr. prof. dr. Jože Panjan

prov. dr. Matjaž Četina

Ljubljana, 25. 03. 2013

## STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

Raziskovalno delo in računalniške obdelave so bile opravljene na Katedri za mehaniko tekočin z laboratorijem na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani.

## **IZJAVE**

Skladno s 27. členom Pravilnika o diplomskem delu UL Fakultete za gradbeništvo in geodezijo,

podpisani Marjan Moderc izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom: »Analiza občutljivosti hidravličnega modeliranja na hrapavost poplavnih površin«.

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

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

Ljubljana, 15. 3. 2013

---

(podpis kandidata)

## **IZJAVE O PREGLEDU NALOGE**

Nalogo so si ogledali naslednji učitelji:

**BIBLIJSKO–DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>519.6:556.536:627.51(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Marjan Moderc</b>
<b>Mentor:</b>	<b>prof. dr. Franci Steinman</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Analiza občutljivosti hidravličnega modeliranja za hrapavost poplavnih površin</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>73 str., 11 pregl., 27 sl., 13 pril.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>analiza občutljivosti, hidravlično modeliranje, karta poplavne ogroženosti, hidravlična hrapavost, Mike Flood</b>

## Izveček:

Zaradi zagotavljanja poplavne varnosti obvodnega prostora je Evropska unija leta 2007 sprejela Evropsko poplavno direktivo. V njej je kot pomemben korak v celotni shemi postopkov za zmanjšanje poplavne ogroženosti predvidena izdelava karte poplavne ogroženosti, ki je izhodiščni dokument v postopkih trajnostnega in poplavno varnega načrtovanja rabe tal. Pri izdelavi natančne karte poplavne ogroženosti predstavljajo sodobni eno- in dvodimenzionalni matematični hidravlični modeli nenadomestljivo orodje. Zbiranje in priprava zanesljivih prostorskih vhodnih podatkov za hidravlični model (velikost poplavnih pretokov, zajem topografskih značilnosti, hidravlična hrapavost površja) je draga in dolgotrajna naloga, katere kompleksnost in stroški z večanjem zelene natančnosti naraščajo. Zato je potrebna optimizacija števila in natančnosti uporabljenih vhodnih parametrov, pri čemer nam je v pomoč metoda, imenovana analiza občutljivosti. V diplomski nalogi je na primeru odseka reke Reke s pomočjo dvodimenzionalnega hidravličnega programa Mike Flood raziskan vpliv časovne in prostorske spremenljivosti (oz. nenatančne izbire) hidravlične hrapavosti površja na hidravlično sliko rečnega odseka ob različnih poplavnih dogodkih. Naloga ugotavlja korelacijo med stopnjo spontane spremembe rabe tal (npr. zarast, menjava letnih časov,...) in posledično spremembo obsega ter hitrosti poplavne vode. Ovrednoten je tudi vpliv spremembe hrapavosti na velikost in vrsto posameznih razredov poplavne ogroženosti na karti poplavne ogroženosti.

## **BIBLIOGRAPHIC AND DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 519.6:556.536:627.51(043.2)

**Author:** Marjan Moderc

**Supervisor:** prof. dr. Franci Steinman

**Title:** Sensitivity analysis of hydraulic modeling for flood area hydraulic resistance

**Notes:** 73 p., 11 tab., 27 fig., 13 ann.

**Keywords:** sensitivity analysis, hydraulic modeling, flood risk map, hydraulic resistance, Mike Flood

### Abstract:

In order to ensure flood safety of waterside areas, European Union has ratified the European flood directive in 2007. In it, production of flood risk maps is foreseen as an important part of a flood risk reducing system, since this represents a very valuable document in the process of sustainable spatial planning. In the process of flood risk map production, irreplaceable role is played by one- and two-dimensional hydraulic models. Collection and procession of reliable input data for hydraulic models (e.g. flood discharge, topographic data, hydraulic bed resistance) can be a very expensive and long procedure, of which complexity and price increases with desired accuracy level. Optimization of number and accuracy of input parameters is therefore a very grateful and economic task, which is usually performed by a method, called sensitivity analysis. The following thesis is a case study. It presents a sensitivity analysis of a hydraulic model on the change of a bed resistance. Hydraulic model was built by using Mike Flood software. The thesis researches the correlation between the spontaneous change of a hydraulic bed resistance and the change of flooded river velocity, depth and area in order to define the possible impact of a bed resistance change on the reliability of data, presented on the flood risk map.

## ZAHVALA

Pri izdelavi diplome so mi poleg mentorja prof. Francija Steinmana tako v strokovnem kot tudi v tehničnem smislu izdatno pomagali asistenti Gašper Rak, Matej Müller in Gašper Zupančič. Vsem se iskreno zahvaljujem za nesebično posvečanje časa, znanja, izkušenj, pa tudi veliko mero potrpljenja. Prav tako se zahvaljujem vsem ostalim članom Katedre za mehaniko tekočin z laboratorijem za prijetno in stimulatивно delovno vzdušje.

Diplomsko nalogo posvečam upokojeni vodji študentskega referata ga. Lidiji Živanovič, saj je s svojo sproščenostjo, optimizmom, korektnim delom, predvsem pa z zglednim človeškim odnosom do študentov vsa leta mojega študija prispevala večji delež k občutku sprejetosti in pripadnosti znotraj fakultetnih zidov. V tem pogledu lahko predstavlja svetel vzor mnogim univerzitetnim delavcem.

Za prijeten študentski vsakdan in izdatno pomoč pri premagovanju študijskih ovir se zahvaljujem vsem študijskim kolegom, predvsem Petri Ivančič, Urši Lotrič in Žigi Žibertu.

Nazadnje pa se iskreno zahvaljujem svoji mami, bratu in sestri, da so mi s svojo fizično in moralno podporo omogočili končanje študija.



## KAZALO

<b>1</b>	<b>UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1	Namen diplomske naloge.....	1
1.2	Poplavna ogroženost Slovenije.....	3
1.3	Poplavna direktiva.....	4
1.4	Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja UL RS št. 60/07: 3216.....	6
1.5	Uredba o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja UL RS št. 89/08: 3807.....	8
1.6	Območja pomembnega vpliva poplav.....	9
<b>2</b>	<b>TEORETIČNA IZHODIŠČA</b> .....	<b>10</b>
2.1	Osnove hidravlike prostega toka.....	10
2.1.1	Kontinuitetna enačba (zakon o ohranitvi mase).....	10
2.1.2	Navier-Stokesova dinamična enačba (zakon o ohranitvi gibalne količine).....	10
2.1.3	Energijska enačba (zakon o ohranitvi energije).....	11
2.1.4	Hrapavost omočenega oboda - Manningov koeficient.....	11
2.1.5	Spodnji robni pogoj.....	12
2.2	Hidravlično modeliranje.....	13
2.2.1	Matematični in fizični hidravlični model.....	14
2.2.2	Umerjanje in potrditev modela.....	14
2.3	Zajem topografskih podatkov.....	15
2.3.1	Geometrija terena – Tehnologija LIDAR.....	16
2.3.2	Geometrija struge – geodetska izmera.....	17
2.4	Hidrološki podatki.....	18
2.4.1	Hidrogram pretoka - začetni pogoj.....	18
2.4.2	Določanje projektnih pretokov.....	19
2.5	Tehnologija GIS.....	21

2.6	Natančnost izračunov hidravličnih modelov .....	23
2.7	Analiza občutljivosti .....	24
2.7.1	Področje uporabe v hidravliki .....	25
2.7.2	Metode za izvedbo analize občutljivosti .....	26
2.7.3	Faktor modelne neelastičnosti .....	27
2.7.4	Faktor razpršenosti .....	28
2.8	Postopek izdelave karte poplavne ogroženosti.....	29
2.9	Uporabljena programska oprema.....	31
2.9.1	Mike Flood .....	31
2.9.2	HEC-RAS .....	31
2.9.3	ArcMap.....	32
3	<b>ŠTUDIJA PRIMERA: ANALIZA OBČUTLJIVOSTI MHM NA SPREMEMBO RABE TAL NA PRIMERU ODSEKA REKE REKE.....</b>	<b>33</b>
3.1	Opis obravnavanega območja .....	33
3.2	Izdelava hidravličnega modela .....	35
3.2.1	Topografija območja .....	35
3.2.2	Hidrotehnični objekti .....	38
3.2.3	Hrapavost območja.....	39
3.2.4	Začetni pogoj – projektni pretoki .....	42
3.2.5	Spodnji robni pogoj.....	44
3.2.6	Umerjanje modela .....	45
3.2.7	Veljavnost modela.....	46
3.3	Izdelava analize občutljivosti za parameter Manningovih koeficientov.....	47
3.4	Izdelava karte poplavne ogroženosti.....	48
3.4.1	Opozorilna karta poplav .....	49
3.4.2	Karta poplavne nevarnosti .....	50
3.4.3	Analiza ranljivosti.....	51
3.4.4	Karta poplavne ogroženosti.....	55
4	<b>PRIKAZ IN ANALIZA REZULTATOV .....</b>	<b>57</b>

<b>4.1</b>	<b>Vpliv spremembe hrapavosti na obseg poplave.....</b>	<b>57</b>
<b>4.2</b>	<b>Vpliv spremembe hrapavosti na hitrost poplavne vode.....</b>	<b>59</b>
<b>4.3</b>	<b>Vpliv spremembe hrapavosti na razrede poplavne nevarnosti.....</b>	<b>60</b>
<b>4.4</b>	<b>Vpliv vrste rabe tal na občutljivost modela .....</b>	<b>64</b>
<b>4.5</b>	<b>Sinteza .....</b>	<b>65</b>
<b>4.5.1</b>	<b>Natančnost modela .....</b>	<b>65</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Občutljivost modela .....</b>	<b>65</b>
<b>5</b>	<b>ZAKLJUČEK.....</b>	<b>68</b>
<b>VIRI.....</b>		<b>70</b>

<b>KAZALO PREGLEDNIC</b>	<b>str.</b>
Preglednica 1: Izrez potrebnih oblikovnih parametrov z za primer Gumbelove porazdelitve	20
Preglednica 2: Primerjava med rastrsko in TIN ponazoritvijo prostorskih ploskev	22
Preglednica 3: Uporabljene vrednosti Manningovih koeficientov v posameznih primerih	38
Preglednica 4: Velikosti pretokov posameznih povratnih dob na vodomernih postajah v odvisnosti od izbrane statistične porazdelitve	42
Preglednica 5: Projektni pretoki Q10, Q100 in Q500 za območje modela	42
Preglednica 6: Izračun faktorja modelne neelastičnosti za parameter obsega poplav	56
Preglednica 7: Izračun faktorja razpršenosti za parameter obsega poplav	56
Preglednica 8: Izračun faktorja modelne neelastičnosti za parameter hitrosti	58
Preglednica 9: Izračun faktorja razpršenosti za parameter hitrosti	58
Preglednica 10: Primerjava kart poplavne ogroženosti	59
Preglednica 11: Občutljivost hitrosti in poplavne površine glede na vrsto rabe tal	62

<b>KAZALO SLIK</b>	<b>str.</b>
Slika 1: Shema odnosov med osnovnimi pojmi - nevarnost, ranljivost, ogroženost, tveganje	5
Slika 2: Shema metodologije načrtovanja zmanjšanja poplavne ogroženosti po Pravilniku	7
Slika 3: Bilanca energije med profili toka s prosto gladino	11
Slika 4: Shematična primerjava oblike realnega in uporabljenega hidrograma	19
Slika 5: Postopek izdelave karte poplavnih območij v skladu s Pravilnikom	29
Slika 6: Geografska umestitev obravnavanega odseka	33
Slika 7: Geološka sestava tal in obseg podporečij na območju reke Reke	34
Slika 8: Območje uporabe točk geodetske izmere in TIN mreža modeliranega območja	36
Slika 9: Enodimenzionalni model reke in prečni profil struge v programu Mike 11	37
Slika 10: Izrez rastrskega modela reliefa DMR v programu Mike 21	37
Slika 11: Uporabljeni distometer Leica Disto Special 5	38

Slika 12: Hidrotehnični objekti, vstavljeni v model Mike 11	39
Slika 13: Prikaz razporeditve Manningovih koeficientov v posameznem primeru	42
Slika 14: Mreža merilnih naprav ARSO na povodju reke Reke	43
Slika 15: Izračun pretočne krivulje mostu v Dolnji Bitnji s programom Hec-Ras	45
Slika 16: Uporabljen spodnji pogoj: pretočna krivulja mostu v Dolnji Bitnji (most 2)	45
Slika 17: Nivo vodne gladine ob poplavah 9.2.2009 in 13.4.2008	46
Slika 18: Prikaz območja modela in veljavnosti modela (vir: Geopedia)	47
Slika 19: Opozorilna karta poplav za obravnavano območje	49
Slika 20: Legenda oznak na karti poplavne nevarnosti po Pravilniku	50
Slika 21: Legenda oznak na karti razredov poplavne nevarnosti po Pravilniku	51
Slika 22: Izsek registra nepremičnin kulturne dediščine za obravnavano območje	52
Slika 23: Izrez sloja Aglomeracije prebivalstva na obravnavanem območju (vir: Atlas okolja)	53
Slika 24: Prikaz gospodarskih dejavnosti v območju glede na vrsto in pomen	54
Slika 25: Legenda oznak na karti razredov poplavne ranljivosti po Pravilniku	55
Slika 26: Legenda oznak na karti razredov poplavne ogroženosti po Pravilniku	56
Slika 27: Primerjava časovnega napredka poplavljanja za primer 1, 3 in 4 pri Q100	57
Slika 28: Primerjava hitrostnega polja posameznega primera na odseku modela	59
Slika 29: Primerjava posameznih kart za primer 1 (levo) in primer 3 (desno)	63

**PRILOGE**

- Priloga A: Preglednica Manningovih koeficientov za naravne vodotoke
- Priloga B: Merila za določitev razredov ranljivosti
- Priloga C: Načrt objekta – Most 1 - Smrje
- Priloga D: Načrt objekta – Most 2 – Dolnja Bitnja
- Priloga E: Primer 1 – Karta poplavne nevarnosti – kriterij globine
- Priloga F: Primer 3 – Karta poplavne nevarnosti – kriterij globine
- Priloga G: Primer 1 – Karta poplavne nevarnosti – kriterij gibalne količine
- Priloga H: Primer 3 – Karta poplavne nevarnosti – kriterij gibalne količine
- Priloga I: Primer 1 - Karta razredov poplavne nevarnosti
- Priloga J: Primer 3 - Karta razredov poplavne nevarnosti
- Priloga K: Analiza ranljivosti
- Priloga L: Primer 1 - Karta poplavne ogroženosti
- Priloga M: Primer 3 - Karta poplavne ogroženosti

## OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

ADMP	akustični Dopplerjev merilec pretoka
ALB	Airbourne Lidar Bathymetry (zračna lidarska batimetrija)
ALS	Airbourne Lidar System (zračni lidarski sistem)
ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
DMT	digitalni model terena
DEM	digital elevation model (digitalni model višin)
DTK	državna topografska karta
EMV	elektro-magnetno valovanje
ES	Evropska skupnost (= EU)
EK	Evropska komisija
GPS	global positioning system (globalni sistem pozicioniranja)
IzVRS	Inštitut za vodno gospodarstvo Republike Slovenije
KPN	Karta poplavne nevarnosti
KPO	Karta poplavne ogroženosti
KRPN	Karta razredov poplavne nevarnosti
MHM	matematični hidravlični model
OPVP	območje pomembnega vpliva poplav
URSZR	Uprava Republike Slovenije za zaščito in reševanje
VP	vodomerna postaja
WISE	Skupni informacijski sistem ES za vode





## 1 UVOD

Človek se je zaradi obilice prednosti, ki mu jih ponuja voda, že od pradavnih časov rad naseljeval ob vodi. Voda mu je zagotavljala neposreden vir hrane, prometno pot, varnost, higieno, kasneje tudi vir energije za delovne stroje itd. Ob večjih rekah so bile tudi ravnice z rodovitno zemljo, ki jih je s pomočjo rek v sušnih obdobjih lahko tudi namakal. Tesna povezanost človeka in vode je skozi stoletja prinesla spoznanje, da je cena za ugodnosti življenja ob vodi tudi sprejetje tveganja za možnost rednih, pa tudi katastrofalnih poplav, zemeljskih plazov in hudourniških izbruhov.

Sčasoma je človek zaradi vse večjega hlastanja po izrabi ravninskih območij okoli vodotokov z uporabo vedno boljšega inženirskega znanja začel zmanjševati elemente nevarnosti na poplavnih območjih. Pogosto pa je kar pozabil na resnost, pogostost in obseg groženj, ki jih prinašajo izredni, z vodo povezani dogodki, ter se nespametno naselil v kratkoročno morda še varno obvodno območje. Zaradi nepremišljenega gospodarjenja naših prednikov, omejevanja naravnih poti za odtok visokih voda in pomanjkanja strokovnega nadzora pri umeščanju objektov in dejavnosti v obvodni prostor dandanes poplave zahtevajo vse več žrtev in povzročajo vse večje in večje gmotne posledice, ki močno otežujejo gospodarski razvoj prizadetih območij.

Zato je Evropska unija poenotila in predpisala uvedbo ponekod že precej razvitih državnih programov zmanjševanja poplavne in erozijske ogroženosti s sprejetjem *Evropske poplavne direktive*. Ta podaja precej strogo začrtane smernice in terminske plane za sprejetje načrtov zmanjševanja poplavne ogroženosti. Prenos smernic in določb, ki jih prinaša Poplavna direktiva, se je z evropskega na slovenski nivo prenesel s *Pravilnikom o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja* (v nadaljevanju: Pravilnik).

### 1.1 Namen diplomske naloge

V zgoraj omenjenih pravnih aktih predpisana struktura ukrepov za zmanjšanje poplavne ogroženosti, kot enega izmed nujnih vmesnih korakov v celotnem postopku, predvideva izdelavo Karte poplavne ogroženosti (KPO). Osnovo za izdelavo le-te v prvi vrsti predstavlja izdelan elaborat hidravlična stanja obravnavanega vodotoka za različne poplavne dogodke, ki ga pridobimo s pomočjo hidravličnega modeliranja. Pretoki rek ob različnih poplavnih dogodkih predstavljajo začetni pogoj v hidravličnem modeliranju, vendar pa je za ustrezen izračun treba poznati tudi druge vhodne parametre (topografija površja, batimetrija struge, raba tal v poplavnem dosegu reke, spodnji robni pogoj). S spreminjanjem okolja se spreminjajo tudi vhodni parametri hidravličnega modela in tako vplivajo na rezultate hidravličnih študij oz. določajo njihovo časovno veljavnost. Ker so prav ti rezultati podlaga za izdelavo Karte poplavne ogroženosti in posledično načrtov ukrepov za zmanjševanje poplavne ogroženosti, ima njihova točnost v celotnem postopku tako s strokovnega kot tudi z ekonomskega

stališča pomemben vpliv. Zato *Poplavna direktiva*, z namenom zagotavljanja aktualnosti in točnosti vsebin v omenjenih dokumentih, predvideva šest-letni cikel obnavljanja celotnega postopka določanja Načrtov ukrepov zmanjšanja poplavne ogroženosti. Poleg osveževanja Programa ukrepov za prevzem tveganja se tako v vsakem ciklu z novo hidravlično študijo pridobi tudi posodobljena slika poplavne nevarnosti, ki se je iz različnih razlogov (sprememba topografije ali robnih pogojev – gradbeni posegi v prostor, sprememba rabe tal) glede na prejšnjo analizo morda spremenila.

Večji načrtovani posegi v obvodni prostor že zakonsko zahtevajo ponovno presojo hidravličnih vplivov posega na okolje in s tem posodobitev Karte poplavne ogroženosti, zato lahko njihov prispevek k poplavni (ne)varnosti hitro in učinkovito ovrednotimo oz. upoštevamo. Problematične pa so lahko tiste »neuradne« spremembe, ki jih z orodji obstoječega sistema evidentiranja fizičnega prostora (register rabe tal, digitalni model reliefa) ne moremo avtomatično zaznati, v občutnem obsegu pa se lahko pojavijo tudi v času med eno in drugo posodobitvijo in zato dolgo ostanejo neopažene. Tu je lahko nevarna predvsem »spontana« sprememba hrapavosti tal (npr. zaraščanje obvodnega prostora, različni letni časi, pridelava različnih kulturnih rastlin), saj je le-ta eden od aktivno vplivnih dejavnikov na hidravlično prevodnost vodotoka in posledično njegovo poplavno nevarnost.

Namen diplomske naloge je, s pomočjo analize občutljivosti ugotoviti, kakšen vpliv ima naključna sprememba hrapavosti poplavne površine na poplavno ogroženost določenega območja. Raziskava je potekala v obliki študije primera na odseku reke Reke. S pomočjo dvodimenzionalnega hidravličnega programa Mike Flood je bila izvedena analiza hidravličnega stanja vodotoka ob poplavnih dogodkih zakonsko predpisanih povratnih dob ( $Q_{10}$ ,  $Q_{100}$  in  $Q_{500}$ ) za obstoječo in tri različne potencialne kombinacije rabe tal. Na podlagi rezultatov modela je bila za osnovno stanje izdelana karta poplavne ogroženosti, s primerjavo dveh glavnih hidravličnih kazalcev (obseg in hitrost poplavne vode) pa se je preverilo, ali je sprememba hrapavosti tal iz omenjenih razlogov dovolj vpliven faktor, da bi se poleg verjetne spremembe poplavnih linij, lahko spremenili celo razredi poplavne ogroženosti na Karti poplavne ogroženosti.

Potrjena teza bi pomenila, da imajo do sedaj nenadzorovana časovna in prostorska nihanja hrapavosti tal večji vpliv na poplavno ogroženost, kot je predvideno v obstoječem sistemu ugotavljanja poplavne ogroženosti. Preveliko nihanje obsega ali celo razredov poplavne ogroženosti namreč polemizira verodostojnost tako kart poplavne ogroženosti kot tudi iz nje izhajajočih programov ukrepov za zmanjšanje poplavne ogroženosti.

V diplomski nalogi je uvodoma predstavljeno ozadje in motiv za izdelavo karte poplavne ogroženosti ter pomen le-te. Drugi večji vsebinski sklop povzema teoretično ozadje vseh vsebin, ki so bile uporabljene za izdelavo študije (hidravlika odprtega toka, hidravlično modeliranje, opis uporabljene programske opreme, postopek izdelave karte poplavne ogroženosti, analiza občutljivosti,...). Glavni del diplomske naloge pa predstavlja študija primera, kjer je s pomočjo hidravličnega modela in analize

občutljivosti ovrednoten vpliv spremembe hrapavosti tal na vsebino karte poplavne nevarnosti oz. ogroženosti. Izsledki študije so podani v sintezi rezultatov.

## 1.2 Poplavna ogroženost Slovenije

Slovenija je zaradi svojih reliefnih in podnebnih značilnosti v evropskem merilu precej vodnata država. Njeno bogastvo z vodo se, poleg zajetnih in pestrih pojavnih oblik zaloge vode, kaže tudi v dolžini rečne mreže, ki znaša slabih 27 000 km, kar ob majhni površini države znaša kar 1,33 km rečnega omrežja na km<sup>2</sup> njene površine. Velika vodnatost, velik povprečni naklon površin v državi ter precejšnja akumulacija prebivalstva v nižinskih predelih Slovenije so dejavniki, ki v splošnem določajo precejšnjo poplavno ogroženost Slovenije kot celote. Povprečno v Sloveniji vsako leto poplavi 2300 ha površin, poplavno ogroženih pa je po nekaterih podatkih kar 3000 km<sup>2</sup> površin, kar znaša slabih 15 % slovenskega ozemlja. Na območjih rednih poplav živi 7 % državnega prebivalstva, kar 24 % ljudi pa na območjih velikih poplav. (Anzeljc in sod., 1995)

V Sloveniji prihaja do poplav v prvi vrsti zaradi intenzivnih (dolgotrajnih ali močnih) padavin, saj so le-te zakrivile vseh 20 večjih poplav v zadnjem stoletju v Sloveniji. Nad naše kraje jih prinašajo frontalne zračne gmote z Jadranskega morja ter Biskajskega zaliva. Te se nato ob orografskih pregradah dinarsko-alpskega hribovja dvignejo in ohladijo, zato tam nastane največ padavin. Če so izdatne, trajajo veliko časa in/ali če:

- padejo na že predhodno močno navlažena tla,
- padejo na obstoječo snežno odejo in povzročijo njeno tajanje,
- padejo na zamrznjena ali geološko neugodna (nepropustna) tla,

navadno prihaja do večjih poplav. Velika reliefna razgibanost Slovenije botruje dejstvu, da se (z izjemo njenega SV dela) nahajamo večinoma v povirju večjih vodotokov, zato ima mnogo rek in posledično tudi poplav v Sloveniji hudourniški značaj. Te poplave so kratkotrajne, nekajurne, zanje pa je značilno skokovito naraščanje pretokov in globin ter prav tako hitro vračanje vode v prvotno strugo. V ravninskih predelih SV Slovenije, v porečjih srednjega toka Drave in Mure, pa prihaja do večdnevnih poplav, ki se poleg trajanja od hudourniških razlikujejo tudi po dinamiki ter intenziteti. Rečni režim teh rek pa je tak, da o njihovem poplavljanju ne odločajo razmere v Sloveniji, pač pa razmere v njunem zgornjem toku ter povirju, to je v našem primeru v Avstriji. V tem območju prihaja torej do poplav večinoma zaradi vdora tuje vode. Naraščanje poplavnih vod na takih območjih poteka bolj počasi, nadzorovano, obseg poplavljenega območja pa je relativno precej večji. Nastop in intenzivnost poplavne vode v srednjem rečnem toku je v primerjavi s hudourniški poplavami možno napovedati prej in bolj natančno. (Brilly in sod., 2005)

Ob pregledu seznama vseh večjih svetovnih naravnih nesreč ugotovimo, da je tudi v svetovnem merilu škodni potencial poplav v primerjavi z ostalimi naravnimi nesrečami (potresi, vulkani, zemeljski plazovi, epidemije, vročinski valovi, cunamiji, požari, snežni plazovi, suše) zelo velik. Poplave so namreč najbolj nevarna naravna katastrofo po številu smrtnih žrtev ter povzročeni gmotni škodi, v pogostosti pojavov pa pred poplavami prednjačijo le še suše (Brilly in sod., 1999 po Hewitt, 1997). Znotraj meja Evropske Unije (EU) je med leti 1998 in 2005 v več kot 100 hujših poplavah umrlo več kot 700 ljudi, pol milijona jih je bilo treba evakuirati, ob tem pa je nastala tudi 25 milijardna škoda (€).

Ob prebiranju statističnih podatkov o uničujočih posledicah poplav ter ob upoštevanju trenda povečevanja števila in intenzitete nepredvidljivih vremenskih dogodkov lahko hitro pridemo do spoznanja, kako pomembno in družbeno upravičeno vlogo ima vsakršno preventivno delovanje, ki bi pravočasno predvidelo nastop poplav ter omililo ali celo preprečilo njihove posledice. Poleg varovanja človeških življenj pa dober razlog za povečanje interesa za vlaganje v protipoplavno delovanje predstavljajo tudi ekonomski dejavniki. Praviloma so namreč stroški, ki jih naknadno plačujemo za odstranjevanje posledic poplav in vračanje okolja v stanje pred poplavami, višji od stroškov zagotovitve trajne in zanesljive poplavne varnosti.

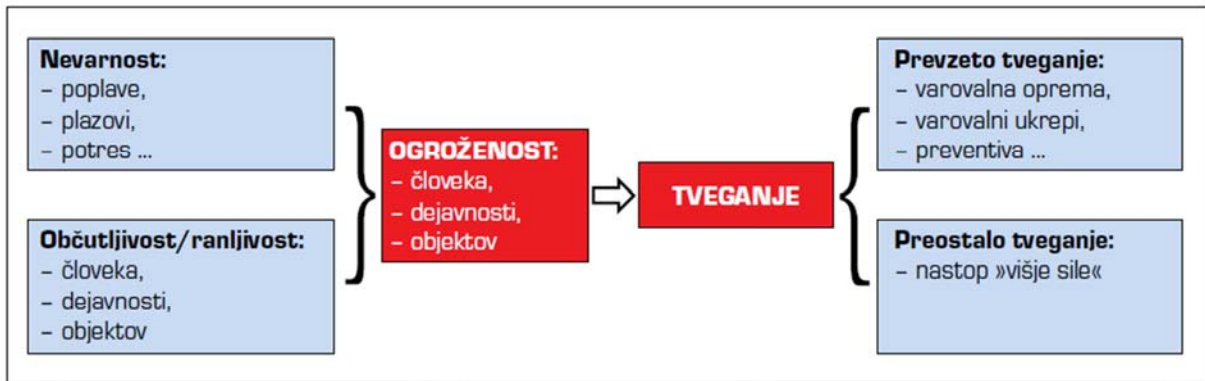
### **1.3 Poplavna direktiva**

Pomanjkanje enotnega, sistematičnega in daljnoročnega koncepta spoprijemanja s problemom zagotavljanja poplavne varnosti znotraj mnogih držav članic EU ter neuskklajena zakonodaja na nivoju celotne Unije so botrovali nastanku t.i. Poplavne direktive oktobra 2007 (polno ime: Direktiva 2007/60/ES Evropskega parlamenta in Sveta o oceni in obvladovanju poplavne ogroženosti). Poleg omenjenih razlogov je podlaga za njen nastanek tudi zaveza k izpolnjevanju ene od programskih točk starejše *Vodne direktive (2000/60/EC)*, saj je v njej EU v luči gospodarnega in trajnostnega ravnanja oz. sobivanja z vodami kot enega od ciljev med drugim predvidela zmanjšanje posledic škodljivega vpliva poplav na stanje vodnih teles.

Poplavna direktiva gradi na ideji določanja ogrožanja prostora. Gre za preprost koncept, ki ogroženost definira kot prostorski presek nevarnosti in ranljivosti.

Pojem nevarnosti v tem konceptu zajema predvsem naravne pogoje oz. dejavnike, na katere človek nima večjega vpliva (meteorološke, hidrološke, geološke, reliefne danosti), pojem ranljivosti pa predstavlja ceno oz. stroške (predvsem) zaradi škode za človekove dejavnosti v prostoru, zato jo včasih označimo tudi s pojmom »škodni potencial«. Analiza in presek obeh lastnosti področja pa osvetljuje dejansko ogroženost območja. Vsakršno delovanje znotraj ogroženih con torej prinaša objektivno tveganje, katerega lahko nadalje delimo na tisto, ki smo ga z raznimi ukrepi (pasivno in aktivno varstvo) prevzeli (prevzeto tveganje), ter tisto, za prevzem katerega ni načrtovanih rešitev. Slednjemu pravimo preostalo tveganje. Dogodke, kjer so velikosti obremenilnih vrednosti višje od

projektiranih, imenujemo ujme oz. nastop višje sile in sodijo v območje preostalega tveganja. Poslanstvo protipoplavnega delovanja predstavlja torej izvedba ukrepov, ki povečujejo obseg prevzetega tveganja. Za načrt in izvedbo ukrepov ob samem nastopu višje sile pa je vzpostavljen sistem zaščite in reševanja, ki je pod okriljem Urada Republike Slovenije za zaščito in reševanje (URSZR).



Slika 1: Shema odnosov med osnovnimi pojmi - nevarnost, ranljivost, ogroženost, tveganje (Rak in sod., 2007, str. 108)

Poplavna direktiva je nastala s povzemanjem uspešnih praks tistih držav, ki so že pred sprejetjem direktive imele razvite državne programe za zmanjšanje poplavne ogroženosti. Sistem zagotavljanja poplavne varnosti je poenotila na način, da je bilo državam, ki so na tem področju predhodno že razvile uspešno metodologijo, potrebnega kar najmanj prilagajanja novim skupnim standardom. Poplavna direktiva je v osnovi pripravljena kot paket preventivnih ukrepov za blaženje poplavnih posledic podnebnih sprememb. Ker so vzroki za poplave in tipi poplav zaradi podnebne in reliefne pestrosti Evrope od države do države članice različni, direktiva ne predpisuje natančne metodologije, pač pa podaja le glavna načela in naloge na področju zmanjševanja poplavne ogroženosti. Ta načela pa vse svoje članice zavezujejo k sprejemu ustreznih državnih zakonov, metod in načrtov, s katerimi bi do predvidenih terminskih rokov na nacionalni nivo prenesli ideje oz. uspešne prakse zagotavljanja poplavne varnosti, predstavljene v direktivi. Določanje konkretnih ciljev in vrst načrtov ukrepov za zagotavljanje poplavne varnosti je prepuščeno posamezni državi članici in je vezano na njene topografske in meteorološke značilnosti, potrebe ter sposobnosti. Direktiva pa pri tem poleg smernic jasno predpisuje terminski plan izvedbe.

Sporočilo direktive je predvsem v dojemanju poplav kot naravne pojave, ki ga je treba obravnavati celovito v okviru porečja, ter v potrebi uvajanja preventivnih ukrepov (gradbeni ukrepi, ustrezna informiranost o poplavni ogroženosti oz. nevarnosti, ustrezna raba tal, ustrezen način gradnje objektov, ustrezna organiziranosti alarmiranja, ustrezna organiziranost zaščite in reševanja v primeru poplav ter zavarovalništvo kot kurativni inštrument za omilitev posledic). (Mikoš, 2007)

Glavna obveza Poplavne direktive je, da morajo države članice za območja, kjer imajo na podlagi predhodne ocene poplave rek in morja pomemben škodljivi vpliv na prebivalce, njihovo zdravje, na okolje, kulturno dediščino in gospodarske dejavnosti, pripraviti načrt obvladovanja poplavne ogroženosti. Na podlagi določitve območij in stopnje poplavne ogroženosti ter ciljev za zmanjšanje poplavne ogroženosti mora načrt določiti program ukrepov za zmanjšanje ogroženosti. Pri tem Direktiva določa tudi, da programi ukrepov temeljijo na načelu stroškov in koristi ter na načelu solidarnosti. (Grčar, 2009)

Direktiva izrecno določa upoštevanje predhodno sprejetih evropskih dokumentov v postopku izvajanja obveznosti Poplavne direktive, predvsem pri zagotavljanju okoljskih ciljev in presoji vplivov izbranih ukrepov na okolje, redno poročanje držav članic o napredku dogajanja Evropski komisiji ter aktivno vključevanje javnosti v pripravo načrtov zmanjševanja ogroženosti.

Prenos določb poplavne direktive v nacionalno zakonodajo držav članic je bilo treba izvesti v roku dveh let po sprejetju Poplavne direktive (torej do 23.10.2009). Nadalje pa je izvajanje direktive mišljeno v treh stopnjah. V prvem koraku je morala vsaka članica do konca leta 2011 pripraviti predhodno oceno poplavne ogroženosti, v katerem bo območja ogroženosti razdelila na pomembna in manj pomembna. Do konca leta 2013 mora nato za vsa pomembna območja ogroženosti izvesti prve natančne karte poplavne nevarnosti in ogroženosti, do leta 2015 pa mora za ta področja pripraviti tudi konkretne načrte ukrepov zmanjševanja poplavne ogroženosti. Po vzpostavitvi prvih konkretnih načrtov so predvideni šestletni cikli preverjanja narejenega dela in posodabljanja načrtov.

#### **1.4 Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja UL RS št. 60/07: 3216**

Za potrebe izpolnjevanja obveznosti, ki jih je prinesla Poplavna direktiva, se je v Sloveniji *Zakon o vodah*, krovni pravni okvir za upravljanje z vodami in slovenska analogija evropski vodni direktivi, posodobil z nekaj pomembnimi zakonskimi dopolnili ter nekaj pomembnimi podzakonskimi akti. Med njimi področje kartiranja poplavne ogroženosti posebej ureja *Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja* (v nadaljevanju: Pravilnik), ki ga je vlada sprejela 1. 6. 2007. Ta povzema in za slovenski prostor konkretizira vse bistvene določbe evropske Poplavne direktive.

Cilji Pravilnika so povzeti po Poplavni direktivi in obsegajo: (Grčar, 2009)

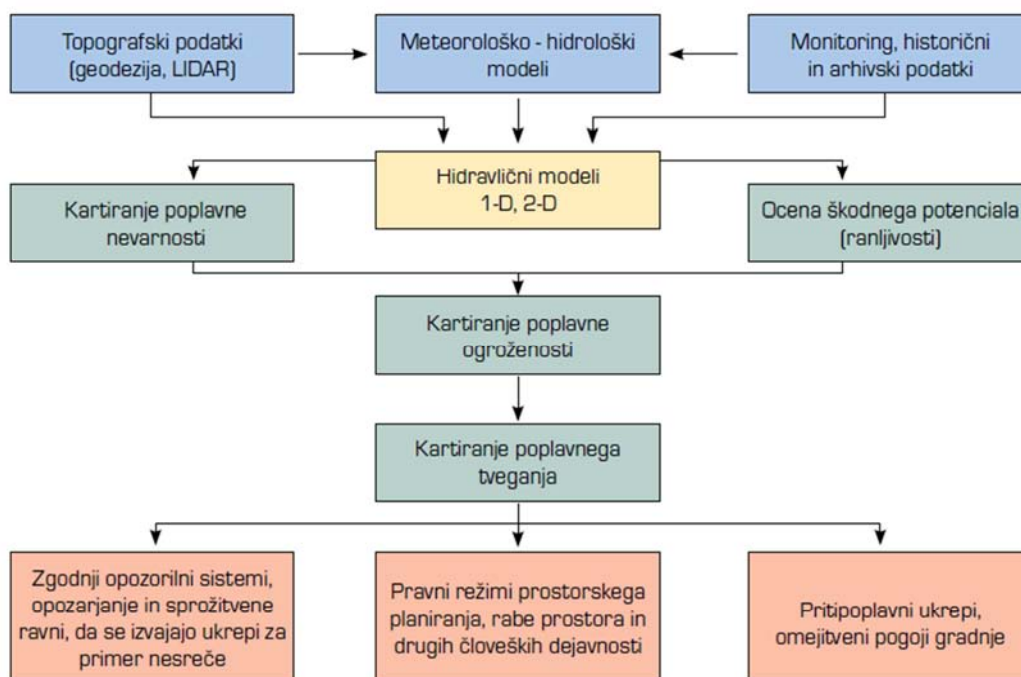
- oceno poplavnih razmer na določenem območju,
- načrtovanje ukrepov za zmanjšanje poplavne ogroženosti,
- načrtovanje rabe tal,
- načrtovanje ukrepov zaščite in reševanja v primeru poplav,

- ozaveščanje javnosti o pomenu poplavne nevarnosti ter
- izvajanje mednarodnih obveznosti.

S Pravilnikom smo v slovenskem prostoru dobili strokovnim in evropskim normam ustrezen način določanja poplavnih in erozijskih območij, način razvrščanja zemljišč v razrede poplavne in erozijske ogroženosti, merila za določanje razredov poplave in erozijske ogroženosti ter način priprave ter opreme ustreznih kartografskih prikazov. (Rak in sod., 2008)

*Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja* predstavlja sodobno metodologijo za zmanjšanje poplavne ogroženosti, ki temelji na poznavanju preteklih dogodkov in monitoringu okolja, za kar najprej izdelamo ustrezno hidravlično prognozo. Ta je nujna za pridobitev karte poplavne nevarnosti, s pomočjo analize ranljivosti območja pa lahko nato iz nje dobimo karto poplavne ogroženosti. Karta ogroženosti je dokument, ki se uporablja kot referenčna osnova v nadaljnjih procesih zagotavljanja poplavne in erozijske varnosti družbenega in fizičnega prostora, kot so izdelava načrta ukrepov za zmanjšanje poplavne in erozijske ogroženosti, prostorski načrt, priprava načrta za zaščito in reševanje ter osveščanje javnosti. Ukrepi za zmanjšanje poplavne ogroženosti v skladu z evropskim pristopom zagotavljanja varnosti večinoma temeljijo na preventivnih metodah.

Celotna slovenska metodologija načrtovanja zmanjšanja poplavne ogroženosti, kot jo definira Pravilnik, je povzeta po uspešnih evropskih praksah in smernicah Evropske vodne direktive, nazorno pa jo prikazuje spodnja shema:



Slika 2: Shema sodobne metodologije načrtovanja zmanjšanja poplavne ogroženosti po Pravilniku (Rak in sod., 2007, str. 110)

Predstavljeni Pravilnik je bil metodološka podlaga za izdelavo Kart poplavne ogroženosti, ki so bile za potrebe analize občutljivosti izdelane v sklopu diplomske naloge. Konkreten postopek izdelave je podrobneje predstavljen v poglavjih 2.7 Postopek izdelave Karte poplavne ogroženosti in 3.4 Izdelava Karte poplavne ogroženosti.

### **1.5 Uredba o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja UL RS št. 89/08: 3807**

V sklopu predstavitve osnovnih dokumentov, ki v slovenskem prostoru upravljajo področje poplavne varnosti, ne moremo mimo *Uredbe o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda* (v nadaljevanju: Uredba). Gre za še en pravni akt slovenske zakonodaje, ki je nastal neposredno na osnovi vsebine in določil Evropske poplavne direktive. Namenjen je določitvi pogojev in omejitev za posege in izvajanje dejavnosti v prostoru, za katerega je bilo ugotovljeno, da je ogrožen zaradi poplav ali erozije. Uredba torej skrbi za zmanjševanje poplavne in erozijske ogroženosti družbenega okolja, ohranitvi vodnega in obvodnega prostora, potrebnega za poplavne in erozijske procese, in zagotavlja uresničevanje okoljskih ciljev na območju poplav. (Uredba, 2008). Zasnovana je v duhu trajnostnega razvoja, saj predvideva, da umeščanje novih posegov v prostor ne sme poslabšati obstoječe poplavne ali erozijske ogroženosti območja.

Najzanimivejši oz. najbolj konkreten del Uredbe sta prilogi. Prva priloga predstavlja pregleden seznam konkretnih fizičnih posegov v prostor, opremljen z morebitnimi omejitvami in dodatnimi pogoji za umestitev v obvodni prostor glede na stopnjo njegove poplavne nevarnosti. Glede na ranljivost, lego, okolico območja ter stopnjo vpliva na okolje so posameznim vrstam objektov znotraj posameznih kategorij (stanovanjske stavbe, nestanovanjske stavbe, objekti transportne infrastrukture, cevovodi, komunikacijska omrežja, elektroenergetski vodi, kompleksni industrijski objekti in drugi gradbeni inženirski objekti) dodeljene interne ocene pogojev in omejitev (-, <sup>-1</sup>, <sup>-2</sup>, +) za vsak razred poplavne nevarnosti (majhna, srednja, velika). Druga priloga pa prikazuje seznam dejavnosti, ki ogrožajo ali pa so pomembne za varnost ljudi, okolja in kulturne dediščine, ter podaja pogoje njihovega izvajanja v območju posameznega razreda poplavne ali erozijske nevarnosti.

Uredba je torej en od dokumentov, ki aktivno urejajo izvajanje zadnjega koraka v shemi sodobnega pristopa k varstvu pred poplavami, kot je prikazana na sliki 1, to je prevzem tveganja. Podlaga za uporabo Uredbe je izdelana karta poplavne nevarnosti, na podlagi te pa Uredba z namenom ohranjanja oz. zmanjšanja obstoječe poplavne ogroženosti podaja konkretne omejitve pri umeščanju posegov in dejavnosti v poplavno nevarna območja.



## 1.6 Območja pomembnega vpliva poplav

V skladu s postopkom izdelave sistema za zmanjševanje poplavne ogroženosti, predvidenim v Poplavni direktivi, je Ministrstvo za kmetijstvo in okolje konec julija 2012 pripravilo seznam tistih območij, ki so zaradi pomembnega vpliva poplav prepoznana kot območja potencialno pomembne poplavne ogroženosti v RS. Prvotni seznam 56 območij pomembnega vpliva poplav (OPVP) se je po dvomesečnem obdobju posvetovanja z zainteresirano javnostjo preoblikoval in razširil v končni verziji vsebuje 61 območij širom cele Slovenije.

Območja, ki so se uvrstila na seznam OPVP, predstavljajo 40% poplavno ogroženega potenciala v RS, na seznamu pa so se uvrstila tudi območja, ki spadajo v 20% najbolj ogroženih področjih glede na posamezne kriterije ogroženosti (zdravje ljudi, gospodarstvo, kulturna dediščina, občutljivi objekti,...) oz. v 33% najbolj ogroženih področij po kriteriju okolja. (Đurovič, 2012)

Pomen določitve območij pomembnega vpliva poplav je velik, saj v metodologiji evropskega koncepta zmanjševanja poplavne ogroženosti predstavlja most med relativno površnimi kartami v Predhodni oceni poplavne ogroženosti in visoko strokovnimi kartami poplavne ogroženosti, kakršne so predvidene v Pravilniku. Izdelava slednjih za področje celotne Slovenije bi bila namreč odločno predraga in predvsem nesmiselna, zato je do konca leta 2013 izdelava KPO predvidena le za območja, ki so se uvrstila na seznam OPVP. Isto velja tudi za Načrt za zmanjšanje poplavne ogroženosti, ki mora biti narejen do konca leta 2015 – ta bo v prvem ciklusu obravnaval le izbranih 61 območij.

Seznam OPVP tako predstavlja izhodiščni strateški dokument, s katerim država v posameznem ciklu usmerja pozornost na tista območja, ki bodo prednostno deležna nadaljnjih aktivnosti na področju zmanjševanja poplavne ogroženosti. (MKO, 2012)

## 2 TEORETIČNA IZHODIŠČA

### 2.1 Osnove hidravlike prostega toka

Mehaniko splošnega gibanja tekoče vode v matematičnem smislu enoznačno določajo trije elementarni zakoni oz. enačbe hidromehanike, katerih poznavanje in uporaba je bistvena za popis hidravličnih razmer obravnavanega problema. To so zakon o ohranitvi mase, zakon o ohranitvi gibalne količine in zakon o ohranitvi energije. (Steinman, 1999)

#### 2.1.1 Kontinuitetna enačba (zakon o ohranitvi mase)

Kontinuitetna enačba izhaja iz pogoja, da je sprememba mase tekočine v poljubnem volumnu enaka razliki dotoka in iztoka na površini volumna. Matematično se ta enakost zapiše v obliki:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV = - \iint_S \rho \vec{v} d\vec{S} = - \iiint_V \operatorname{div}(\rho \vec{v}) dV \quad (1)$$

Z upoštevanjem poenostavitve gibanja, kot so enodimenzionalnost in stacionarnost toka ter nestisljivost tekočine, se enačba preoblikuje v bistveno lažje rešljivo analitično obliko, imenovano Bernoullijeva enačba:

$$v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2 = \dots = v_i \cdot S_i \quad (2)$$

#### 2.1.2 Navier-Stokesova dinamična enačba (zakon o ohranitvi gibalne količine)

Enačba izhaja iz predpostavke, da lahko sile, ki delujejo na kontrolni volumen, razdelimo na masne in površinske, kar lahko zapišemo z enačbo:

$$\iiint_V \frac{d\vec{v}}{dt} \rho dV = \iiint_V \vec{F} \rho dV + \iint_S [\sigma] d\vec{S} \quad (3)$$

Z uporabo matematičnih pretvorb in upoštevanjem veljavnosti na infinitezimalno majhnem volumnu  $dV$  lahko zgornjo enakost pretvorimo v enačbo, imenovano Navier-Stokesova enačba za realne tekočine:

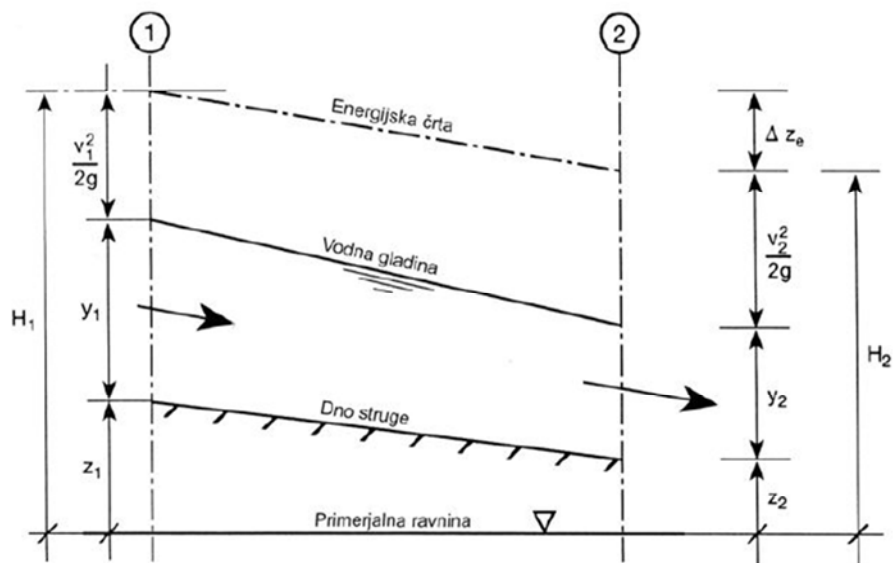
$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} + \frac{1}{\rho} \operatorname{div}[\sigma] = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \nu \Delta \vec{v} + \frac{\nu}{3} \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{v} \quad (4)$$

### 2.1.3 Energijska enačba (zakon o ohranitvi energije)

Zakon o ohranitvi energije pravi, da na spremembo celotne energije v sistemu vplivata sprememba toplote in dela. Sicer pa se vrste energije v sistemu prostorsko in časovno medsebojno pretvarjajo tako, da celokupna energija ostaja ista. Enačbo energijske bilance med posameznimi vrstami energije na dveh kontrolnih prerezih pa zapišemo v obliki dolžinskih enot na spodnji način:

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad (5)$$

V tej obliki so izpostavljene reverzibilne in analitično ugotovljive vrste energije, ki so med seboj popolnoma pretvorljive. V zadnjem členu  $Z_e$  se skrivajo vse ireverzibilne, v hidrotehničnem smislu neizkoristljive oblike energije (trenje, toplota, stiskanje in širjenje). V primeru toka s prosto gladino je energija tlaka v vseh profilih enaka, zato jo lahko izločimo iz enačbe. Energijsko bilanco toka s prosto gladino torej lahko grafično predstavimo s spodnjo shemo:



Slika 3: Bilanca energije med profili toka s prosto gladino (Mikoš, 2007)

### 2.1.4 Hrapavost omočenega oboda - Manningov koeficient

Neodvisno od poskusov matematičnega opisa gibanja toka sta Antoine de Chézy leta 1769 in Robert Manning leta 1889 razvila semi-empirični enačbi za praktične potrebe izračunov hitrosti realnega enakomernega toka s prosto gladino. Chezyjeva enačba je izpeljana iz definicije enakomernega toka, saj izenačuje sile gibanja (teža) in sile upora toku. Manningova (oz. Manning-Gauckler-Stricklerjeva) enačba pa je nastala brez izpeljave, izključno na podlagi eksperimentov. Zgradba obeh je podobna: hitrost enakomernega toka je pogojena z naklonom struge ( $I$ ), hidravličnim radijem ( $R=S/O$ ) in novo

uvedenim empiričnim koeficientom, ki posredno parametrizira vse vplive toku nasprotujočih sil. V praksi se pogosteje uporablja Manningova enačba, ki jo zapišemo v obliki: (Steinman, 1999)

$$\bar{u} = \frac{1}{n_g} \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{I} \quad (6)$$

kjer pomenijo:

- $\bar{u}$  povprečna hitrost vodnega toka vzdolž prečnega prereza,
- $n_g$  Manningov koeficient hrapavosti,
- $R$  hidravlični radij (kvocient površine in omočenega oboda prereza),
- $I$  padec dna vodotoka.

Kompleksnost te na videz preproste enačbe se skriva v Manningovem koeficientu hrapavosti ( $n_g$ ). Ta vsebuje vplive sil upora toku vode, ki jih ne moremo direktno izmeriti, lahko pa izkustveno določimo njihov vpliv na gibanje vode. Ker energijske izgube večjih »točkovnih« ovir v vodotoku (premostitve, prepusti, pragovi) obravnavamo posebej, zajemajo vrednosti Manningovih koeficientov večinoma le vplive linijskih energijskih izgub. Te so v največji meri pogojene z relativno hrapavostjo ostenja rečnega kanala, pa tudi materiala ostenja, stopnje vegetacijske razraščeniosti, stopnje meandriranja osi vodotoka, spreminjanja oblike prečnih prerezov, količine plavin v vodi. (Müller, 2009)

Vrednosti posameznih vplivnih faktorjev lahko določimo za vsak model posebej preko meritev pretokov, gladin, karakteristik ostenja, gradientov vertikalnih hitrosti. V veliko pomoč pri določevanju hrapavosti tal v praksi so nam t.i. določevalni ključi oz. preglednice Manningovih koeficientov. Te podajajo eksperimentalno določene vrednosti Manningovih koeficientov za morfološko zaokrožene tipe naravnega ali umetnega ostenja vodotokov, s katerimi se srečujemo v realnih situacijah (npr. močno zaraščeni vodotoki, betonske struge,...). Tabele opisujejo le najpogostejše in karakteristične vrste podlag, naloga izdelovalca modela pa je, da te koeficiente prilagodi realni, večinoma bolj kompleksni situaciji.

Tako kot pri drugih vhodnih parametrih je za točnost končnega hidravličnega izračuna poleg izbire Manningovih koeficientov pomembna tudi gostota zajema. Pri enodimenzionalnih modelih je gostota podanih vrednosti Manningovih koeficientov navadno vezana na izbrano število prečnih profilov ter število lamel v posameznem profilu, pri dvodimenzionalnih modelih pa je omejena na število oz. velikost posameznih računskih ploskovnih celic.

### 2.1.5 Spodnji robni pogoj

Zelo pomemben člen določitve hidravličnih razmer na obravnavanem odseku je pri mirnem toku spodnji robni pogoj. Z njim upoštevamo, kakšen je vpliv razmer dolvodno na dinamiko toka znotraj obravnavanega območja. S spodnjim robnim pogojem programu podamo že znano oz. predvideno

hidravlično stanje vodotoka na zadnjem dolvodnem odseku računskega območja, na podlagi katerega hidravlični program računa še neznane razmere gorvodno. V splošnem se kot spodnji robni pogoj lahko uporablja preliv s kritično globino (npr. za primer modeliranja zaježitve s pragom ipd.), kota fiksne gladine vode (npr. izliv rek v jezero ali morje ali večjo reko) ali pa kota normalne globine vode oz. padec dna. V hidravličnem modeliranju, kjer analizirani odsek dolvodno ni omejen s kakšno posebno spremembo toka vode, pač pa se tok vode normalno nadaljuje, kot spodnji robni pogoj uporabimo koto normalne globine, torej kot spodnji robni pogoj predpostavimo stalni enakomerni tok vodotoka. Pri določanju tovrstnega robnega pogoja moramo paziti, da izberemo tako veliko računsko območje oz. da mesto spodnjega robnega pogoja postavimo tako daleč dolvodno od območja neznanih hidravličnih razmer, da smo lahko prepričani, da je postavljeni robni pogoj res realen oz. da vpliv negotovosti izzvani do analiziranega območja.

## 2.2 Hidravlično modeliranje

Naloga vsakega modela v širšem smislu je popis oz. translacija realnih zakonitosti opazovanega problema na abstraktni nivo z namenom podrobnejšega spoznavanja, analiziranja oz. reševanja problema. Da lahko govorimo o dobrem modelu, je nujno, da model vsebuje tiste lastnosti originala, ki so bistvene za doseganje ustrezne podobnosti med modelom in prototipom (realnega stanja). Po drugi strani pa mora model z opuščanjem nepotrebnih oz. malo vplivnih elementov realno sliko poenostaviti do stanja, ko dobimo obvladljivo število vhodnih parametrov oz. končno število enačb, ki ravno še omogočajo zadovoljivo rešitev problema. Zmanjšanje števila spremenljivk je še kako pomembno pri izdelovanju modelov v vodarski praksi. Hidravlični modeli namreč popisujejo določeno dogajanje v naravi, kjer nastopa neobvladljivo veliko število dejavnikov, ki imajo vsaj malenkosten vpliv na rešitev iskanega problema, zato je njihova redukcija oz. racionalna selekcija v matematičnem, predvsem pa v ekonomskem smislu nujna. (Mlačnik in sod., 2003)

Modelom, ki jih uporabljamo za preučevanje obnašanja tekočin, pravimo hidravlični modeli. Ti popisujejo enega najbolj kompleksnih in analitično najtežje opisljivih področij naravoslovja oz. mehanike, kjer vladajo analitično večinoma nerešljivi matematični zakoni. Uporabljamo jih, kot nas zanima časovno in prostorsko spreminjanje bilance vodne energije tj., ko nas zanima potek vodne gladine, tlakov, hitrosti in pretokov, ali pa na vodni tok navezanega transporta snovi (plavin, suspenzij, plavja) oz. onesnažil.

Hidravlični modeli lahko simulirajo tok s prosto gladino, tok v cevovodih, v podtalnici, ... V tej nalogi bodo, zaradi osredotočanja na hidravlično modeliranje površinskih vodotokov, pod pojmom hidravlični modeli mišljeni izključno modeli za tok s prosto gladino.

Hidravlični modeli so zaradi zapletenosti reševanja in velikega števila teoretičnih spremenljivk večinoma dopolnjeni s pomembnimi empiričnimi moduli, ki zaobidejo tiste dele enačb, za katerih

matematično reševanje nimamo dovolj podatkov oz. izračun katerih bi trajal predolgo. Zato predstavljajo nepogrešljiv del matematičnega hidravličnega modeliranja laboratorijsko določeni empirični koeficienti, ki prek opisnih ključev nadomeščajo vse neznane, a za izračun pomembne parametre. Čeprav z empiričnimi koeficienti sicer znatno olajšamo zapletenost računskih postopkov modela, z njihovim uvajanjem povzročimo, da model ni več strogo konceptualen. To pomeni, da je treba pred uporabo z umerjanjem vedno znova preveriti pravilnost njegovega delovanja.

### **2.2.1 Matematični in fizični hidravlični model**

V grobem sta se razvila dva glavna pristopa k modeliranju hidravličnih problemov. Starejšemu pristopu s fizičnimi hidravličnimi modeli se je z razvojem računalniške tehnologije pridružilo še matematično hidravlično modeliranje.

Matematični hidravlični modeli so računalniške kode oz. programi. Sestavljeni so iz končnega števila enačb, ki se rešujejo numerično, zato sodijo med numerične modele. V svojem bistvu so konceptualni modeli, saj so v grobem sestavljeni iz temeljnih matematičnih oz. hidravličnih zakonitosti, vendar so pogosto dopolnjeni z empiričnimi komponentami.

Matematični modeli so zaradi svoje narave (odsotnost fizične komponente oz. računalniška abstrakcija) izredno priročno orodje, ko je do rešitve hidravličnega problema potrebno priti z velikim številom poskusov ter pogostim spreminjanjem vhodnih parametrov. Poleg tega eliminirajo problem prostorske potratnosti fizičnih modelov. Njihove slabosti pa so:

- odvisnost od fizičnih modelov v fazi razvoja programske opreme ter v fazi umerjanja,
- nevarnost poenostavitve problema zaradi omejene računske zmoglosti modela,
- časovno zamudno izračunavanje obsežnejših problemov,... (Šantl in sod., 2010)

Ker noben tip modela nima absolutne prednosti pred drugim, je poznavanje prednosti in slabosti vsakega tipa hidravličnih modelov ter poznavanje narave našega problema bistveno pri odločitvi za ustrezen tip modela. Prvi korak k uspešni rešitvi je namreč že sama izbira tistega modela, ki se znotraj pogojev našega problema najbolje znajde. Vedno pogostejša pa je tudi uporaba t.i. hibridnega hidravličnega modela, t.j. modela, kjer se fizični in matematični model medsebojno preverjata, obenem pa dopolnjujeta v svojih močnih področjih. Čeprav je tak model precej bolj kompleksen, pa je njegova uporaba smotrna v primerih, kjer potrebujemo zelo natančne rezultate, saj združuje vse dobre lastnosti posamezne vrste modela. (Rak in sod., 2011)

### **2.2.2 Umerjanje in potrditev modela**

Prvi test pravilnosti modelnih izračunov je primerjava z izmerjenimi, realnimi vrednostmi v naravi. Ta nam da potrditev, da imamo model umerjen na realno stanje. Boljše in številčnejše kot so razpoložljive

meritve, bolj natančno lahko umerimo model. Postopku sistematičnega in postopnega prilagajanja lastnosti modela prototipu do mere, da se z zadovoljivo natančnostjo približa dogajanju v realnosti, pravimo umerjanje oz. kalibracija modela. V praksi to največkrat pomeni spreminjanje podanih parametrov, ki se nanašajo na trenjske izgube (Manningov koeficient trenja, koeficient turbulentne viskoznosti ipd.)

Ko je model umerjen, se njegova točnost preveri še preko primerjave s podatki, ki niso bili uporabljeni v postopku kalibracije. Temu postopku pravimo potrditev oz. validacija modela. Po uspešni validaciji se za model predpiše še predvideno območje oz. doseg njegove uporabnosti. (Rak in sod., 2006)

### **2.3 Zajem topografskih podatkov**

Model je naprej treba vpeti v prostor. Osnovni cilj je zato pridobiti čim bolj natančne podatke o geometriji prostora, po katerem teče obravnavan vodotok, saj nam le ustrezno popisan in realen tridimenzionalen model terena lahko nudi dobro osnovo za pravilnost nadaljnjih izračunov. V matematičnem modeliranju je prototip modeliran z oblakom 3D točk obravnavanega območja (vsaka s svojimi absolutnimi koordinatami  $x$ ,  $y$  in  $z$ ), ki skupaj tvorijo t.i. digitalni model terena, DMT (angl. digital terrain model, DTM) ali mrežo neenakih trikotnikov (TIN mrežo). Ker potrebujemo za hidravlično modeliranje zajem prostorskih podatkov z obsežnega območja, predstavlja velik izziv znotraj finančnih in časovnih omejitev priti do zadovoljivo goste mreže podatkov ustrezne natančnosti. Reševanje tega problema ni enoznačna naloga in je predvsem v primerih, ko je zahtevana velika natančnost končnih hidravličnih izračunov, sestavljena iz različnih, med seboj dopolnjujočih se tehnik zajema terenskih podatkov. Premalo natančni podatki nam namreč dajejo zgrešeno podobo realnega stanja, prav tako pa lahko tudi natančni, a prerediti zajeti podatki ustvarijo preveč generalizirano sliko površja, kjer se lahko izgubijo za izračun pomembni reliefni detajli. Zato je potrebno izbiro gostote merjenja točk vedno uskladiti z razpoložljivo natančnostjo posamezne metode zajema prostorskih točk.

Pri zajemu prostorskih podatkov za potrebe hidravličnega modeliranja je prostor smiselno razdeliti na območje izven struge in območje znotraj struge. Večina (za množični zajem terena sicer bolj uporabnih) metod daljinskega zajema namreč zaradi optičnih lastnosti vode pri snemanju podvodnega območja daje rezultate nižje kakovosti. Ravno struga pa predstavlja del prostora, kjer se dogaja večina hidravličnega dogajanja, zato je kakovost njenega prostorskega modela še kako pomembna za dobre rezultate. Zato so se razvile različne metode, ki se danim fizikalnim pogojem snemanja površja prilagajajo tako, da dajejo kar najboljše rezultate. V konkretnem primeru uporabljeni metodi bosta tako ločeno opisani tako za zajem geometrije terena kot za zajem geometrije struge.

### 2.3.1 Geometrija terena – Tehnologija LIDAR

Digitalni model reliefa oz. površja je v splošnem mogoče pridobiti s pomočjo različnih tehnik, med njimi so najpogostejše:

- zajem podatkov iz obstoječih kart,
- geodetska izmera,
- aero-fotogrametrija,
- tehnologija LIDAR.

Vsaka metoda ima svoje prednosti in slabosti, v zadnjem času pa se za potrebe hidravličnega modeliranja kot najbolj uporabna kaže tehnologija LIDAR. Ker bo le-ta uporabljena tudi za pridobitev prostorskih podatkov za potrebe te diplomske naloge, bo podrobneje predstavljena.

Kratica LIDAR (angl. Laser Induced Direction And Ranging) pomeni lasersko merjenje smeri in razdalj. Začetki te tehnologije oz. njeni prvi uporabni rezultati segajo v sedemdeseta leta prejšnjega stoletja, razvila pa se je zaradi vojaških interesov. Deluje po istem principu kot njena tehnološka prednika sonar (angl. sound navigation and ranging – zvočna navigacija in merjenje razdalj) in radar (angl. radio detection and ranging – zaznavanje radijskih valov ter merjenje razdalj): na osnovi poznavanja hitrosti uporabljenega valovanja ter merjenja časa potovanja impulza od vira do tarče ter nazaj je moč izračunati razdaljo do tarče. Integracija vseh izmerjenih razdalj v prostoru okoli senzorja pa daje sliko okolice. Ker pa so v tehnologiji LIDAR uporabljena valovanja z manjšo valovno dolžino, to v primerjavi s sonarjem ali radarjem omogoča merjenje precej manjših objektov, kar posledično pomeni bogatejši zajem podatkov, višjo natančnost, večjo prodornost žarkov ter širitev spektra uporabnosti tehnologije (npr. merjenje količine aerosolov, batimetrične raziskave, prepoznavanje različnih vrst vegetacije, ...). Ker je za doseganje primerne natančnosti meritev bistveno poznavanje točne lokacije vira EM valovanja, se je lahko šele v osemdesetih letih z razvojem tehnologije GPS (global positioning system) uporaba lidarskih posnetkov s kopenskega oz. stacionarnega (angl. *ground base*) razširila tudi na področje zračnega oz. letalskega (angl. *airbourne*) zajema terenskih podatkov. Tehnologija LIDAR se zato dandanes zaradi izjemne razširjenosti in uporabnosti večinoma uporablja v kontekstu zračnega lidarskega skeniranja (*airbourne LIDAR scanning – ALS*). Ta je v osnovi sestavljen iz štirih komponent.

*Laser* je vir elektromagnetnega valovanja, ki glede na namen, pogoje snemanja in zahtevano natančnost teren »obstreljuje« z EMV različnih frekvenc in intenzitet, valovnih dolžin in premerov žarka. *Skenerji* skrbijo za ustrezno distribucijo laserja po površini tako, da preko optičnih naprav premikajo izhodni kot laserja iz naprave in s tem ustvarjajo vzorec skeniranja, ki »pometa« po območju snemanja. *Foto detektor* je senzor, ki sprejema informacije odbitih signalov. Bistveni del pa je *navigacijski sistem*. LIDAR sam po sebi meri le razdalje do točk, kar nam še zdaleč ne prinese



védenja o natančni legi posameznih točk v globalnem koordinatnem sistemu (x,y,z). Vsak impulz, ki ugotovi razdaljo med virom in tarčo, mora zato biti tudi opremljen z informacijo o točni legi vira ter točnem kotu oz. smeri žarka, v kateri je le-ta potoval. Prvo zahtevo izpolnjuje diferencialni sprejemnik globalnega pozicioniranja (DGPS), drugo pa inercialna merilna enota (IMU). S temi podatki se lahko po metodi polarnih koordinat izračuna natančno lego vseh točk. Zaradi velikega števila atributov, ki jih je treba pripeti vsaki izmerjeni točki, je za pridobitev uporabnih podatkov potrebna njihova naknadna obdelava. ALS torej (še) ne omogoča pridobivanja podatkov v realnem času. (Gosar in sod., 2006)

ALS tehnologija danes ponuja hiter in natančen zajem 3D podatkov, ki se uporabljajo večinoma za izdelavo digitalnih modelov površja (DMT oz. DEM). Njene značilnosti so:

- hiter in gost zajem točk (več kot 30 000 točk na sekundo, gostota zajema 10 – 20 točk na m<sup>2</sup>),
- visoka vertikalna (do 2cm) ter pozicijska (10 – 15 cm) natančnost (Radovan, D.),
- lasten (aktivni) vir svetlobe, ki omogoča snemanje, neodvisno od vremenskih dejavnikov,
- lažja obdelava, a dražja tehnologija v primerjavi s fotogrametrijo.

Tehnologija ALS v vodarstvu, kjer se potrebuje čim bolj natančne digitalne modele višin na precej velikih območjih, že izpodriva drago in zamudno klasično geodetsko izmero in tako predstavlja vodilno metodo pridobivanja reliefnih podatkov za potrebe hidravličnega modeliranja.

Široke možnosti uporabe tehnologije LIDAR poleg pridobivanja kakovostnih DMR modelov istočasno prinašajo tudi ostale, za hidravlično modeliranje pomembne podatke. Ti so skriti v drugih in nadaljnjih odbojih žarkov, razkrivajo pa podatke o vegetacijskem pokrovu območja, rabi tal in gladini vodotokov. (Rak in sod., 2006)

### **2.3.2 Geometrija struge – geodetska izmera**

Načeloma lahko pridobimo informacije o obliki struge z vsemi zgoraj naštetimi tehnikami zajema prostorskih podatkov, vendar se je za podvodno snemanje zaradi specifičnih optičnih razmer razvilo nekaj metod, ki v primerjavi z že omenjenimi omogočajo boljšo natančnost zajetih podatkov. Taka je npr. ultrazvočno snemanje ali batimetrična tehnologija LIDAR (ALB). V pravih pogojih so le-te zelo uporabne predvsem za hiter in relativno natančen množični zajem podatkov, vendar v absolutnem smislu kot najbolj natančna še vedno velja geodetska izmera.

Gre za klasično in uveljavljeno tehniko pridobivanja prostorskih podatkov s pomočjo geodetskih inštrumentov. Tehnološko gledano lahko geodetske metode (tahimetrija, GPS,...) dosegajo najvišje razpoložljive natančnosti (angl: State of the Art), vendar pa finančne, logistične in časovne omejitve navadno dopuščajo izmero točk z relativno natančnostjo le 2-4 cm v vseh smereh. Absolutna natančnost izmere (vpetost teh točk v državno geodetsko mrežo) je odvisna od natančnosti položaja

referenčnih točk, ki se jih izračuna s pomočjo GPS sprejemnikov. V grobem se pozicijska natančnost ohrani (cca. 2 cm), vertikalna pa poslabša (5 – 10 cm). Velika slabost te metode je njena dolgotrajna in draga izvedba, zato je metoda neprimerna za snemanje večjih območij. Kljub temu ostaja vodilna metoda za natančen zajem manjših, a pomembnih območij (hidrotehnični objekti, premostitve, ovire). (Radovan, D.)

## 2.4 Hidrološki podatki

Za izdelavo hidravličnega modela med drugim potrebujemo hidrološke parametre modeliranega vodotoka. V primeru modeliranja stalnega toka so to največje velikosti pretokov vode s projektnimi povratnimi dobami. Če pa modeliramo realno stanje poplavnega dogodka (nestalni tok), pa potrebujemo celotni hidrogram odtoka projektnih poplavnih dogodkov. Hidrogram pretoka (stalni ali nestalni) nam služi kot začetni pogoj v hidravličnem modeliranju.

### 2.4.1 Hidrogram pretoka - začetni pogoj

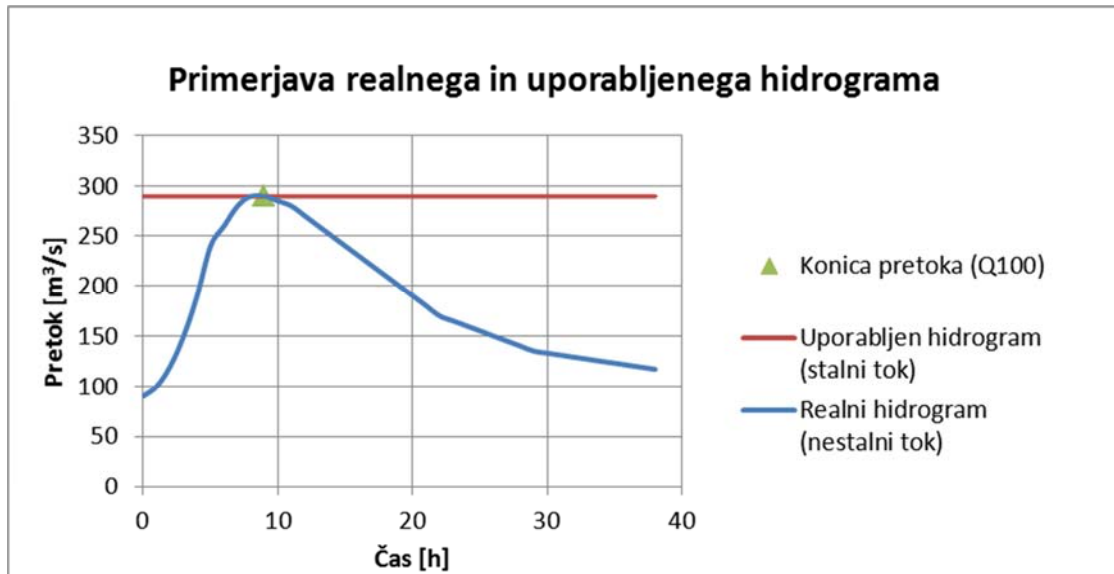
Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav, na podlagi katerega bodo izdelane karte poplavne ogroženosti, določa, da je na karti poplavne nevarnosti potrebno prikazati poplavne linije za poplavne dogodke 10-, 100- in 500-letnih povratnih dob. To pomeni, da so hidravlične raziskave v tem projektu narejene za velikosti stalnih pretokov s temi povratnimi dobami.

Povratna doba  $T$  nekega dogodka (v našem primeru  $T$  znaša 10, 100 in 500 let) je povprečni interval časa, v katerem bo vrednost nekega dogodka (v našem primeru pretok vodotoka) dosegla oz. preseгла določeno vrednost. To ne pomeni, da bo ta vrednost presežena vsakih  $T$  let, ampak se bo v daljšem časovnem obdobju v povprečju pojavila vsakih  $T$  let. (Brilly in sod., 2005)

Zaradi načela varnega projektiranja se hidravlične raziskave poplavljanja vodotokov za izdelavo kart poplavne ogroženosti izvaja s predpostavko stalnega toka projektnega pretoka. Funkcijo preprostega hidrograma stalnega toka, uporabljenega v modelni raziskavi, bi lahko zapisali kot:

$$Q(t) = const. = Q_{max} = Q_{100(10, 500)} \quad (7)$$

Predpostavka stalnega toka je gotovo na varni strani projektiranja (prikaže večjo poplavno nevarnost) kot sicer realnejša predpostavka nestalnega toka, kjer bi hidrogram pretoka dosegel projektno vrednost le v svoji konici. V naši analizi bo zato v skladu z uveljavljeno prakso izdelovanja kart poplavne nevarnosti uporabljen hidrogram stalnega toka. V nasprotnem primeru bi morali izvesti še ustrezno hidrološko študijo, da bi za dano območje pridobili ustrezno obliko hidrograma odtoka. Razliko med realnim (nestalnim) in uporabljenim (stalnim) hidrogramom pretoka pokaže spodnja slika.



Slika 4: Shematična primerjava oblike realnega in uporabljenega hidrograma

## 2.4.2 Določanje projektnih pretokov

Vsak prostorski načrt oz. projekt, ki je umeščen v obvodni prostor, je glede na zahtevano varnost oz. trajnost predvidenega objekta dimenzioniran na neko izbrano velikost pretoka. Referenčni pretok, ki smo ga izbrali pri načrtovanju projekta, imenujemo »projektni pretok« (*angl.: design discharge*). Za lažje dimenzioniranje in standardizacijo velikost izbranega pretoka običajno podajamo v obliki pretoka s posamezno povratno dobo. To poimenovanje nam pove, kakšen statistični časovni razmik med dvema podobnima poplavnima dogodkoma lahko pričakujemo. Tem večji je ta razmik, tem varnejši bo objekt pred poplavami. To vrednost pridobimo s statistično obdelavo znanih pretokov iz preteklosti.

Ker se s časom pojavljajo vedno novi poplavni dogodki, ki spreminjajo niz znanih izmerjenih pretokov, uporabljenih za izračun povratne dobe posameznega poplavnega dogodka, je treba izračune pretokov s posamezno povratno dobo periodično osveževati. To pomeni, da se lahko tudi vrednosti pretokov s določeno povratno dobo spreminjajo časom. Ker je vsak projekt izdelan v nekem časovnem preseku, se moramo torej zavedati, da so izbrane vrednosti projektnih pretokov izračunane na podlagi takrat znanih pretokov iz preteklosti.

Podatke o velikostih pretoka s posamezno povratno dobo lahko pridobimo na različne načine. Najnatančnejše rezultate nam dajejo izračuni hidroloških modelov. S pomočjo umerjenih matematičnih hidroloških modelov (npr. HEC-HMS) lahko pridobimo približne podatke o zelenem pretoku (npr. 100-letna povratna doba) na podlagi analize površinskega odtoka padavinskega dogodka s 100-letno povratno dobo. Problem te metode je zelo kompleksno sestavljanje hidrološkega modela, za katerega potrebujemo veliko terenskih in statističnih podatkov (podatki o padavinah, podatki o geološki sestavi

podlage, podatki o naklonu površja, velikosti povodja in obliki povodja, časih zakasnitve,...), poleg tega pa moramo model umeriti glede na izmerjene, pa tudi statistično pridobljene vrednosti pretokov in oblike hidrogramov.

Drugi, precej bolj enostaven način prognoze vrednosti pretokov, je izračun s pomočjo statističnih operacij za ekstrapolacijo niza podatkov. Predpogoj za statistično obdelavo je le dovolj dolg in zanesljiv niz merjenih vrednosti konic maksimalnih letnih pretokov vodotoka v bližini obravnavanega odseka, za pridobitev katerega načeloma skrbi Agencija RS za okolje s svojo mrežo vodomernih postaj (VP). Iz njega lahko naredimo hidrogram pretoka oz. krivuljo trajanja. Hidrogram je kronološki prikaz spremembe pretokov po času, krivulja trajanja pa je izpeljana iz hidrograma in predstavlja empirično porazdelitev izmerjenih pretokov za določeno obdobje. (Brilly, 2005) Z njuno pomočjo lahko določamo različne statistične hidrološke vrednosti, pomembne za napovedovanje najverjetnejših velikosti pretokov poljubnih povratnih dob.

Predpostavljamo, da je porazdelitev velikosti konic v nizu maksimalnih letnih pretokov možno opisati z eno od uveljavljenih statističnih porazdelitvenih funkcij. Hidrološka praksa je pokazala, da omenjeni niz najbolje popisujejo porazdelitve, kot so logaritemska navadna, Gumbelova, Pearsonova III in logaritemska Pearsonova III. V hidroloških priročnikih je moč najti algoritme, ki močno olajšajo uporabo teh funkcij za izračun vrednosti projektnih pretokov. Ti algoritmi so večinoma tabelarične enoparametrške zveze med porazdelitveno funkcijo želene porazdelitve in osnovnima statističnima vrednostima  $m_x$  (srednja vrednost niza pretokov) in  $\sigma_x$  (standardna deviacija niza pretokov). Zveza je podana preko oblikovnega parametra  $z$ , ki je tabelarično zapisan za pomembnejše vrednosti porazdelitvene funkcije  $F(x)$  za posamezne porazdelitve. (Brilly in sod., 2005). Ker iščemo vrednosti pretokov s 10-, 100- in 500-letno povratno dobo ( $T = 10, 100$  in  $500$ ), nas zanimajo vrednosti porazdelitvene funkcije  $F(x) = 0,9$  ( $T = 10$ ),  $0,99$  ( $T = 100$ ) in  $0,998$  ( $T = 500$ ). Za ilustracijo postopka so za obravnavane vrednosti porazdelitvene funkcije  $F(x)$  podane vrednosti oblikovnega parametra  $z$ , ki določa obliko Gumbelove porazdelitve:

*Preglednica 1: Izrez potrebnih oblikovnih parametrov  $z$  za primer Gumbelove porazdelitve*

<b>F(x)</b>	<b>z</b>
0,9	1,305
0,99	3,137

Vrednosti  $F(x) = 0,998$  (povratna doba  $T = 500$ ) ni podane, a pretok  $Q_{500}$  lahko za potrebe določanja poplavnih površin po *Pravilniku* empirično izračunamo kot  $1,2$  (ali  $1,3$  ali  $1,4$ ) \*  $Q_{100}$ , pri čemer je velikost faktorja odvisna od velikost povodja vodotoka. S pridobljenimi podatki lahko vrednost pretoka  $X$  v odvisnosti od povratne dobe  $T$  za Gumbelovo porazdelitev izračunamo po spodnji linearni enačbi:

$$X(T) = m_x + z \cdot \sigma_x \quad (8)$$

Predvsem v izračunih pretokov z daljšimi povratnimi dobami prihaja tudi med omenjenimi porazdelitvami do večjih odstopanj. Tu so potrebne izkušnje izdelovalca, da izmed izračunanih vrednosti izbere tisto, ki se v danih pogojih zdi najbolj verjetna.

## 2.5 Tehnologija GIS

Ko govorimo o matematičnem hidravličnem modeliranju, ne moremo mimo tehnologije GIS, ki se je s svojim razvojem in uporabnostjo vpletla v več področij izdelave kart poplavne ogroženosti. Tehnologija GIS predstavlja računalniško podprt podatkovni sistem za zajem, shranjevanje, obdelave, analize in prikazovanje prostorskih podatkov. Bistven konceptualni poudarek tehnologije GIS je v tem, da lahko prostor razdelimo na poljubno število vsebinsko zaokroženih naravnih ali družbenih slojev (relief, vodno omrežje, vodovodno omrežje, nepremičnine,...). Ali drugače, mnogo materialnim ali nematerialnim elementom prostora oz. informacijam je moč enoznačno določiti njeno prostorsko komponento. Orodja GIS omogočajo prikaz in delo z bazami tovrstnih podatkov.

Ker pri hidravličnem modeliranju poplavnih območij upravljamo z veliko količino prostorskih podatkov (relief, raba tal, družbene oz. antropogene komponente okolja, rečna mreža...), predstavlja tehnologija GIS nepogrešljivo orodje pri tovrstnem delu. Uporablja se predvsem za vizualizacijo terenskih podatkov, določanje Manningovih koeficientov s pomočjo analiz satelitskih posnetkov površja in združitve prostorskih podatkov z rezultati hidravlične analize za pridobitev 3D ponazoritve razsežnosti poplavljenega območja.

Najpomembnejše področje uporabe GIS tehnologije v hidravličnem modeliranju predstavlja delo s topografskimi podatki (model reliefa), uporabna pa je tudi vizualizacija produktov hidravličnih programov. Za razliko od običajnega slikovnega vizualnega prikaza GIS namreč predstavlja zelo dobrodošel pristop za prenos izračunov med različnimi uporabniškimi službami, saj se prikaz izračunov v formatu GIS lahko enostavno integrira v že obstoječo GIS bazo ciljnega uporabnika podatkov in s tem močno poveča preglednost, kompatibilnost in uporabnost produktov hidravličnih analiz. Obratno pa lahko tudi hidravlični programi za svoje potrebe uporabljajo že obstoječe baze GIS podatkov, ki so bile narejene s pomočjo drugih programov. To so v primeru hidravličnih programov predvsem baze topografskih podatkov, lahko pa tudi podatkov o rabi tal, hidrološke mreže, objektih v prostoru,...

Topografski podatki (oblikovanost površja) se v matematičnih programih in GIS podatkovnih bazah prikažejo z modelom površja. Točke, ki jih pridobimo z različnimi tehnikami zajema površja, v modelu površja povežemo, da dobimo ploskve. Obstajata dva glavna načina zapisa ploskve in sicer lahko točke nastopajo v obliki rastrske mreže ali pa v obliki mreže neenakih trikotnikov (TIN). Vsak

zapis ima svoje pomanjkljivosti in prednosti, zato je primernost formata odvisna od vrste problema, tipa hidravličnega programa, želenega končnega rezultata,... Okvirni pregled prednosti in pomanjkljivosti enega in drugega zapisa je predstavljen v spodnji preglednici: (Šumrada, 2005 - 2)

*Preglednica 2: Primerjava med rastrsko in TIN ponazoritvijo prostorskih ploskev (Šumrada, 2005 – 2, str. 120)*

	<b>Gridna ponazoritev 3D ploskve</b>	<b>TIN ponazoritev 3D ploskve</b>
<b>Točnost modela ploskve</b>	Odvisna od ločljivosti gridne celice. Za povečanje točnosti je treba zgostiti celotno gridno mrežo.	TIN model ima spremenljivo gostoto točk, ki se lahko prilagajajo obsegu detajla. Za povečanje se lahko dodajajo točke na poljubnem območju.
<b>Verodostojnost ploskovnih objektov</b>	Rastrski pristop podaja vrednosti atributa v vogalih pravilne in konstantne gridne mreže. Lokalni detajli so zato posplošeni oz. izpuščeni.	Vsi detajli na ploskvi so shranjeni verodostojno s pomočjo koordinat detajlnih točk. Njihova gostota pa se lahko spreminja in prilagaja zapletenosti ploskve.
<b>Možne analize ploskve</b>	Določitev višine, sosedstvo, razpršenost, bližina, nakloni, vidnost, osenčenje, pot najmanjšega upora, profili, izolinije.	Določitev višine, višinske razlike, nakloni, vidnost, orientacije, izračun volumnov, poljubni profili, izolinije, modeliranje,...
<b>Uporabne možnosti</b>	Načrtovanje prometnic, hidrografske analize, perspektivni prikazi, senčenje reliefa, poplavljenost in pretoki, modeliranje ploskev.	Inženirska geodezija, načrtovanje prometnic, hidrografske analize, drenaža, perspektivni prikazi, detajlne izolinije, določanje vidnost,...

Najočitnejša razlika med obema pristopoma je v točnosti modela, saj je točnost modela ploskve TIN v primerjavi z gridno ploskvijo zaradi možnosti spremenljive gostote točk navadno večja, saj se z zgoščanjem točk na območjih izrazitejše ploskovne dinamike doseže boljše prileganje realni ploskvi. Na drugi strani je pri rastrskih modelih to možno le z zgoščanjem grida celotne mreže, kar pa ustvarja veliko količino nepotrebnih dodatnih podatkov.

V diplomski nalogi je bila zaradi lažje sinhronizacije podatkov o reliefu in hrapavosti površja ter zaradi narave modela Mike Flood uporabljena gridna oz. rastrska ponazoritev površja.

## 2.6 Natančnost izračunov hidravličnih modelov

Hidravlično modeliranje poplav je področje, ki je že v svojem bistvu (simulacija redkih in obsežnih naravnih pojavov) nagnjeno k veliko virom napak, posledično tudi k manj zanesljivim izračunom oz. rešitvam z večjim raztrosom zanesljivosti. Nenatančnost oz. nezanesljivost rezultatov hidravličnih analiz ima sledeče vzroke: (Brilly in sod., 2005)

- naključni in sistematični pogreški pri pridobivanju in zapisu vhodnih parametrov (pokvarjen ali nepopoln instrument, nepazljivost pri delu),
- omejena ali prenizka natančnost bistvenih vhodnih parametrov (topografija, hidrologija),
- ogromno število težko popisljivih in spremenljivih parametrov okolja, ki parcialno vplivajo na končni rezultat,
- napake pri izbiri empiričnih koeficientov v modelu (npr.  $n_g$ , oblikovni uporovni koeficient hidravličnih struktur v modelu),
- obsežno vplivno območje,
- nepopolna ali preveč posplošena struktura modela.

Ker je hidravlično modeliranje postopek, ki se uporablja pri izdelavi uradnih načrtov ukrepov varstva pred poplavami, so njegovi rezultati bistvenega pomena za odločitve na področju prostorskega planiranja ter posegov v prostor. Natančnost rezultatov v veliki meri vpliva na končno varnost okolja ter končno investicijsko vrednost morebitnih protipoplavnih posegov v prostor, zato obstaja velik strokovni in ekonomski interes po ugotovitvi natančnosti izhodnih parametrov hidravličnih analiz.

Stopnja nezanesljivosti vsakega izmerjenega vhodnega parametra neposredno vpliva tudi na natančnost izračunane veličine, ki je odvisna spremenljivka vhodnih podatkov. Če želimo torej izvedeti natančnost našega rezultata v hidravličnem izračunu, potem mora biti vsak podatek, ki smo ga uporabili v postopku izračuna, vedno opremljen z metapodatkom o njegovi natančnosti v obliki ustreznega odstotka napake. Za opremljanje podatkov z ustreznim redom natančnosti je zadolžen tisti, ki je ta podatek izračunal oz. izmeril (geodet, hidrolog, meteorolog,...). Primer pravilno podanega zapisa zgleда torej npr.:

$$Q_{100} = Q_{100} \pm 10\% \quad (9)$$

Pri tem je potrebno upoštevati dejstvo, da se prostor s časom spreminja. Še tako natančno izmerjeni vhodni podatki in še tako dobro nastavljen model nam bo sliko hidravličnega stanja izračunal le za pogoje, ki smo jih vstavili v model oz. le za trenutek v času, v katerem smo uporabljene podatke (npr. topografija ali hrapavost površja) izmerili. Zato se moramo zavedati, da imajo rezultati hidravličnih raziskav zaradi časovne spremenljivosti okolja omejen »rok trajanja« oz. obdobje uporabnosti. Hidravlične analize je treba zato v določenem časovnem intervalu ali po potrebi osveževati.

Odsotnost primernih metod oz. tehnik, s katerimi bi lahko natančno zajeli prostorske podatke, pomembne za izdelavo hidravličnega modela, je še posebej izrazita na področju določanja hidravlične hrapavosti. Gre namreč za parameter, katerega vrednosti je zaradi svoje kompleksne in relativne narave moč izmeriti le laboratorijsko in sicer s simuliranjem hrapavostih karakteristik najpogostejših materialov oz. podlag, ki jih srečujemo v realnem življenju. Realno določanje hrapavosti v primeru izdelave konkretnega hidravličnega modela torej poteka le prek uporabe eksperimentalno pridobljenih tabelaričnih vrednosti, ki so izmerjene za nekatere opisno določene vrste podlage.

Neskladnost med realno in iz tabel izbrano referenčno podlago, slaba terenska merljivost, tanka črta med oblikovnim in hrapavostnim uporom, predvsem pa velika prostorska in časovna spremenljivost so razlogi, ki hidravlično hrapavost uvrščajo med navadno najtežje določljive in posledično najbolj nenatančne vhodne parametre hidravličnega modeliranja.

Vhodni podatki imajo torej lahko različno natančnost, le-ta pa je odvisna od uporabljene tehnike zajema, pa tudi od tehnoloških, finančnih in časovnih omejitev. Zato lahko postopek izdelave primernega hidravličnega modela predvsem finančno optimiziramo tako, da:

- stopnjo natančnosti zajema podatkov prilagodimo najbolj nenatančnemu parametru, (ta nam v največji meri določa natančnost končnih rezultatov),
- stopnjo natančnosti prilagodimo velikosti vpliva posameznega parametra na natančnost končnih rezultatov (vplivnejše parametre je smiselno pridobiti z večjo natančnostjo).

Velikost vpliva posameznega parametra na delovanje celotnega modela preverjamo z metodo, imenovano analiza občutljivosti.

## **2.7 Analiza občutljivosti**

Za določanje zanesljivosti izračunov različnih modelov (meteorološki, hidrološki, ekonomski, kemijski, ekološki, hidravlični, ...) se pogosto uporablja analiza občutljivosti (angl. sensitivity analysis). To je metoda, ki se ukvarja s preučevanjem in opazovanjem vpliva sprememb vhodnih parametrov ali strukturnih lastnosti modela na rezultate modela. (Bosnić, 2007). Običajno poteka kot zaporedje poskusov, kjer v modelu kontrolirano spreminjamo po en izbran parameter ter opazujemo dinamiko sprememb. Motiv izdelave tovrstnih analiz je pridobiti védenje, kateri parametri se v določenem modelu kažejo kot pomembnejši in kakšna stopnja natančnosti teh parametrov je potrebna pri izbiri njihovih vrednosti za doseganje želene natančnosti produktov modela. Zaradi narave hidravličnega modeliranja imamo namreč pogosto opravka s parametri, ki so težko ali celo nemogoče merljivi. Analiza občutljivosti nam tako daje odgovore na vprašanja, kateri vhodni parametri morajo biti v luči relevantnih rezultatov modela izmerjeni v večji natančnosti oz. kateri parametri se v modelu izkažejo za manj pomembne oz. vplivne. (Hall, 2005)



Rezultati analize občutljivosti imajo neposredne ekonomske učinke, saj lahko s pomočjo dobre in uspešne analize racionaliziramo stopnjo natančnosti (in posledično tudi ceno) pridobivanja posameznih vhodnih parametrov, s tem pa se izognemo nesorazmerno potratnim metodam pridobivanja vhodnih podatkov.

Ker pri analizi občutljivosti opazujemo le neposredno korelacijo med vhodnimi in izhodnimi parametri, nam za samo raziskavo niti ni treba razumeti konceptualnega oz. matematičnega ozadja samega modela. Metoda je izrazito empirične narave, saj do zaključkov prihajamo na podlagi večjega števila ponovitev ter interpretacije dinamike opazovanih sprememb.

Uporabnost analize občutljivosti se kaže tudi v možnosti določanja natančnosti izhodnih parametrov glede na natančnost vhodnih. S preverjanjem spremembe izhodne količine ob spreminjanju posameznega vhodnega parametra znotraj meja njegove podane natančnosti lahko enoznačno ugotovimo vpliv nenatančnosti neodvisne spremenljivke na končno natančnost odvisne spremenljivke.

### **2.7.1 Področje uporabe v hidravliki**

V hidravliki kot analitično težko opisljivi znanosti je analiza občutljivosti predvsem pri modeliranju kompleksnejših pojavov pogosto edini možni način ovrednotenja parcialnih vplivov posameznih vhodnih parametrov na končni rezultat. Navadno nas zanima vpliv vhodnih podatkov nižje natančnosti oz. tistih parametrov, katerih natančno pridobivanje je najtežje ali najdražje.

Z uveljavljanjem in vedno večjo dostopnostjo tehnologij množičnega snemanja terenskih podatkov se razmerje med kakovostjo in ceno njihovega zajema postopno povečuje, kar ugodno vpliva na natančnost izračunov hidravličnih modelov. Prav tako sodobna merilna tehnika na področju monitoringa hidroloških kazalcev površinskih voda že dolgo zagotavlja natančnejše pretočne podatke skozi dolg časovni niz, le-ti pa zagotavljajo dobro podlago za izračun zanesljivih projektnih pretokov in morebitnega spodnjega robnega pogoja. Topografski, batimetrični in včasih tudi hidrološki vhodni podatki zato spadajo med bolj natančne parametre hidravličnega modeliranja.

Hrapavost površja kot empirični parameter, ki ga v praksi ni možno fizično izmeriti za vsako analizo posebej, pa ponavadi ostaja najmanj verodostojen parameter, ki se ga v praksi pogosto dokončno določa šele v fazi umerjanja modela. Njegove okvirne vrednosti so podane v obliki empiričnih preglednic, ki so nastale s pomočjo laboratorijskih poskusov sredi prejšnjega stoletja, podajajo pa le vrednosti nekaterih karakterističnih vrst podlag. Poleg tega gre tudi za vhodni parameter hidravličnega modeliranja, ki se zaradi spremenljivosti okolja med vsemi najhitreje spreminja s časom, kar še dodatno zmanjšuje njegovo zanesljivost. Parametri iz tabel se zato uporabljajo le za začetne, poenostavljene ali preproste izračune – za zahtevnejše primere pa je treba vrednosti Manningovih

koeficientov pridobiti z iteracijskim umerjanjem modela na podlagi zabeleženih podatkov o razsežnosti preteklih poplavnih dogodkov.

Analize občutljivosti v hidravličnem modeliranju zato pogosto preučujejo prav vpliv hrapavosti površja, saj gre za vhodni parameter z največjo vrzeljo med zanesljivostjo pridobljenih podatkov in velikostjo vpliva na končni rezultat. Analize občutljivosti modela na vrednosti Manningovega koeficienta tako raziskujejo npr. vpliv časovnega spreminjanja hrapavosti površja ali vpliv hrapavosti posameznega dela omočenega oboda (poplavna ravnica, brežina struge, dno struge).

### **2.7.2 Metode za izvedbo analize občutljivosti**

Vsem metodam oz. pristopom k analizi občutljivosti je skupno, da v postopku ugotavljanja vpliva neke spremenljivke v že izdelanem modelu spreminjajo le en parameter. Le tako lahko nedvoumno določimo pravo velikost njegovega vpliva na spremembe rezultatov modela, oz. povedano drugače, vse spremembe v izračunih lahko pripišemo le spremembi obravnavane spremenljivke.

Razlike v metodah izvedbe analize občutljivosti pa se pojavijo, ko se odločamo, na kakšen način bomo izbrali vrednosti podatkov, ki jih bomo uporabili za analizo občutljivosti. V grobem, glede na način določanja vrednosti opazovanega parametra, ločimo dva pristopa. Pri prvem raziskavo izvajamo z obvladljivo majhnim številom dobro premišljenih in »ročno« določenih vrednosti izbranega parametra. Te vrednosti lahko predstavljajo ekstremne oz. mejne realne vrednosti, lahko so to vrednosti različnih prevojnih pogojev, ali pa tipične vrednosti, ki opisujejo točno določeno realno situacijo, za katero nas obnašanje modela zanima. Drugi pristop analizo izvaja z velikim številom računalniško generiranih naključnih vrednosti obravnavanega parametra, z računalnikom pa se ugotavlja tudi odziv modela. Metodi, ki za simulacije razvoja dogodkov uporablja veliko število naključno generiranih slučajnih spremenljivk, pravimo metoda Monte Carlo. Čeprav je poznana in teoretično utemeljena že precej časa, pa je v širšo uporabo prišla z razvojem dovolj zmogljive računalniške tehnologije, ki je bila sposobna v realnem času izvajati tako veliko število simulacij.

Primer analize občutljivosti, kot je uporabljena v tej diplomski nalogi, spada v prvo skupino. Za vhodni parameter hrapavosti tal so izbrane realne ali potencialne kombinacije »paketov« Manningovih koeficientov, ki so se pridobili s pomočjo analize rabe tal za različne potencialne situacije. Število simulacij je majhno, tako da je vsakemu poskusu možno ločeno in natančno določiti konkretne posledice sprememb vhodnih podatkov na rezultate modela.

Občutljivost modela na spremembe hrapavosti je bila v prvi fazi ovrednotena z dvema neodvisnima faktorjema – faktorjem modelne neelastičnosti in faktorjem razpršenosti. Teoretični koncept posameznega faktorja je predstavljen v spodnjih poglavjih.

### 2.7.3 Faktor modelne neelastičnosti

Za  $Q_{10}$ ,  $Q_{100}$  in  $Q_{500}$  je bil za vse tri potencialne primere rabe tal izračunan kvocient spremembe Manningovega koeficienta in spremembe omočene površine, interno poimenovan kot *faktor modelne neelastičnosti* ( $FN$  [/]). Gre za vrsto kvocienta, ki je pogosto v uporabi pri statističnem določanju občutljivosti raznoraznih modelov. Poznamo ga npr. v mikroekonomiji, kjer se pojavlja pod pojmom cenovna elastičnost proizvoda oz. storitve, z njim pa raziskujemo vpliv spremembe cene proizvoda na spremembo njegove potrošnje. (Prašnikar, 2008) Faktor modelne neelastičnosti se npr. za primer 2 lahko zapiše s pomočjo sledeče enačbe:

$$\text{Faktor modelne neelastičnosti } FN = \frac{\frac{\Delta \bar{n}_{g_2}}{\bar{n}_{g_1}}}{\frac{\Delta S_2}{S_1}} \quad [/\] \quad , \quad (10)$$

kjer pomeni:

$\Delta \bar{n}_{g_2} = \bar{n}_{g_2} - \bar{n}_{g_1}$  razlika med povprečno vrednostjo Manningovega koeficienta omočenih celic,

$\bar{n}_{g_2}$  povprečna vrednost Manningovega koeficienta omočenih celic za primer 2,

$\bar{n}_{g_1}$  povprečna vrednost Manningovega koef. omočenih celic za primer 1,

$\Delta S_2 = S_2 - S_1$  razlika med obsegom poplavljenega območja v primeru 2 in primeru 1,

$S_2$  velikost poplavljenega območja za primer 2 in

$S_1$  velikost poplavljenega območja za primer 1.

Razumevanje faktorja neelastičnosti nam omogoča enolično in širše primerljivo interpretacijo rezultatov različnih analiz občutljivost. Ta brezdimenzijski faktor nam pove, kolikokrat večja je bila v posameznem poskusu relativna sprememba vhodnega parametra od relativne spremembe opazovanega izhodnega parametra. Ker so v našem primeru spremembe izhodnih parametrov manjše kot spremembe vhodnih parametrov, je kvocient, ki podaja razmerje med tema količinama, namenoma zasnovan tako, da je sprememba opazovane količine (izhodnega parametra) v imenovalcu. Kvocient tako daje vrednosti, večje od ena, kar je bolj priročno za razumevanje (ne)občutljivosti modela in pregledno primerjavo rezultatov različnih poskusov. S tem pa smo povzročili, da pravzaprav računamo faktor modelne neelastičnosti in ne faktor elastičnosti, kot bi ga v normalnih primerih, če bi zamenjali števec in imenovalec podane enačbe.

Vrednost faktorja neelastičnosti določenega izhodnega parametra 1 pomeni, da je model linearno občutljiv na spremembo opazovanega vhodnega parametra. V primeru primerjave hrapavosti tal in obsega poplavne površine bi to pomenilo, da npr. 10% celokupne napake pri določanju Manningovih koeficientov povzroči, da se bo obseg poplavljenega območja povečal za 10%. Gre za linearno neelastičnost. Analogno bi vrednost FN manjša od ena pomenila, da gre za zelo majhno neelastičnost oz. boljše, veliko elastičnost. Majhna relativna sprememba vhodnega parametra v tem primeru povzroči nesorazmerno večjo spremembo izhodnega parametra. V praksi to pomeni precej občutljiv oz. nezanesljiv model.

#### 2.7.4 Faktor razpršenosti

Za kontrolo izračunov faktorja neelastičnosti je bila z istimi serijami podatkov (velikost poplavljenega območja in srednja vrednost hrapavosti posameznega primera) občutljivost modela izračunana še s pomočjo druge, od prve povsem neodvisne statistične metode. To je kvocient relativne razpršenosti (standardne deviacije) povprečnih Manningovih koeficientov (povprečje vrednosti omočenih celic) in relativne razpršenosti pripadajočih velikosti poplavljenih površin, interno poimenovan kot *faktor razpršenosti* ( $FR$  [/]). Za posamezni poplavni dogodek ( $Q_{100}$  in  $Q_{500}$ ) je bila izračunana relativna standardna deviacija serije štirih vhodnih (hrapavost  $n_g$ ) in izhodnih (omočena poplavna površina  $S$ ) parametrov modela. Prek faktorja razpršenosti pa se je preverilo razliko njuni velikosti. Faktor razpršenosti je za primer stoletnih poplavnih vod definiran kot:

$$\text{Faktor razpršenosti } FR = \frac{\frac{\sigma_{n_{g_{100}}}}{\bar{n}_{g_{100}}}}{\frac{\sigma_{S_{100}}}{\bar{S}_{100}}} \quad [/\] \quad , \quad (11)$$

kjer pomeni:

$$\sigma_{n_{g_{100}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 (n_{g_{100}i} - \bar{n}_{g_{100}})^2}{4}} \quad \text{standardna deviacija serije Manningovih koeficientov za } Q_{100},$$

$$\bar{n}_{g_{100}} \quad \text{povprečna vrednost serije Manningovih koeficientov za } Q_{100},$$

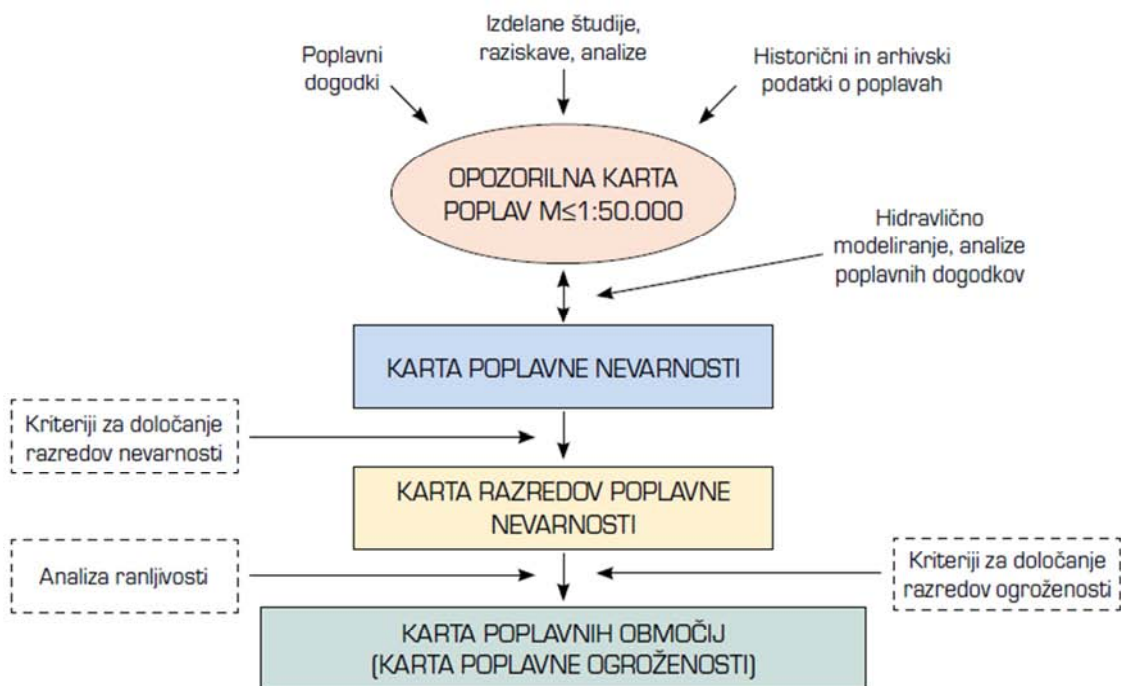
$$\sigma_{S_{100}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 (S_{100i} - \bar{S}_{100})^2}{4}} \quad \text{standardna deviacija serije poplavljenih površin za } Q_{100} \text{ in}$$

$$\bar{S}_{100} \quad \text{povprečna vrednost serije poplavljenih površin za } Q_{100}.$$

Če sta količini v modelu linearno soodvisni (faktor razpršenosti = 1), bi zanju torej morale veljati, da izhodni parameter ohrani relativno razpršenost vhodnega parametra. Vzoredno bodo količine, ki so zelo občutljive na določen vhodni parameter, dosegale višjo raven relativne razpršenosti glede na relativno razpršenost izbranega vhodnega parametra. Ponovno velja, da je model z nizko vrednostjo faktorja razpršenosti bolj občutljiv oz. nezanesljiv od modela z visoko vrednostjo FR.

## 2.8 Postopek izdelave karte poplavne ogroženosti

Karte poplavne ogroženosti, ki jih je v sklopu določb Poplavne direktive Slovenija dolžna izdelati do konca leta 2013, predstavljajo podlago za sprejetje načrta ukrepov za zmanjšanje poplavne ogroženosti. Metodologijo njihove izdelave in prenos ostalih sklepov Poplavne direktive v slovensko zakonodajo ureja *Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije*. Postopek izdelave Karte poplavne ogroženosti po tem pravilniku najbolj pregledno oriše spodnja shema:



Slika 5: Postopek izdelave karte poplavnih območij v skladu s Pravilnikom (Rak in sod., 2007, str. 113)

Opozorilna karta poplav je del obsežnega elaborata, imenovanega Predhodna ocena poplavne ogroženosti. Za izdelavo le-te je bil zadolžen Inštitut za vode Republike Slovenije. Ocena poplavne ogroženosti je dokument, ki je sestavljen iz dveh delov. V tekstualnem delu so zabeleženi znani podatki vseh dokumentiranih poplav na Slovenskem (opremljeni z oceno zanesljivosti vnesenih podatkov) in vse do sedaj že izdelane hidravlične raziskave za določena območja. Kartografski del

elaborata je znan kot *Opozorilna karta poplav* in je objavljen kot samostojen sloj na javnih spletnih GIS sistemih, kot sta na primer Atlas okolja ali Geopedia. Preko tristopenjske lestvice pogostosti pojavljanja poplav (pogoste, redke in katastrofalne) podaja fizični obseg vseh znanih in popisanih poplav. Opozorilna karta je podlaga za izbiro tistih območij, kjer je zaradi večje poplavne ogroženosti potrebno izdelati nadaljnje analize in pripraviti karto poplavne ogroženosti.

Za območja, ki se jih v predhodni oceni poplavne ogroženosti določi kot pomembnejša (visoka gostota prebivalstva, nahajanje pomembnih gospodarskih dejavnosti, obstoj objektov s povečanim vplivom na okolje) je potrebno do 22. 12. 2013 izdelati Karte poplavne nevarnosti. Ta predstavlja izris surovih rezultatov hidravličnih analiz. Na karti je treba prikazati poplavne linije za 10-, 100- in 500-letno poplavno vodo, za 100-letni poplavni dogodek pa se izriše še tristopenjski prikaz poplavnih globin in tristopenjski prikaz gibalne količine poplavne vode (zmnožek hitrosti in globine). Na podlagi teh slojev se izdelata Karta razredov poplavne nevarnosti, ki poplavna območja znotraj 500-letne poplavne vode razdeli na štiri razrede poplavne nevarnosti (velika, srednja, majhna, preostala).

Vmesni korak med izdelavo karte poplavne nevarnosti in karto poplavne ogroženosti predstavlja analiza poplavne ranljivosti prostora. Ranljivost prostora je manjkajoči člen v shemi sodobnega pristopa k zmanjšanju ogroženosti, kot ga uporablja Poplavna direktiva. Po tem konceptu je ogroženost posledica tako nevarnosti kot tudi ranljivosti. Pojem nevarnosti v tej definiciji zajema predvsem naravne pogoje, na katere človek nima večjega vpliva (meteorološke, hidrološke, geološke, reliefne danosti), pojem ranljivosti pa predstavlja ceno oz. stroške (predvsem) človekove dejavnosti v prostoru. Presek obeh pa nam šele razkrije vpogled v samo ogroženost prostora.

Postopek ugotavljanja ranljivosti je s Pravilnikom precej jasno načrtan. Treba je oceniti število potencialno ogroženega prebivalstva, določiti vrsto in število ogroženih gospodarskih dejavnosti, popisati vse objekte oz. naprave, zaradi katerih lahko v primeru poplav pride do onesnaženja večjega obsega, določiti na poplavo občutljive objekte ter določiti območja, ki so pomembna za biotsko raznovrstnost ter zagotavljanje virov pitne vode. Na podlagi teh parametrov območje razvrstimo v razrede ranljivosti tako, kot to določajo posebna merila za določitev razredov ranljivosti v prilogi Pravilnika.

Karta poplavne ogroženosti nastane s prekrivanjem slojev poplavne nevarnosti in poplavne ogroženosti. Različne kombinacije razredov obeh kart nam dajo razrede poplavne ogroženosti. Ti se določijo s pomočjo matrike, ki se nahaja v prilogi Pravilnika. Razredi poplavne ogroženosti so trije in sicer razred majhne, srednje in velike ogroženosti. Karta poplavne ogroženosti, v nasprotju s karto poplavne nevarnosti, prikazuje bolj posredne, družbene parametre okolja, kot so ranljivost, stopnja ogroženosti, potencialna škoda, itd. Zato se uporabljajo v poplavnem zavarovalništvu, ozaveščanju javnosti, predvsem pa predstavljajo osnovo za izdelavo Načrta ukrepov za zmanjšanje poplavne ogroženosti.

## 2.9 Uporabljena programska oprema

Sestavljanje hidravličnega modela je potekalo s pomočjo specializiranih računalniških programov. Osnovno orodje za delo je bil profesionalni hidravlični program Mike Flood, za pridobitev ustrezno obdelanih terenskih vhodnih podatkov pa je bil v večji meri uporabljeno programsko orodje ArcMap, deloma tudi program HEC-RAS (oz. njegov modul za komunikacijo z GIS orodji, imenovan HEC-GeoRAS). Program ArcMap je služil tudi za izdelavo kartografskega prikaza rezultatov (npr. karte poplavne nevarnosti).

### 2.9.1 Mike Flood

Mike Flood v svetovnem merilu trenutno velja za enega izmed najbolj izpopolnjenih programskih izdelkov na področju hidravličnega modeliranja poplavnih površin. Razvit je bil na Danskem hidravličnem inštitutu (DHI). Predstavlja združitev dveh predhodnih modelov iste ustanove, enodimenzionalnega modela MIKE 11 in dvodimenzionalnega modela MIKE 21, in je zasnovan posebej za potrebe računanja razlivanja poplavnih voda iz površinskih vodotokov in specifično kartiranje poplavne nevarnosti. Model se lahko nadgradi z različnimi specifičnimi moduli, npr. Mike Urban (za izračune vodnega toka znotraj strnjeno pozidanih urbanih površin) ali npr. modulom za izračun površinskega odtoka, ter moduli za upoštevanje vpliva evapotranspiracije ali vetra. Za potrebe pridobivanja vhodnih podatkov, pa tudi grafične predstavnosti izhodnih podatkov, program dobro sodeluje z GIS orodji, kot je na primer program ArcMap.

Zaradi narave dvodimenzionalnih matematičnih hidravličnih modelov, kompleksnosti programa Mike Flood, pa tudi pogostih in težko izogibnih tehničnih zapletov pri tovrstnem modeliranju je predstavljalo usposabljanje za delo s programom in sama izdelava hidravličnega modela v programu Mike Flood časovno in energijsko daleč najbolj zajeten del izdelave diplomske naloge.

### 2.9.2 HEC-RAS

HEC-RAS (River analysis system) je brezplačen in javno dostopen hidravlični program, ki ga je leta 1995 razvil Hidrološki center inženirskih enot ameriške vojske (Hydrologic Engineering Center, US army corps of Engineers). Ta skrbi tudi za njegovo redno posodabljanje in izpopolnjevanje. Zasnovan je za modeliranje stalnih ali nestalnih enodimenzionalnih tokov s prosto gladino. Zaradi preprostosti in dostopnosti velja za enega najbolj razširjenih in najbolj sprejetih hidravličnih programov za modeliranje enodimenzionalnih problemov. Razširjene pa so tudi tehnike, s katerimi je mogoče zadovoljivo simulirati razlitje vode na širše poplavno območje (t.i. kvazi dvodimenzionalni model), zato njegova uporabnost, poleg osnovnih enodimenzionalnih izračunov, sega tudi na zahtevnejša področja (izračun razmer ob objektih ter razvejanem toku, račun poplavnih ravnic,...). Programu uporabnost in povezljivost z ostalimi programi povečujejo tudi dopolnilni moduli, kot so dodatna

orodja za komunikacijo in sinhronizacijo z GIS orodji (npr. ArcGIS), velika dodana vrednost programa pa je možnost vnosa podatkov o topografiji tudi preko programa AutoCAD. (Hec RAS, 2002)

### **2.9.3 ArcMap**

ArcGis je obsežen paket različnih programskih orodij, razvitih v podjetju ESRI. Je najbolj razširjeno GIS orodje (geografski informacijski sistem), ki omogoča analizo, izris, uporabo in upravljanje prostorskih podatkov. Za potrebe diplomske naloge je bil uporabljen program ArcMap in sicer predvsem kot orodje za pripravo terenskih podatkov, ki so bili nato uporabljeni v hidravličnem programu Mike Flood. Podatki so zajemali pripravo georeferenciranega digitalnega modela reliefa (DMR) za dvodimenzionalni račun razlitja vode (Mike 21) ter pripravo poteka osi struge in prečnih profilov za račun enodimenzionalnega toka (Mike 11). Komunikacijo z omenjenim programom mu omogoča programska razširitev, imenovana MIKE 11 GIS, izris 3D modela reliefa pa razširitev, imenovana 3D analyst.



### 3 ŠTUDIJA PRIMERA: ANALIZA OBČUTLJIVOSTI MHM NA SPREMEMBO RABE TAL NA PRIMERU ODSEKA REKE REKE

#### 3.1 Opis obravnavanega območja

V diplomski nalogi je bil za analizo občutljivosti kot primer uporabljen odsek reke Reke v okolici vasi Prem. Reka Reka je v slovenskem merilu specifična reka, saj gre za našo največjo ponikalnico. Ker spada v Jadransko povodje, je smer njenega toka za Slovenijo neznčilna, saj poteka od vzhoda proti zahodu. Izvira na Hrvaškem delu Snežniškega pogorja kot potok Velika voda na nadmorski višini 720 metrov, nato pa po eocenski flišni podlagi teče skozi naselji Ilirska Bistrica in Prem ter skozi Vremsko dolino mimo vasi Škoflje do vasi Škocjan. Med Škofljami in Škocjanom se zareže v ozko apnenčasto sotesko, ko pa priteče do vasi Škocjan, na nadmorski višini 318 metrov ponikne v ponor Mohorčičeve jame. Od tu svojo pot nadaljuje skozi 33 kilometrov dolg splet podzemnih rogov, na površje pa se vrne v Italiji blizu vasi Štivan kot izvir reke Timave, kjer se po slabem kilometru površinskega toka izliva v Jadransko morje.. Površinski tok Reke meri 54 km, velikost povodja znaša 422 km<sup>2</sup>.



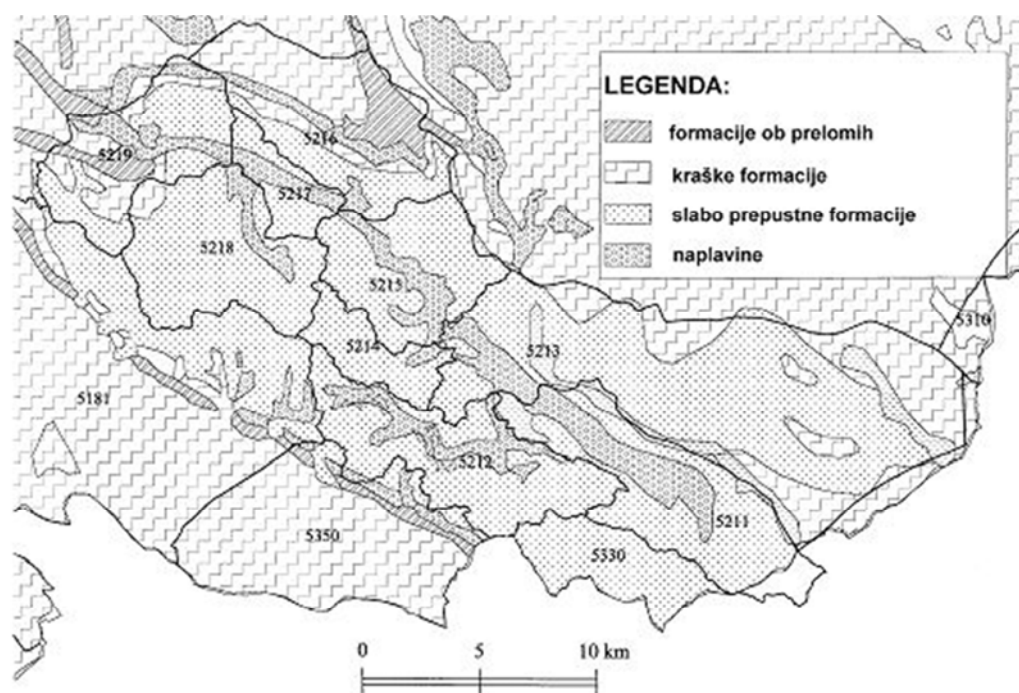
Slika 6: Geografska umestitev obravnavanega odseka (Spletna stran Geopedia)

Porečje površinskega dela reke Reke predstavlja slabo prepustna, v dinarski smeri orientirana eocenska flišna sinklinala med Snežniškim pogorjem na SV oz. V in Brkini na JZ oz. Z. Zahodni del

porečja sestavlja severovzhodna polovica Brkinov, vzhodni pa jugozahodni del Snežniškega pogorja, kjer je rob porečja zaradi prehoda iz flišnega v kraški svet manj natančno določen.

Glavnemu vodotoku se v porečju pridružijo še nekateri manjši pritoki. Najdaljši med njimi je dobrih 19 km dolg levi pritok Mola, ki se Reki pridruži v Ilirski Bistrici, na njem pa sta zaradi pogostega poplavljanja zgrajena zadrževalnika Klivnik in Mola. Zaradi slabo prepustne flišne podlage Brkinskega hribovja z leve strani priteka še veliko potokov, poleg Mole med večje spadata še Padež, Suhorica in Sušica, ki se Reki pridružita šele Vremski dolini. Največji pritok z desne strani je slabih 9 km dolg potok Mrzlek.

Reka Reka je vodotok z izrazitim nihanjem pretoka. Pred vstopom v sistem Škocjanskih jam, na prehodu iz flišnega v karbonatni svet, ima na merilnem mestu Cerkvenikov mlin povprečni srednji letni pretok dobrih  $8 \text{ m}^3/\text{s}$ , povprečni pretoki konic mesečnih visokih vod pa dosegajo tam dosegajo kar  $182 \text{ m}^3/\text{s}$ . (Spletna stran ARSO) Največji izmerjen pretok v Cerkvenikovem mlinu sicer znaša  $305 \text{ m}^3/\text{s}$ . Skozi leto se največji povprečni srednji mesečni pretoki pojavljajo oktobra in novembra, visoke vode pa v pozni pomladi ter skozi jesen. Posledica nestanovitnega toka so pogoste poplave, ki se povprečno pojavljajo kar šestkrat letno. Zaradi majhnega zaledja so le-te kratkotrajne, praktično le nekajurne.



Slika 7: Geološka sestava tal in obseg podporečij na območju reke Reke (spletna stran KSH)

Odsek reke Reke, ki je bil uporabljen v diplomski nalogi, je 2,6 km dolg odsek v okolici vasi Gornja in Dolnja Bitnja. Najvišji (gorvodni) zajeti profil reke leži na cca. 392,5 m.n.v., najnižji pa na cca. 389,5 m.n.v. Reka na tem območju teče po relativno ozki dolini, ki je sestavljena iz slabo prepustnih flišnih

kamnin. Večjih pritokov Reka v tem odseku nima, manjši hudournik Potok se reki pridruži le z leve strani iz doline severno od vasi Prem, reki pa se pridruži le nekaj metrov pred koncem območja modeliranja, zato njegova eliminacija iz modela nima opaznejšega učinka. Vzdolž celotnega odseka teče Reka ob levi strani magistralne ceste Ilirska Bistrica – Pivka, nekajkrat se ji približa le na nekaj metrov.

Zgornji in spodnji rob odseka omejujeta dva večja mostova. Dolvodno reka teče pod mostom ceste Pivka – Prem, ki predstavlja glavno povezavo do vhodnega dela Brkinov, gorvodno pa čez reko poteka manjši most, ki z glavno cesto povezuje vas Smrje.

Na območju modeliranja se nahaja večja zajezev v bližini vasi Spodnja Bitnja. Na zajezitivijo je speljana mlinščica, ki je nekoč služila še vedno obstoječemu, a nedelujočemu mlinu, sedaj pa napaja mikro hidroelektrarno Bitnja (letna proizvodnja elektrike cca. 33000 kWh). (Ministrstvo za gospodarstvo, 2007) Pretok in vdor povratne vode v mlinščico regulirata delujoči zapornici.

## **3.2 Izdelava hidravličnega modela**

Hidravlični model je izdelan s pomočjo programa Mike Flood. Gre za različico programa Mike, ki združuje eno- in dvodimenzionalni model. Območje struge, kjer je dogajanje pretežno enodimenzionalno, se je modeliral s programom Mike 11. Za račun dogajanja na poplavnih ravninah pa je bil izdelan ločen dvodimenzionalni model Mike 21.

V model so bili vnešeni podatki o obliki površja, lokaciji in dimenzijah hidrotehničnih objektov, relativni hrapavosti površja, velikosti pretokov zahtevanih povratnih dob ter spodnji robni pogoj. Postopek pridobivanja in vnosa posameznega parametra je opisan v spodnjih poglavjih.

### **3.2.1 Topografija območja**

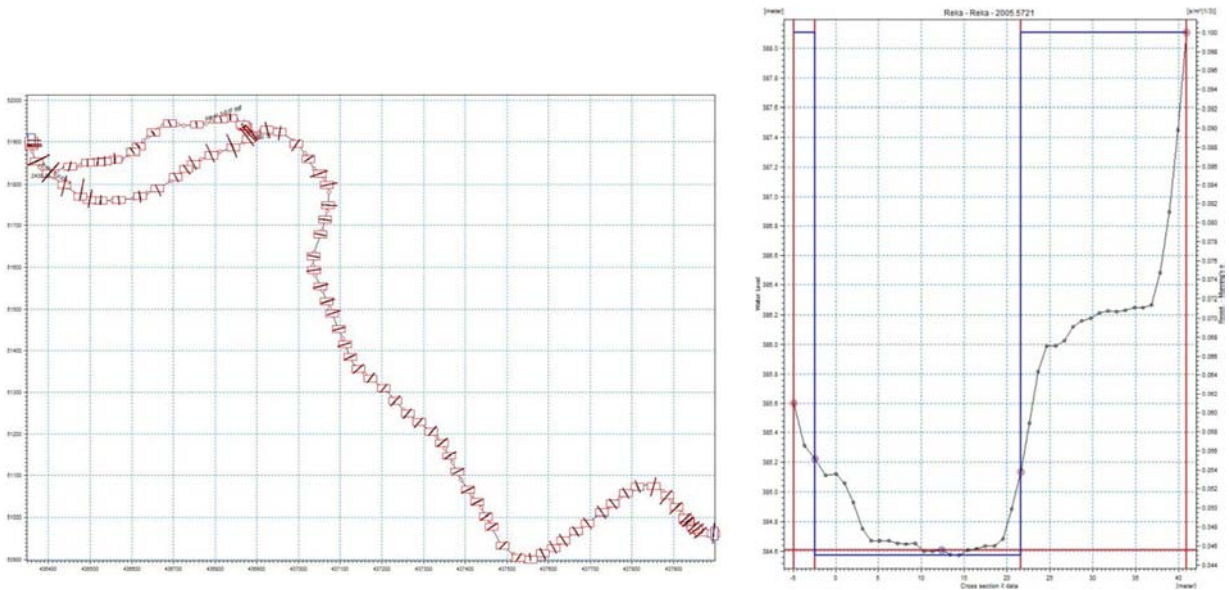
Za pridobitev informacij o topografiji površja sta bila uporabljena dva vira. Natančni podatki o večini površja so bili pridobljeni s pomočjo letalskega lidarskega snemanja (ALS). Oblika struge, kjer lidarski posnetki zaradi loma in odboja valov na vodni gladini ne zagotavljajo natančnih rezultatov, pa je bila pridobljena z geodetsko izmero prečnih profilov. Podatki geodetske izmere so nadomestili točke LIDAR snemanja na območju ožje struge, novonastali natančnejši oblak točk pa je bil osnova za izdelavo 3D modela reliefa v obliki TIN mreže, ki je bila narejena s pomočjo modula 3D analyst v programu ArcMap.



Slika 8: Območje uporabe točk geodetske izmere (levo) in sestavljena TIN mreža modeliranega območja (desno)(vir: ArcMap)

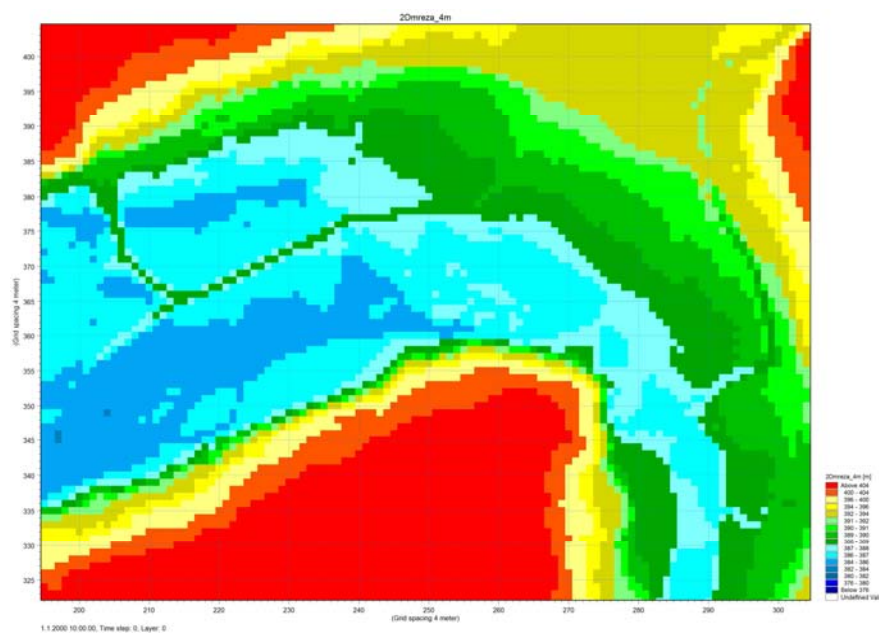
V skladu s konceptom modeliranja rečnih poplavnih območij v programu Mike Flood, je bil zaradi zagotavljanja večje natančnosti model zgrajen iz dveh ločenih podmodelov. Za območje osnovne struge, kjer imamo izrazito enodimenzionalni tok in natančnejše batimetrične podatke geodetskih meritev, je bil narejen enodimenzionalni model v programu Mike 11. Območje izven struge (poplavno območje) pa je zaradi izrazitejšega dvodimenzionalnega toka in razpoložljivega natančnega digitalnega modela reliefa modelirano z dvodimenzionalnim programom Mike 21. Šele s programom Mike Flood se je z določitvijo vrste hidravlične povezave med modeloma oba modela združilo v interaktivno sinhrono celoto. V tistih celicah modela Mike 21, ki so se dotikale enodimenzionalnega modela, se je vzpostavilo bočno povezavo med modeloma (*angl. lateral link*).

Topografija struge je v programu Mike 11 definirana s pomočjo točk, nanizanih v prečne profile reke, pridobljene s pomočjo klasične geodetske izmere. Ker se na območju modela nahaja umetni odvodni kanal, ki napaja mHE Bitnja, je bil model Mike 11 sestavljen kot enostaven vejičast model enodimenzionalnega toka. Potek in obliko glavne struge (Reka, dolžina 2538 m) definira 70 prečnih profilov s povprečno medsebojno oddaljenostjo cca. 36 m. Prečna gostota zajema točk v posameznem profilu je cca. 1 m. Odvodni kanal za mHE (Kanal, dolžina 488 m) pa je geometrično opisan s pomočjo 32 prečnih profilov v povprečni medsebojni razdalji cca. 15 m, pri čemer gostota prečnega zajema točk ostaja 1 m. Na spodnjih slikah sta prikazana tloris uporabljenega vejičastega modela reke in primer enega izmed prečnih profilov glavne struge, kot je podan v programu Mike 11.



Slika 9: Enodimenzionalni model reke in primer prečnega profila struge v programu Mike 11

Topografija poplavnega območja za program Mike 21 je bila narejena s pomočjo množice točk, posnetih z letalskim lidarskim snemanjem površja. Že narejeni 3D model reliefa v obliki mreže TIN je bilo potrebno pretvoriti v rastrsko mrežo DEM, saj ga v taki obliki zahteva programski paket Mike 21. Program omogoča dvodimenzionalne hidravlične račune z uporabo do maksimalno 80 000 omejenih računskih celic, zato je bila za osnovno računsko celico izbran kvadrat z dolžino stranice 4 metre. Za ilustracijo je spodaj prikazan izsek uporabljenega rastrskega modela površja DMR v barvni višinski lestvici.



Slika 10: Izrez rastrskega modela reliefa DMR v programu Mike 21 (vir: Mike Flood)

Ker je višinska kota vsake celice določena s povprečenjem višinske koordinate  $z$  v vseh točkah mreže TIN znotraj posamezne celice rastrskega modela, lahko pride do popačenja terena. To je še posebej neugodno za primer relativno pokončnih struktur v prostoru (npr. pregrade, mostovi, zapornice,...), saj se zaradi povprečenja informacija o njihovi višini hitro izgubi. Vsem celicam, ki ležijo na območju hidravlično pomembnih objektov, je zato potrebno ročno popraviti njihovo višinsko koordinato. Pri tem je potrebno upoštevati, da velikost napake in število celic s preveliko napako narašča z večanjem velikost stranice osnovne računske celice.

### 3.2.2 Hidrotehnični objekti

Na modeliranem območju se nahaja nekaj hidrotehničnih objektov, ki v marsičem pomembno vplivajo na hidravlične razmere vodotoka. Ker je njihova oblika z metodami generalnega zajema geometrije terena (geodetska izmera in LIDAR) glede na njihovo pomembnost zajeta premalo natančno ali pa sploh ni zajeta, so bile dimenzije omenjenih objektov izmerjene posebej. Na terenskem merjenju se je s pomočjo ročnega laserskega razdaljemera pridobilo dimenzije vseh pomembnejših hidrotehničnih objektov. Uporabljen je bil žepni laserski razdaljemer Leica Disto Special 5, ki ga je za potrebe dodatnih meritev hidrotehničnih objektov v okviru diplomske naloge posodilo podjetje Geodetsko podjetje Sežana, d.o.o. Deklarirana natančnost inštrumenta oz. standardna deviacija merjenja je  $\pm 1,5$  mm. (Predstavitvena brošura Leica Disto)

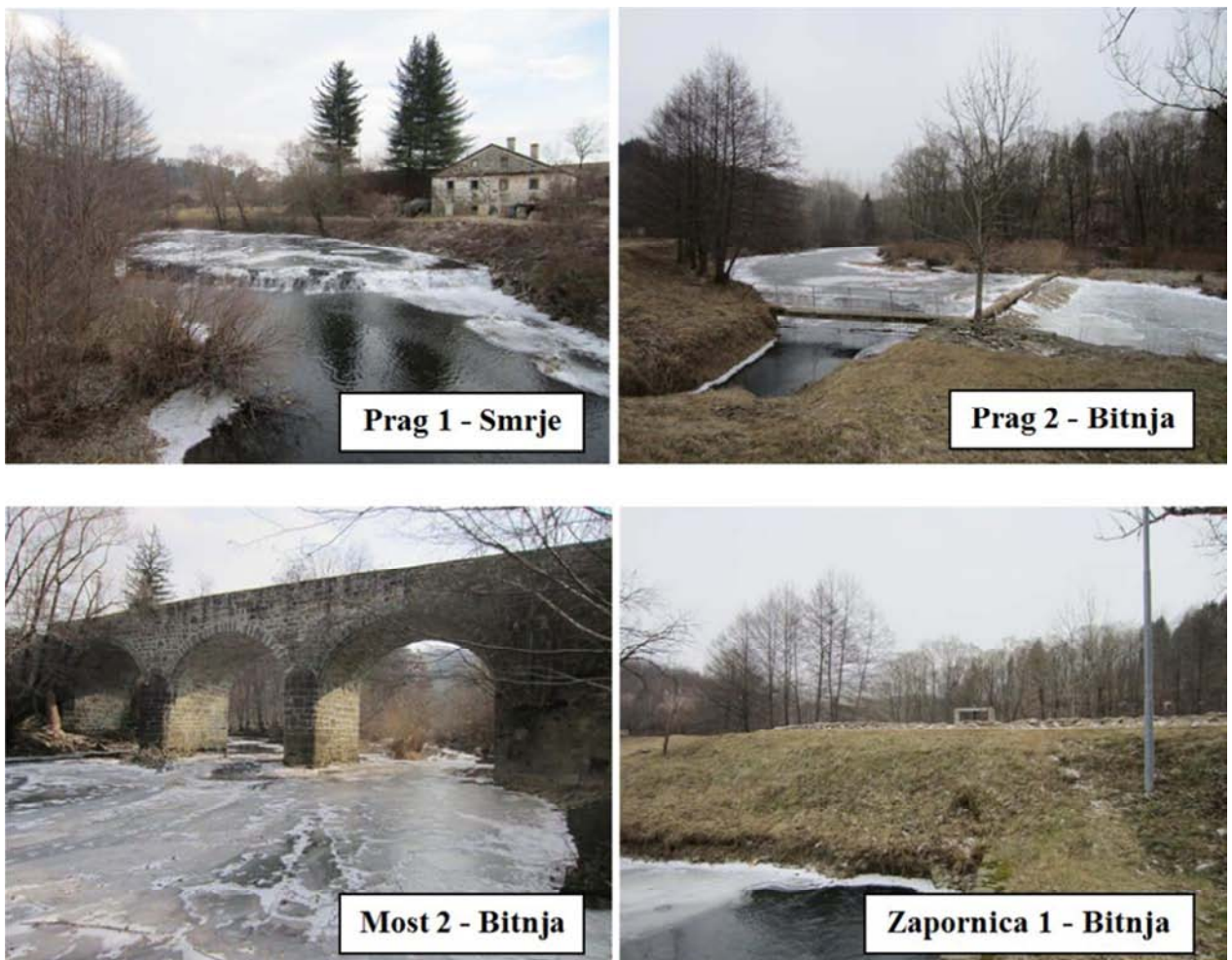


Slika 11: Uporabljeni distometer Leica Disto Special 5 (foto: Jernej Moderc)

V enodimenzionalni hidravlični model Mike 11 je bilo vnesenih pet pomembnejših hidrotehničnih objektov. Izkazalo se je, da programski modul za vstavljanje objektov v ogrodje modela Mike 11 z uporabo običajnih, prednastavljenih oblikovnih koeficientov le-tem določa veliko prevelik oblikovni upor in posledično nerealno velik vpliv na hidravlične razmere v sistemu. Objekti so bili zato v skladu s prakso v model vstavljeni le kot samostojni prečni profili ustrezne geometrije, realno ocenjen vpliv oblikovnega upora pa se je upoštevalo z ustreznim povečanjem nadomestnih Manningovih koeficientov v pripadajočih prečnih profilih.

Hidrotehnični objekti, ki so bili izmerjeni in vstavljeni v enodimenzionalni model Mike 11, si dolvodno sledijo v spodaj predstavljenem vrstnem redu, vsi razen mostu 1 pa so prikazani tudi na sledečih fotografijah.

- Prag 1 (Smrje) - stacionaža Reka 47 m (krona preliva na višini: 389,5 m.n.v.)
- Most 1 (Smrje) – stacionaža Reka 76 m (dimenzije so podane v načrtu v prilogi C)
- Prag 2 (Dolnja Bitnja) – stacionaža Reka 1898 m (krona preliva na višini: 386,6 m.n.v.)
- Most 2 (Dolnja Bitnja) – stacionaža Reka 2527 m (dimenzije so podane v načrtu v prilogi D)
- Zapornica 1 (Dolnja Bitnja) – stacionaža Kanal 29 m (velikost prepusta: 1.1\*1.1 m)



Slika 12: Hidrotehnični objekti, vstavljeni v model Mike 11 (foto: Jernej Moderc)

### 3.2.3 Hrapavost območja

Hrapavost območja je bila v modelu Mike 11 parametrizirana s pomočjo Manningovih koeficientov hrapavosti ( $n_g$ ). V hidravličnem modelu Mike 21 pa je vnos Manningovih koeficientov predviden s količino  $M$ , ki je definirana kot obratna vrednost klasičnega Manningovega koeficienta  $n_g$  ( $M = 1/n_g$ ).

Manjši  $M$  torej pomeni večjo hrapavost. Hrapavost se je določalo le celicam, katerim se je na podlagi Opozorilne karte poplav predvidelo njihovo omočenje, ostalim celicam pa je bila dodeljena hrapavost  $M = 1$ .

Za osrednji (spodnji) del struge je bila hrapavost omočenega oboda za vse profile in za vse primere enaka in sicer  $n_g = 0.045$ .

Hrapavost brežin in poplavnega območja (območja pretežno dvodimenzionalnega toka – Mike 21) pa je bila v skladu z namenom naloge določena za različne projektne situacije kot primere potencialne rabe tal. Ker je namen naloge ugotoviti vpliv spremembe rabe tal (različne hrapavosti) na obseg poplavljenega območja, je bila prav hidravlična hrapavost tal v obliki različnih »paketov« hrapavosti poplavne površine edini parameter, ki se je v analizi občutljivosti spreminjal. Analiza se je izvajala na treh različnih primerih potencialne rabe tal, ki se med seboj razlikujejo tako po razporeditvi kot tudi po vrednostih koeficientov hidravlične hrapavosti, osnova za opazovanje sprememb pa je bil primer realne (sedanje) rabe tal. Za vse tri projektne pretoke je se pognal hidravlični model na štirih različnih kombinacijah oz. primerih rabe tal. Za posamezno vrsto podlage so bile v posameznem primeru uporabljene vrednosti, ki so prikazane v spodnji preglednici.

*Preglednica 3: Uporabljene vrednosti Manningovih koeficientov v posameznih primerih*

Vrsta podlage	Primer 1 Realno stanje		Primer 2 Kmetijstvo		Primer 3 Zima		Primer 4 Zarast	
	$n_g$	$M$	$n_g$	$M$	$n_g$	$M$	$n_g$	$M$
Travnik navaden	0,030	33	0,030	33	0,025	40	0,060	17
Njiva	0,040	25	0,040	25	0,020	50	0,060	17
Redko grmičevje z drevesi	0,067	15	0,067	15	0,036	28	0,083	12
Gozd navaden	0,083	12	0,083	12	0,045	22	0,083	12
Gozd poplavni	0,125	8	0,125	8	0,045	22	0,125	8
Bregovi reke	0,100	10	0,100	10	0,045	22	0,015	10
Asfaltna cesta	0,015	67	0,015	67	0,015	67	0,015	67
Makadamska cesta	0,023	43	0,023	43	0,023	43	0,023	43
Naselje	0,025	40	0,025	40	0,025	40	0,025	40

#### Primer 1: Realno stanje

V prvem primeru razporeditev hrapavosti Manningovih koeficientov ustreza realnemu stanju oz. takšni rabi tal, kot je bila zajeta v času aero-foto snemanja Slovenije. Na obravnavanem območju so bili na razpolago digitalni ortofoto posnetki (DOF) iz leta 2006 ter iz leta 2009. Za določitev sedanje rabe tal se je uporabljalo posnetke iz leta 2009. Primer 1 je služil kot referenca za opazovanje oz. primerjavo sprememb, ki so bile nastale s spreminjanjem koeficienta hrapavosti v sledečih hipotetičnih primerih.



### Primer 2: Intenzivna kultura obvodnega prostora (kmetijstvo)

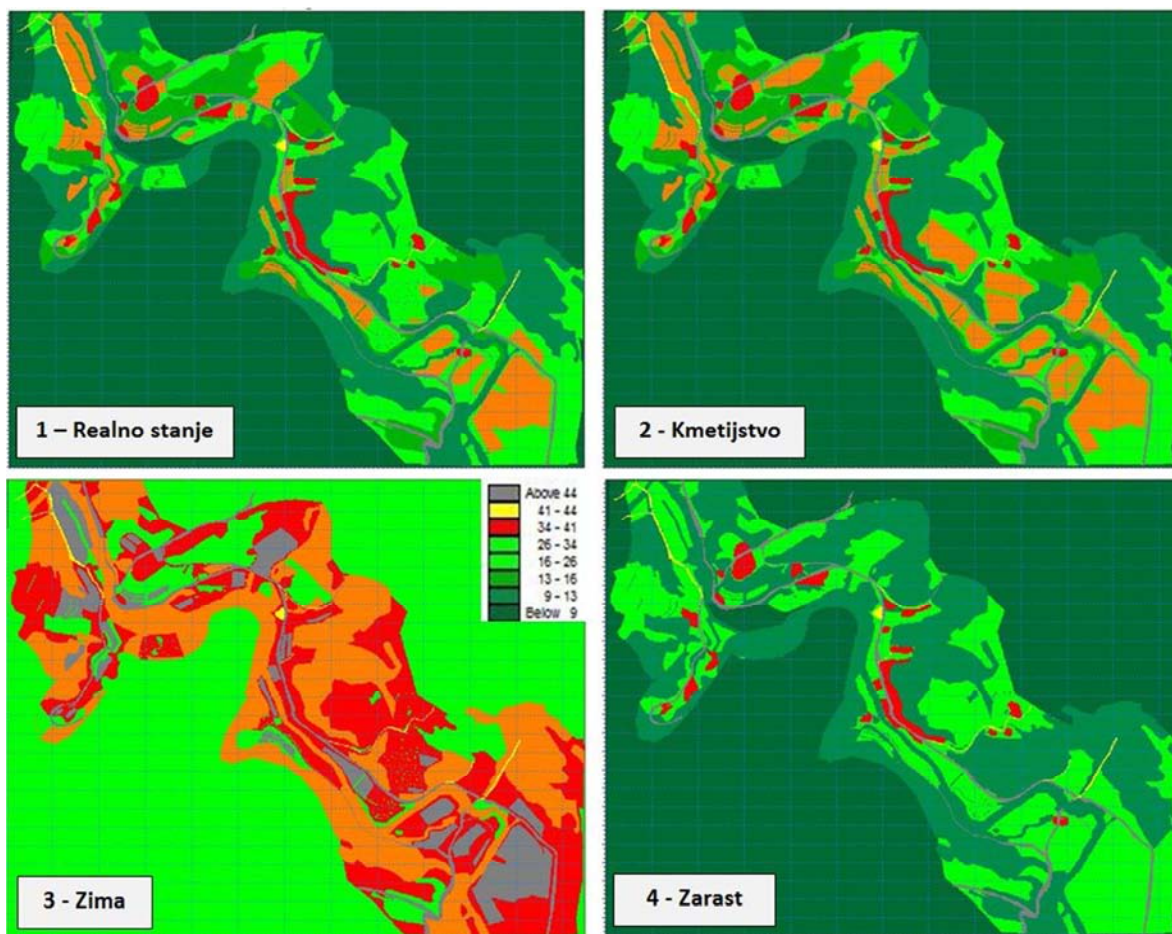
S primerom 2 se je preveril vpliv večanja deleža obdelovalnih površin. Simuliralo se je teoretično stanje, ko bi vse mirujoče njive in travniki v obvodnem prostoru dobili namembnost pridelovalnih površin. Prihod poplavnega dogodka je predviden v času največje zrelosti kmetijskih pridelkov. V hidravličnem smislu je bilo to stanje opisano s spremembo hrapavosti večjega dela travnikov iz siceršnje vrednosti (Manningov koeficient  $M = 33$ ) na maksimalno vrednost zrelih gojenih pridelkov ( $M = 20$  – velika hrapavost, npr. zrela krompirja), ista vrednost pa je bila dodeljena tudi vsem že obstoječim njivam. Ostali koeficienti hrapavosti so ostali nespremenjeni.

### Primer 3: Različni letni časi (zima)

Primer 3 predstavlja spremembo hrapavosti površja zaradi menjave letnih časov. Za poletni čas je zaradi prisotnosti bujne podrasti in ozelenitve grmičevja ter drevja značilna večja hrapavost kot v času zime. Ta paket hrapavosti zato obravnava osnovno (poletno) stanje rabe tal (Primer 1), vendar so vrednosti Manningovih koeficientov na vseh celicah z naravno zarastjo zmanjšana na »zimsko« vrednosti ( $M = 50$  za obdelovalne površine,  $M = 40$  za travo,  $M = 28$  za redko grmičevje in  $M = 22$  za gozd). Zaradi izrazitejših slik so bile v analizi občutljivosti namenoma izbrane minimalne priporočene vrednosti posamezne rabe tal.

### Primer 4: Spontana zarast obvodnega prostora.

Zaraščanje obvodnega prostora je predvsem v ruralnih regijah vedno bolj prisoten pojav, prizadene pa večinoma kmetijske površine. Razlog je v opuščanju kmetijskih površin zaradi demografskih sprememb ter slabem hidrotehničnem vzdrževanju ožjega obvodnega prostora (košnja zarasti). Trend zaraščanja prostora je prisoten tudi na obravnavanem območju, saj se ga lahko zazna že s primerjavo DOF posnetkov iz leta 2006 in 2009. Primer 4 obravnava situacijo, ko v relativno kratkem času, npr. zaradi opuščanja kmetijstva, pride do spontanega zaraščanja brežin in kmetijskih površin (travnikov in njiv). V tej konfiguraciji hrapavosti tal so vsem travnikom in njivam vrednosti Manningovih koeficientov iz siceršnjih ( $M = 33$ ) zmanjšane na vrednost hrapavosti goste visoke trave oz. redkega grmičevja z drevesi ( $M = 17$ ). Vsem območjem z redkim grmičevjem ( $M = 15$ ) pa se je hrapavost spremenila na vrednost gozdov ( $M = 12$ ). Glede na namenoma pretiran obseg predvidene zarasti gre za teoretično najmanj verjeten primer spremembe rabe tal, na katerem je glede na osnovno stanje pričakovana največja sprememba poplavnih linij. Razlika v prostorski razporeditvi različnih koeficientov hrapavosti med posameznimi primeri je prikazana na spodnji sliki (prikazane vrednosti hrapavosti so podane v količini  $M [m^{1/3}/s]$ ).



Slika 13: Prikaz razporeditve Manningovih koeficientov v posameznem primeru.

V vseh treh primerih, ki opisujejo potencialno rabo tal, se je z namenom izolacije posamezne vrste vpliva glede na osnovno stanje spreminjalo le en parameter, tega pa namenoma v pretiranem obsegu. Primer 2 tako npr. raziskuje samo vpliv kmetijstva, primer 3 raziskuje samo vpliv zime, primer 4 pa raziskuje samo vpliv zaraščanja. Obseg, stopnja in specifičnost spremembe hrapavosti, kot je parametrizirana v kateremkoli potencialnem primeru, sicer v realnosti ni verjetna, vendar pa toliko bolje razkriva neposredno zvezo med posamezno spremembo rabe in njenim vplivom na hidravlično stanje vodotoka.

### 3.2.4 Začetni pogoj – projektni pretoki

Obravnava odsek reke Reke se nahaja na območju, kjer v neposredni bližini ni ne vodomerne niti padavinske merilne postaje. Najbližja vodomerna postaja dolvodno je cca. 17 km oddaljena VP Cerkevnikov mlin, najbližja postaja gorvodno pa je cca. 7 km oddaljena VP Trnovo.



Slika 14: Mreža merilnih naprav ARSO na povodju reke Reke (vir: Spletna stran KSH)

Načeloma je treba za pridobitev natančnih vrednosti projektnih pretokov izdelati hidrološki model prispevnega območja. Gre za kompleksen postopek, ki poleg obsežnega pridobivanja terenskih in statističnih parametrov okolja zahteva tudi strokovno podkovanost in izkušnje z umerjanjem modela na podlagi izmerjenih vrednosti pretokov. Gre torej za metodo, katere kakovostna izvedba zgolj zaradi potrebe pridobitve enega od vhodnih parametrov hidravličnega modela je naloga, ki presega namen in pozornost diplomske naloge. Poleg tega absolutna skladnost z realnim stanjem ni bistvenega pomena za izvedbo analize občutljivosti, saj manjša nenatančnost katerega od vhodnih parametrov nima večjega vpliva na opazovane spremembe, povzročene s spreminjanjem koeficienta hrapavosti. Za potrebe diplomske naloge so bile torej vrednosti pretokov s 10-, 100- in 500-letno povratno dobo pridobljene le na podlagi statistične obdelave niza maksimalnih izmerjenih letnih vrednosti pretokov preko več porazdelitvenih funkcij.

Vira pretočnih podatkov za opazovano območje sta bila gorvodna vodomerna postaja Trnovo in dolvodna postaja Cerkevnikov mlin. Ker je metoda pridobivanja ustreznih pretočnih podatkov s pomočjo hidrološkega modela metodološko prezahtevna, so bili začetni pogoji modela določeni s pomočjo statistične obdelave merjenih podatkov o pretokih omenjenih postaj. Območje leži med tema postajama, zato ne moremo neposredno uporabiti izmerjenih pretočnih vrednosti katere od postaj. Načeloma se v teh primerih zaradi faktorja varnosti uporabi podatke z dolvodne postaje, a je v našem primeru oddaljenost med obravnavanim odsekom in dolvodno postajo prevelika, zato bi bile pretočne vrednosti občutno večje od realnih oz. varnostni faktor večji od inženirsko primerne.

Vrednosti pretokov ob zahtevanih povratnih dobah so bile zato na želenem odseku pridobljene s pomočjo izmerjenih vrednosti obeh vodomernih postaj. Za vsako so bile na podlagi pretočnih

podatkov izračunane velikosti 10-, 100- in 500- letnega pretoka po metodah, ki se jih v ta namen v hidrologiji najpogosteje uporablja (log. normalna, Pearsonova III, log. Pearsonova III in Gumbelova). Zaradi varnosti so bile izbrane največje dobljene vrednosti. Velikosti statističnih pretokov na obeh vodomernih postajah v odvisnosti od izbrane metode so predstavljene v spodnji preglednici.

*Preglednica 4: Velikosti pretokov posameznih povratnih dob na vodomernih postajah v odvisnosti od izbrane statistične porazdelitve*

[m <sup>3</sup> /s]	VP Trnovo			VP Cerkevnikov mlin		
	Q10	Q100	Q500	Q10	Q100	Q500
Gumbelova	135	196	255	256	359	467
Log. Normalna	134	194	252	265	377	490
Pearsonova	135	179	232	256	330	429
Log. Pearsonova	130	165	215	258	324	422
Izbrana (max.)	135	196	255	265	377	490

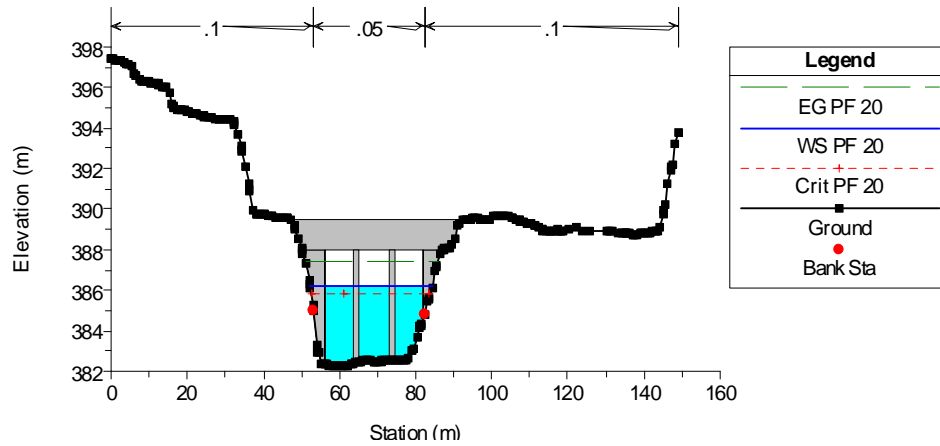
Velikosti projektnih pretokov na območju modeliranja so bile pridobljene s pomočjo interpolacije izračunanih pretokov obeh vodomernih postaj, pri čemer je bila predpostavljena linearna korelacija med velikostjo pretokov in velikostjo zalednih prispevnih površin (in ne le rečne dolžine!). Velikosti površin so bile izračunane s pomočjo šifranta padavinskih območij za porečje reke Reke v programu AutoCAD. Končne vrednosti izbranih pretokov, ki so bile uporabljene v modelu, so prikazane v preglednici.

*Preglednica 5: Projektni pretoki  $Q_{10}$ ,  $Q_{100}$  in  $Q_{500}$  za območje modela*

	Prispevna površina [km <sup>2</sup> ]	Q10 [m <sup>3</sup> /s]	Q100 [m <sup>3</sup> /s]	Q500 [m <sup>3</sup> /s]
VP Trnovo	129.08	135	196	255
VP Cerkevnikov mlin	332.37	265	377	490
Območje modela	186.65	172	247	322

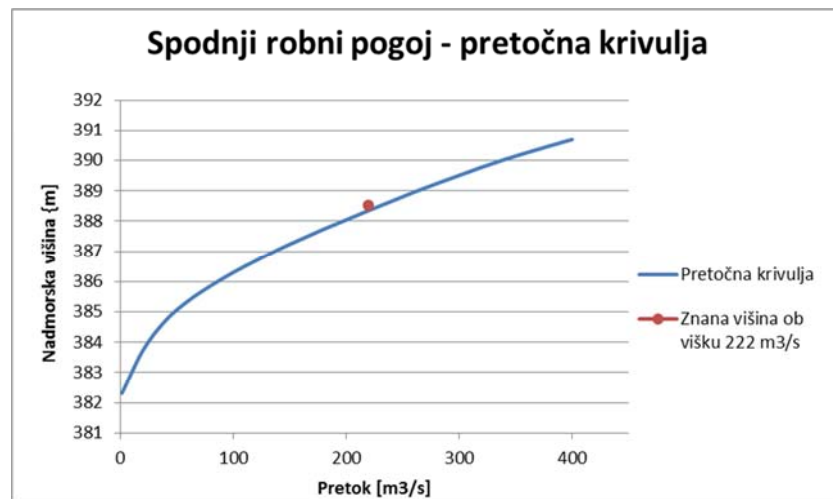
### 3.2.5 Spodnji robni pogoj

Na koncu obravnavanega odseka dolvodno se nahaja most v Dolnji Bitnji. Kot spodnji robni pogoj je bila zato lahko uporabljena pretočna krivulja  $Q(h)$  samega mostu. Na podlagi izmerjenih dimenzij svetlega profila mostu, povprečnega naklona v bližini mostu in izbire hidravlične hrapavosti oboda je z uporabo Manningove enačbe moč izračunati pretočno krivuljo  $Q(h)$ . To je bilo narejeno s programom Hec-Ras. Hidravlični model oz. oblika pretočne krivulje je bila umerjena s spreminjanjem povprečnega naklona in hidravlične hrapavosti tako, da je stekla skozi edino znano referenčno točko na tem območju, gladino vode pri poplavnem dogodku 9.2.2009 (pretok 222 m<sup>3</sup>/s, gladina pri 388,5 m.n.v.).



Slika 15: Izračun pretočne krivulje mostu v Dolnji Bitnji s programom Hec-Ras

Izračunan spodnji robni pogoj - umerjena pretočna krivulja na dolvodni strani mostu - je prikazan v spodnjem grafu:



Slika 16: Uporabljen spodnji pogoj: pretočna krivulja mostu v Dolnji Bitnji (most 2)

### 3.2.6 Umerjanje modela

Modeliran odsek se nahaja na območju, za katerega ni razpoložljivih oz. znanih zanesljivih meritev o gladini vode za določen poplavni dogodek, na podlagi katerih bi lahko natančno umerili model. Ta problem se pri izdelavi manjših (oz. manj pomembnih) hidravličnih modelov pojavlja relativno pogosto. Navadno se ga rešuje s pomočjo védenja oz. pričevanja lokalnih prebivalcev, ki si datume in kote poplavne vode zaradi osebne prizadetosti po navadi dobro zapomnijo. Ob pomoči hidroloških podatkovnih baz Agencije RS za okolje in upoštevanju sorazmernosti pretoka in prispevne površine je možno dobiti precej zanesljive točkovne vrednosti pretočnih krivulj vzdolž vodotoka.

Ena izmed znanih kot poplavljanja je - že v računu spodnjega robnega pogoja uporabljena - gladina vode pod mostom 2 (Dolnja Bitnja) ob poplavnem dogodku 9. 2. 2009, (stacionaža 2528, pretok 222 m<sup>3</sup>/s, gladina pri 388,5 m.n.v.). Zaradi fotodokumentacije dogodka in obsežnosti poplave predstavlja najbolj zanesljiv vir za umerjanje. Druga gladina je znana za precej manjšo poplavo dne 13. 4. 2008 (stacionaža 2509, pretok 60 m<sup>3</sup>/s, gladina pri 383,7 m.n.v.).



*Slika 17: Nivo vodne gladine ob poplavah 9.2.2009 in 13.4.2008 (avtor fotografij: Karmen Valenčič, Dolnja Bitnja)*

Več kot je znanih točk pretočne krivulje, bolje lahko umerimo model. V našem primeru imamo na razpolago le dve meritvi na praktično isti stacionaži, kar je premalo za natančno umeritev modela, vendar vseeno dovolj, da lahko v grobem potrdimo njegovo pravilno delovanje. Če bi želeli še večjo absolutno natančnost pridobljenih hidravličnih rezultatov, bi morali predhodno začeti sistematično zbirati podatke o pretoku in koti poplavljanja za različno velike poplavne dogodke vzdolž celotnega modeliranega odseka.

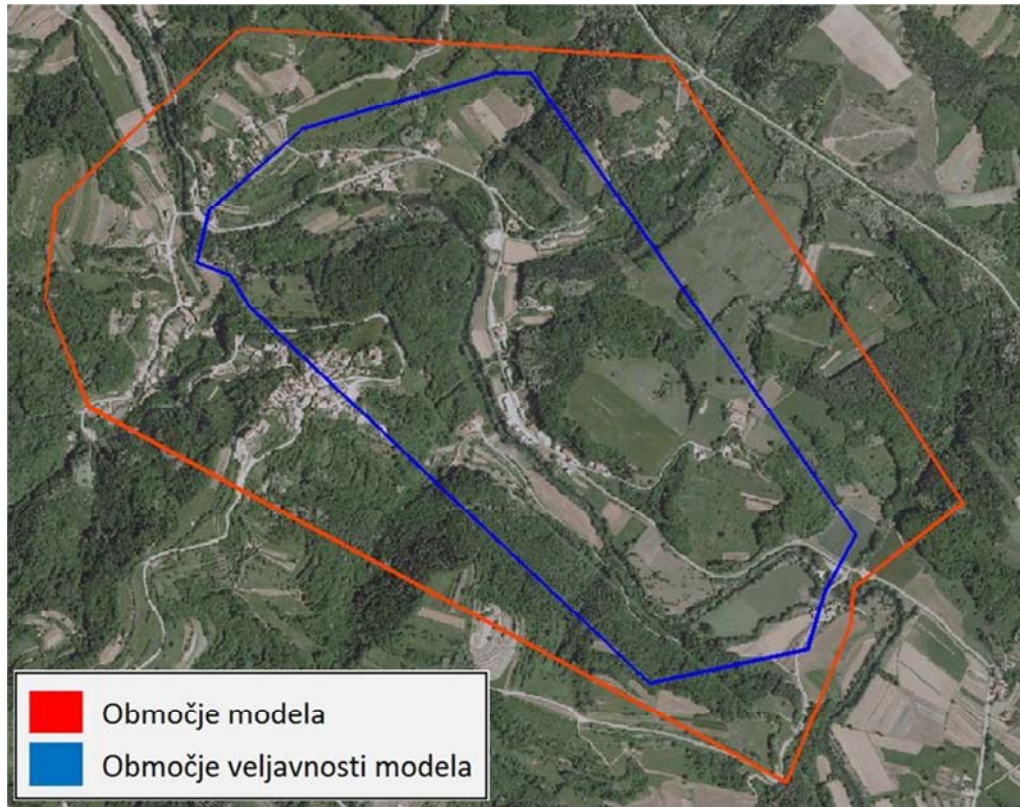
### **3.2.7 Veljavnost modela**

V modeliranju razsežnosti poplavnih voda na obravnavanem območju je bil zajet le vpliv glavne struge reke Reke. Za popolnoma pravilno napoved poplave bi bilo dobro v model umestiti nekaj manjših pritokov oz. hudournikov, ki se reki pridružijo na modeliranem odseku. Ker je njihov vpliv zaradi relativne majhnosti zaledja vodotokov zanemarljiv, jih v hidravlično analizo nismo vključili.

V zgornjem poglavju je bilo tudi omenjeno, da je zanesljivost pretočne krivulje kot spodnjega robnega pogoja zaradi premalo razpoložljivih merjenih podatkov manjša od zelene. Morebitna napaka pri določanju sp. robnega pogoja vpliva na hidravlično sliko gorvodno, njen vpliv pa se razdaljo počasi izklini.

Neupoštevanje vpliva pritokov in natančen spodnji robni pogoj povzročita, da so hidravlični rezultati modela na določenih območjih zelo verjetno drugačni od realnega stanja, oz. da za nimamo

podlage za njihovo kredibilnost. Zato je zelo pomemben del vsake izdelave modela tudi oceniti velikost fizičnega območja, kjer je model veljaven. V našem primeru le-to prikazano na spodnji sliki z modro črto. Hidravlični izračuni so narejeni za področje celotnega modela (rdeča barva), vendar pa je vpliv neupoštevanih hidravličnih parametrov na območju med črtama prevelik, da bi lahko z gotovostjo zagovarjali pravilnost modelnih izračunov.



Slika 18: Prikaz območja modela in veljavnosti modela (vir: Geopedia)

V analizi občutljivosti smo primerjali relativna odstopanja med posameznimi izračuni in ne njihovih absolutnih vrednosti, se je vpliv omenjenih napak še dodatno izničil. A analizo občutljivosti so bili tako vključeni hidravlični izračuni s celotnega območja modela, ne le s področja veljavnosti modela.

### 3.3 Izdelava analize občutljivosti za parameter Manningovih koeficientov

Na izdelanem hidravličnem modelu je bilo pognanih 12 različnih simulacij. Za vsakega od štirih primerov hrapavosti so bile za potrebe analize občutljivosti (in tudi izdelave karte poplavne nevarnosti) modelirani poplavni dogodki s 10-, 100- in 500-letno povratno dobo. Predviden čas trajanja simulacije je bil v vseh primerih šest ur, čeprav so vse simulacije stacionarno hidravlično stanje dosegle že po slabih 4 urah simuliranega dogajanja. Zaradi relativno majhnih celic je bilo za vzpostavitev stabilnega hidravličnega izračuna osnovni računski korak nastavljen na 0,5 sekunde.

Posledica majhnega časovnega koraka je bil za model tega velikostnega razreda precej dolg računski čas, potreben za izvedbo posamezne simulacije.

Za pridobitev ustreznih vhodnih podatkov za izdelavo želene analize občutljivosti so bili iz rezultatov hidravličnega modela za vsako izmed 12 simulacij izvoženi podatki o številu omočenih celic, globini poplavljenega območja, povprečni hitrosti v omočenih celicah in povprečni hrapavosti poplavljenega območja. Vsi podatki so bili izvoženi iz zadnjega časovnega koraka simulacije, ko so se malenkostna nihanja hidravličnih kazalcev (nestacionarnost numerične simulacije toka) v posamezni simulaciji dokončno izklinila.

Analiza občutljivosti hidravličnega modela na spremembo Manningovih koeficientov se je izvajala s primerjavo velikosti relativne spremembe izhodnih parametrov glede na velikost relativne spremembe vhodnih parametrov. Obravnavani vhodni parameter je v našem primeru Manningov koeficient omočenih celic, opazovani izhodni parametri pa so obseg poplavljenega območja oz. globina vode in njena hitrost, v zadnji fazi pa posredno tudi razred poplavne ogroženosti. Za vsak primer potencialne rabe prostora (primer 2, primer 3 in primer 4) se je naredila primerjava spremembe vhodnih in izhodnih parametrov glede na realno stanje, izračunano v primeru 1.

### **3.4 Izdelava karte poplavne ogroženosti**

Poleg študije vpliva spremembe hrapavosti tal na same hidravlične parametre obravnavanega vodotoka se je v skladu z namenom oz. tezo diplomske naloge preverilo tudi, ali oz. kako se povzročene spremembe hidravličnega stanja vodotoka poznajo na karti poplavne ogroženosti. Zaradi lažjega zaznavanja sprememb se je primerjava kart poplavne ogroženosti naredila samo med primerom osnovnega stanja (Primer 1 – realno stanje) in primerom, ki se je v povprečni hrapavosti poplavne površine od njega najbolj razlikoval (Primer 3 - zima). Karto poplavne ogroženosti se je tako izdelalo samo za dva od štirih obravnavanih primerov rabe tal, saj je že njuna medsebojna primerjava poda dovolj dobre informacije o občutljivosti modela. Predvidena razlika v končnem izgledu KPO je bila za ta primera namreč največja.

Izdelava karte poplavne ogroženosti je potekala v skladu z obstoječimi zakonskimi predpisi (Pravilnik o metodologiji...). Vrstni red izdelave KPO je skladno s predstavljeno shemo (stran 25) šel v sledeči smeri: pridobitev podatkov iz Opozorilne karte poplav, izdelava karte poplavne nevarnosti, izdelava karte razredov poplavne nevarnosti, izdelava analize ranljivosti in končno izdelava karte poplavne ogroženosti.

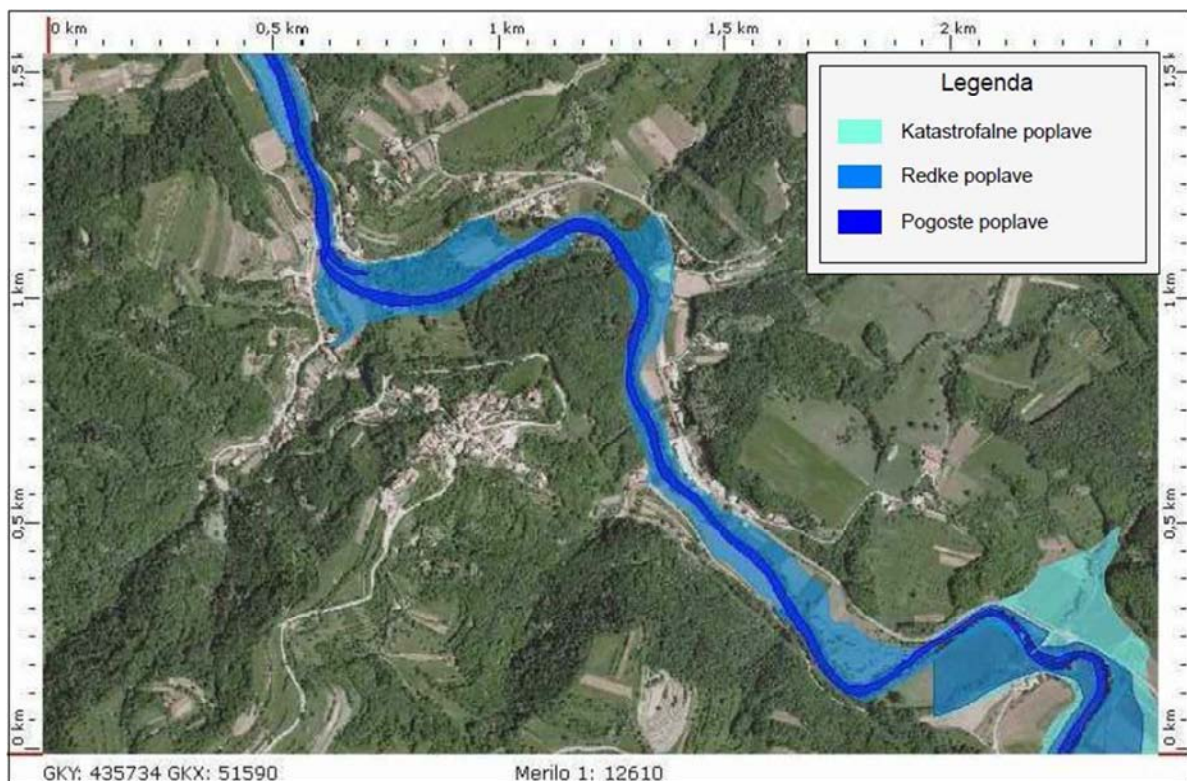
Karte so bile izdelane s pomočjo programa ArcMap, profesionalnega programa za delo s prostorskimi podatki in izdelavo kartografskih vsebin.



### 3.4.1 Opozorilna karta poplav

Za potrebe izdelave diplomske naloge je bil uporabljen le kartografski del Predhodne ocene poplavne ogroženosti, to je Opozorilna karta poplav. Ker je le-ta po zakonu javno dostopna, smo jo pridobili na Atlasu okolja, spletnem zemljevidu Agencije RS za okolje. Na njej so prikazane poplavne linije treh kategorij poplav. Te so pogoste ( $Q_2$ - $Q_5$ ), redke ( $Q_{10}$ - $Q_{20}$ ) in katastrofalne ( $Q_{50}$  in več). Služijo za osnovni vtis in orientacijo o poplavnih karakteristikah reke na izbranem območju. Karta je s podatki o približni velikosti poplavljenega območja v prvi vrsti služila kot pomoč pri izbiri velikosti oz. števila omočenih računskih celic. Uporabljen hidravlični model je namreč podvržen omejitvi števila omočenih računskih celic. Ocena zanesljivosti poplavnih linij na prikazanem območju je 9, kar pomeni, da gre za precej zanesljive podatke.







Iz karte poplavne ogroženosti je razvidno, da je območje rednih poplav omejeno na ožjo rečno strugo, redke poplave pa že zavzemajo večji del poplavne ravnice med strmim gozdnatim pobočjem na zahodu in glavno cest Pivka – Ilirska Bistrica na vzhodu. Kljub visoki oceni zanesljivosti prikazanih podatkov je pravilnost poplavnih linij na skrajnem jugovzhodu obravnavanega območja zaradi nenaravnega poteka malo verjetna. Verjetno so nastale v postopku predhodnih hidravličnih raziskav, kjer omenjen odsek predstavljal sam konec modeliranega območja in bi načeloma moral biti izvzet iz območja veljavnosti modela.



Slika 19: Opozorilna karta poplav za obravnavano območje (vir: Atlas okolja)

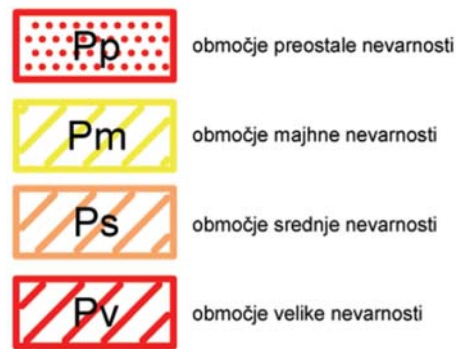
### 3.4.2 Karta poplavne nevarnosti

Karta poplavne nevarnosti prikazuje vse tiste rezultate hidravličnega modela (gre torej za fizikalne količine), ki so pomembni za izdelavo karte poplavne ogroženosti. Pravilnik jih deli v dva sklopa oz. jih deli glede na dva kriterija. Na Karti poplavne nevarnosti po kriteriju globin so prikazane poplavne linije 10-, 100- in 500- letne vode ter območja, kjer pri 100-letni vodi globina vode presega 0,5 m oz. 1,5 m. Karta poplavne nevarnosti glede na kriterij gibalne količine pa za 100-letno vodo prikazuje vsa območja, kjer je hitrost vode večja od nič, znotraj teh pa tudi območja, kjer je zmnožek globine in hitrosti vode večji od  $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$  oz.  $1,5 \text{ m}^2/\text{s}$ . Karti poplavne nevarnosti glede na kriterij globin sta za oba primeri prikazani v prilogah E in F, Karti poplavne nevarnosti glede na kriterij gibalne količine pa sta v prilogah G in H. Izgled oz. vsebina slojev na posamezni karti je predpisan v prilogi 2 iz Pravilnika.

Karta poplavne in erozijske nevarnosti	
globina (pri pretoku $Q_{100}$ )	globina * hitrost (pri pretoku $Q_{100}$ )
 < 0,5 m	 < $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$
 0,5 m do 1,5 m	 $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ do $1,5 \text{ m}^2/\text{s}$
 > 1,5 m	 > $1,5 \text{ m}^2/\text{s}$
velja za vsa območja	velja za območja, kjer so hitrosti večje ali enake $1,0 \text{ m/s}$

Slika 20: Legenda oznak na karti poplavne nevarnosti po Pravilniku (Pravilnik..., 2007, priloga 2)

Na podlagi vsebin, prikazanih na karti poplavne nevarnosti po obeh kriterijih, je bila glede na merila za določitev razredov nevarnosti izdelana Karta razredov poplavne nevarnosti. Najprej so se določili ločeno glede na posamezen kriterij nevarnosti, nato pa se je končna karta oblikovala s prekrivanjem obeh razredov, pri čemer je bilo treba upoštevati višji razred nevarnosti. Karti razredov poplavne nevarnosti se nahajata v prilogah I in J. Šrafure razredov nevarnosti, kot jih predvideva Pravilnik, prikazuje spodnja slika:



Slika 21: Legenda oznak na karti razredov poplavne nevarnosti po Pravilniku (Pravilnik ..., 2007, priloga 3)

### 3.4.3 Analiza ranljivosti

Analiza ranljivosti je raziskava, ki je neodvisna od hidravličnih spremenljivk, zato je enotna za vse štiri primere. Za izdelavo le-te moramo razpolagati z ustreznimi podatkovnimi zbirkami, s pomočjo katerih ugotovimo gostoto prebivalstva, pa tudi prisotnost, pomen in občutljivost fizičnih gospodarskih ter kulturnih elementov v obravnavanem območju. Pozornost je treba nameniti tudi objektom ali dejavnostim, katerih prisotnost bi v primeru poplav lahko vplivala ali celo ogrozila ekološko ravnovesje v prostoru.

Podatki o prisotnosti kulturne dediščine so bili pridobljeni s pomočjo Spletnega registra nepremičnin kulturne dejavnosti Ministrstva za kulturo RS. Znotraj modeliranega območja so v registru zabeleženi spodaj opisani elementi kulturne dediščine:

#### Področje naselbinske dediščine:

- vas Dolnja Bitnja (gručasta vas na desnem bregu Reke),
- vas Prem (grebenska vas pod gradom Prem)
- zaselek Potok (srednjeveški zaselek neposredno pod vasjo Prem)
- zaselek Preska (srednjeveški zaselek na levem bregu reke Reke ob cesti Bitnja - Prem)

#### Področje tehniške dediščine:

- Stari mlin, žaga in dvoločni most pri domačiji Dolnja Bitnja 1 "Pri Joškotovih"
- Kamniti most čez Reko na cesti Dolnja Bitnja – Prem (triločni most, iz avtohtonega kamna, zgrajen 1684, večkrat adaptiran)

#### Področje stavbne dediščine:

- Domačija Dolnja Bitnja 18 (nekdanja gostilna, rojstna hiša Iva Grahorja)
- Grad Prem (iz leta 1213, strateška lega na višinski dominant nad Reko)

- Turn Radlšek (podeželski dvorec nad Gornjo Bitnjo)
- Hiša na domačiji Smrje 1 (ostanek velike domačije z žago, mlinom, leto 1852)

Vse opisane nepremičnine imajo pomembno vlogo pri ohranjanju lokalne in regionalne arhitekturne, naselbinske in tehniške dediščine. Zaradi nepopolnih podatkovnih baz Registra kulturne dediščine na področju označevanja stopnje pomembnosti posameznega varovanega objekta, si pri določanju le-te v konkretnem primeru lahko pomagamo z Odlokom o razglasitvi kulturnih in zgodovinskih spomenikov v občini Ilirska Bistrica. V njem je postopek oz. stopnja varstva spomenikov opredeljena preko dveh varstvenih režimov (v.r. I in v.r. II), pri čemer prva stopnja posameznemu objektu zagotavlja višjo stopnjo varstva. V to kategorijo izmed omenjenih spadajo Grad Prem, triločni most v Dolnji Bitnji ter domačija z mlinom, žago in mostom v Dolnji Bitnji. V postopku izdelave analize ranljivosti je bil tem območjem pripisan status kulturnih spomenikov regionalnega pomena, ostalim pa status spomenikov lokalnega pomena.



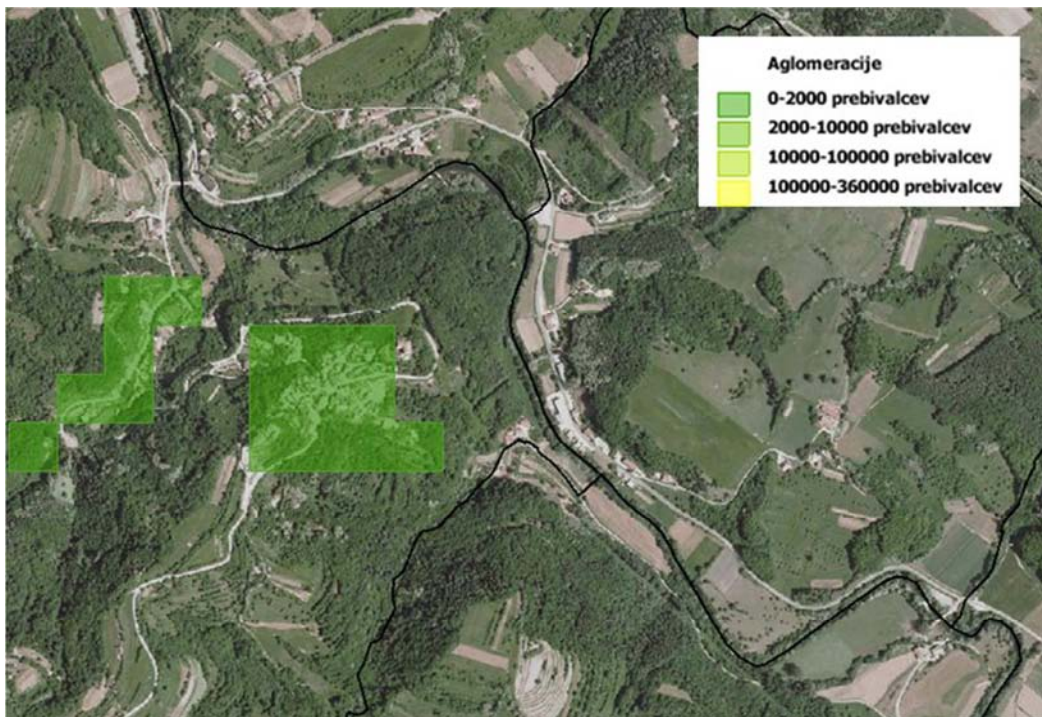
Slika 22: Izsek registra nepremičnin kulturne dediščine za obravnavano območje (vir: spletna stran [www.situla.si](http://www.situla.si))

Območje izdelave analize se nahaja znotraj katastrskih meja štirih naselij. To so Gornja Bitnja, Dolnja Bitnja, Prem in Smrje. Povprečje gostote prebivalstva znotraj omenjenih krajev se po podatkih Statističnega urada RS giblje okoli 50 prebivalcev/km<sup>2</sup>. Gre torej za relativno redko poseljeno območje, saj gostota prebivalstva znaša le polovico slovenskega povprečja.

Čeprav dobimo osnovno predstavo o naseljenosti obravnavanega območja, omenjeno določanje gostote prebivalstva za izdelavo natančne in verodostojne analize ranljivosti ni popolnoma primerno. Poda nam namreč le aritmetično sredino gostote prebivalstva znotraj celotne površine naselja (kvocient števila prebivalcev in velikosti katastrske površine naselja), posamezna manjša območja povečane aglomeracije prebivalstva (npr. stanovanjski bloki, vaška jedra) pa po tej metodi zaradi povprečenja z nenaseljenimi deli katastrske površine naselij ostanejo skrita.

Bolj zadovoljive informacije bi v primeru potrebe po večji prostorski natančnosti razporeditve prebivalstva pridobili ročno, z izdelavo poljubno velikega grida na določenem območju. V vsaki celici (npr. 50 m \* 50 m) bi prešteli dejansko število prebivalcev in tako dobili precej natančno matriko gostote prebivalstva.

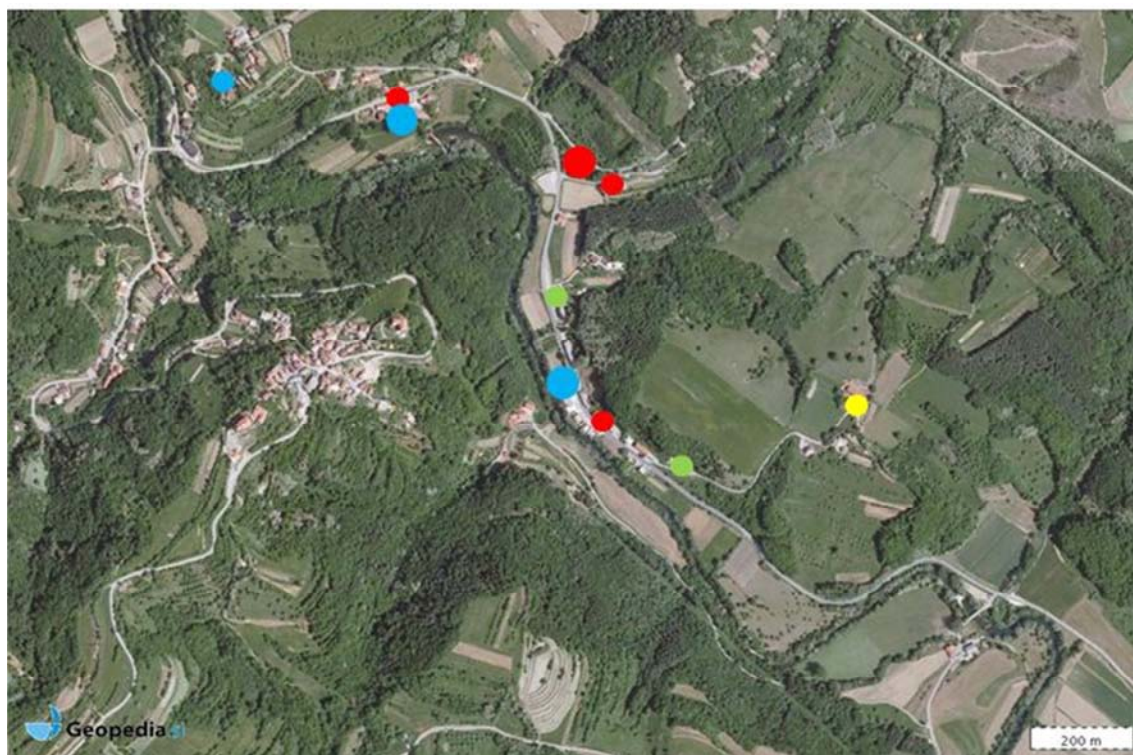
Podoben gridni prikaz aglomeracije prebivalstva na celotnem območju RS je bil za potrebe izgradnje infrastrukture za odvajanje in čiščenje odpadnih voda narejen leta 2007 na tedanjem Ministrstvu za okolje in prostor, javno pa je dostopen kot samostojen sloj na Atlasu okolja (sloj aglomeracije). Slabost te podatkovne zbirke je, da namesto razreda gostote prikazuje razred števila prebivalstva s celicami zajetih območij zgostitve prebivalstva. Velikostni razpon posameznega razreda števila prebivalstva pa je preširok, da bi lahko z razmerjem med številom prebivalstva in številom aglomeracijskih celic pridobili informacije o gostoti prebivalstva, ki bi bile dovolj natančne za zadovoljivo uporabo pri izdelavi analize ranljivosti.



Slika 23: Izrez sloja Aglomeracije prebivalstva na obravnavanem območju (vir: Atlas okolja)

Za izdelavo analize ranljivosti gospodarskih dejavnosti so bili uporabljeni podatki elektronskega poslovnega registra Slovenije (ePRS). Ta razkriva, da ima na območju izdelave sedež podjetniške dejavnosti registriranih 10 oseb. Štiri osebe imajo registrirano storitveno obrtno dejavnost (rdeča barva), dve osebi proizvodno obrtno dejavnost (modra), na območju pa so še gostinske (zelena) in kmetijske (rumena) dejavnosti. Večina omenjenih gospodarskih dejavnosti imajo izrazito lokalni značaj, saj gre v večini za majhna podjetja. Lokacija in vrsta dejavnosti je prikazana na spodnji sliki. Regionalni pomen gospodarske dejavnosti bi lahko pripisali edino mali hidroelektrarni (mHE) v Dolnji Bitnji 1, saj s cca 32000 kWh letno proizvedene električne energije predstavlja nezanemarljivo vlogo pri regionalni oskrbi z elektriko, kot tudi podjetjema Valter Frank in Ronzullo, saj v proizvodnji strojev oz. prevozniški dejavnosti skupaj zaposlujeta okoli 30 delavcev (Spletna stran Bizi).

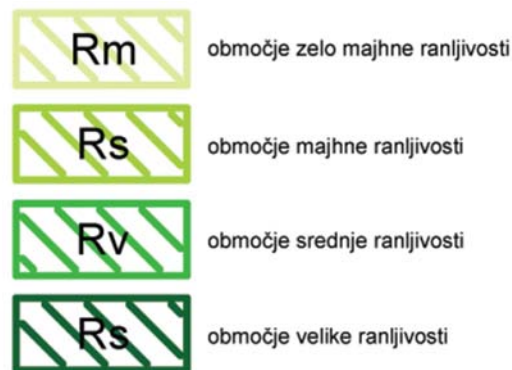
Dejavnosti, ki bi v ekološkem smislu resneje ogrožale prostor, na tem območju ni.



*Slika 24: Prikaz gospodarskih dejavnosti v območju glede na vrsto in pomen (vira: Spletna stran Geopedia in Ajpes)*

Vpliv zgoraj predstavljenih dejavnikov na poplavno ranljivost prostora se lahko ovrednoti s pomočjo priloge *Pravilnika*, imenovane Merila za določitev razredov ranljivosti. Nahaja se v prilogi B. Glede na predstavljene kriterije (gostota prebivalstva, ekološki vpliv, gospodarske dejavnosti, kulturni spomeniki) določimo razred ranljivosti, končno obliko karte pa dobimo s prekrivanjem razredov iz posameznega kriterija, pri čemer na posameznem območju upoštevamo tisti dejavnik, ki določa višji

razred ranljivosti. Posamezne razrede ranljivosti na karti označimo s šrafuro, predpisano v Pravilniku. Izdelana karta ranljivosti prostora je prikazana v prilogi K.



Slika 25: Legenda oznak na karti razredov poplavne ranljivosti po Pravilniku (Pravilnik ..., 2007, priloga 5)

#### 3.4.4 Karta poplavne ogroženosti

Razredi poplavne ogroženosti na Karti poplavne ogroženosti so bili določeni s pomočjo geometričnega prekrivanja oz. preseka (*angl. intersect*) podatkovnih slojev karte poplavne ranljivosti ter posamezne karte razredov poplavne nevarnosti v programu ArcMap. Merila za določanje stopnje ogroženosti so v Pravilniku določena s pomočjo posebne določevalne preglednice, ki opredeljuje, kakšno ogroženost povzroča posamezna kombinacija ranljivosti in nevarnosti. Zaradi nesimetričnosti matrike je razvidno, da ima poplavna nevarnost v primerjavi z ranljivostjo malenkost večji vpliv na poplavno ogroženost prostora. Merila za določitev razredov poplavne ogroženosti in predpisana barva šrafure posameznega razreda na karti je podana v spodnji sliki.

		RAZRED NEVARNOSTI			
		velika	srednja	majhna	preostala
RAZRED OGROŽENOSTI					
RAZRED RANLJIVOSTI	velika	Ov	Ov	Os	Om
	srednja	Ov	Ov	Os	Om
	majhna	Ov	Os	Om	Om
	zelo majhna	Os	Om	Om	Om

**Legenda oznak**

	majhna ogroženost
	srednja ogroženost
	velika ogroženost

Slika 26: Legenda oznak na karti razredov poplavne ogroženosti po Pravilniku (Pravilnik ..., 2007, prilogi 6 in 7)

Karte poplavne nevarnosti, Analiza ranljivosti in Karta poplavne ogroženosti so bile izdelane s pomočjo programa ArcMap. Podlaga za izdelavo kart so bili georeferencirani digitalni ortofoto (DOF) posnetki iz leta 2009. S pomočjo orodij iz paketa Arc ToolBox, kot so manjšanje velikosti rastrske celice, izdelava plastnic in glajenje poligonov, pa so bile matrike rezultatov programa Mike Flood (globina in hitrost) v skladu s Pravilnikom grafično pretvorjene v ustrezne poplavne linije.

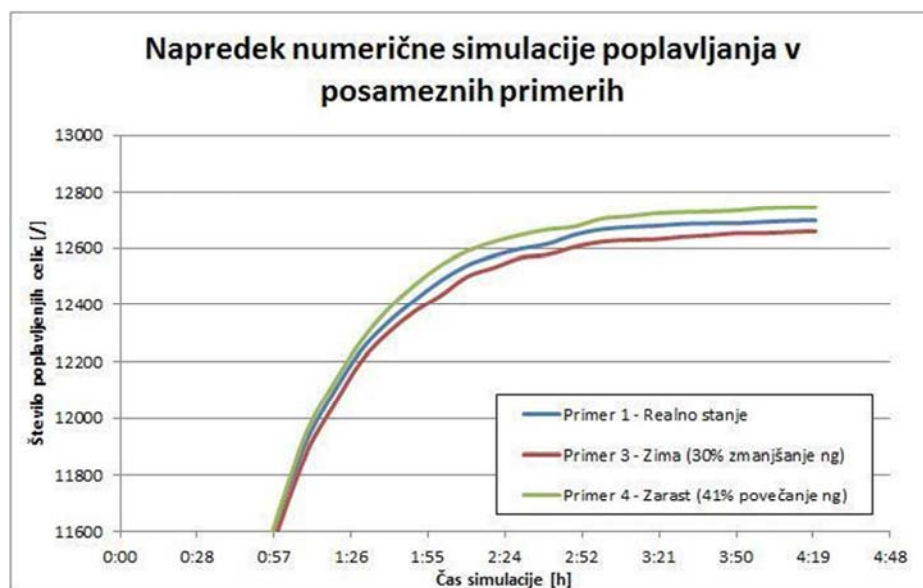


## 4 PRIKAZ IN ANALIZA REZULTATOV

Analiza občutljivosti hidravličnega modeliranja na hrapavost tal se je izvedla prek meritve vplivov spreminjanja Manningovih koeficientov na različne hidravlične parametre. V spodnjih poglavjih so ločeno predstavljeni izsledki raziskav vpliva koeficienta  $n_g$  na obseg poplavljenega območja, na hitrost vodotoka in na razporeditev razredov nevarnosti na karti poplavne nevarnosti. Vse raziskave so bile narejene za poplavne dogodke  $Q_{10}$ ,  $Q_{100}$  in  $Q_{500}$ . Ker smo hoteli vpliv dogajanja v ožji strugi reke izničiti, je celotna analiza občutljivosti narejena samo na poplavnem območju, torej na območju, ki je bil modeliran z dvodimenzionalnim modelom.

### 4.1 Vpliv spremembe hrapavosti na obseg poplave

Vpliv spremembe hrapavosti na obseg poplave je bil najprej izvrednoten s pomočjo opazovanja hitrosti in obsega poplavljanja v času za poplavni dogodek  $Q_{100}$ . Poleg referenčnega stanja (primer 1) sta bila opazovana tudi primera, kjer je bila povprečna hrapavost največja (primer 4) in najmanjša (primer 3). Dinamika numerične simulacije poplavljanja glede na posamezen primer je grafično prikazana na spodnji sliki.



Slika 27: Primerjava časovnega napredka num. sim. poplavljanja za primer 1, 3 in 4 pri  $Q_{100}$

Že z grafično predstavitevjo napredka numerične simulacije napredovanja poplav lahko ugotovimo, da ima v našem primeru sprememba hrapavosti minimalen vpliv na obseg poplave. Pri tem velja opozoriti, da je bil modeliran stalni tok, zato zgornja krivulja ne predstavlja realnega napredka simuliranega poplavnega dogodka (hidrograma poplave), pač pa le navidezni napredek poplave do vzpostavitve stalnega toka v postopku numerične simulacije poplave.

Vpliv spremembe hrapavosti na obseg poplave je bil izmerjen s pomočjo obeh predstavljenih statističnih faktorjev. Analiza spremembe obsega poplave s pomočjo omenjenih enačb razkriva, da je konkretni hidravlični model izrazito neobčutljiv na spremembo hrapavosti površja. Če rezultate povprečimo glede na velikost poplavnega pretoka, povprečni faktor neelastičnosti v seriji devetih raziskav (trije različni poplavni dogodki na treh primerih potencialne rabe tal) znaša 94,99, kar pomeni, da sprememba hrapavosti v povprečju prinaša skoraj 100-krat manjšo spremembo obsega poplave. Rezultati kažejo tudi, da se neelastičnost oz. neobčutljivost modela z večanjem poplavnega dogodka veča. V splošnem nobena raba tal ne kaže statistično značilnega večjega ali manjšega vpliva na občutljivost modela, saj se pri vsakem pretoku kot najbolj neelastična izkaže druga vrsta hrapavosti. Izračuni faktorja neelastičnosti za posamezni poplavni dogodek so za vsak primer potencialne rabe predstavljeni v spodnji preglednici.

Preglednica 6: Izračun faktorja modelne neelastičnosti za parameter obsega poplav

Obseg poplav - faktor neelastičnosti	Q10				Q100				Q500			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Št. Omočenih celic	9302	9341	9239	9409	12705	12722	12661	12752	14740	14747	14654	14778
Omočena površina [m <sup>2</sup> ]	148832	149456	147824	150544	203280	203552	202576	204032	235840	235952	234464	236448
Srednja vrednost koeficienta M (1/n <sub>g</sub> )	23,597	20,226	35,275	15,857	25,884	22,912	37,042	18,335	27,200	24,410	37,823	19,993
Srednja vrednost koeficienta n <sub>g</sub>	0,042	0,049	0,028	0,063	0,039	0,044	0,027	0,055	0,037	0,041	0,026	0,050
Odstopanje poplavne površine [%]		0,42	-0,68	1,15		0,13	-0,35	0,37		0,05	-0,58	0,26
Odstopanje srednje vrednosti n [%]		16,66	-33,11	48,81		12,97	-30,12	41,18		11,43	-28,09	36,04
Faktor neelastičnosti [/]		39,74	48,88	42,44		96,93	86,98	111,30		240,69	48,14	139,81
Povprečni faktor neelastičnosti [/]	<b>43,69</b>				<b>98,41</b>				<b>142,88</b>			
	<b>94,99</b>											

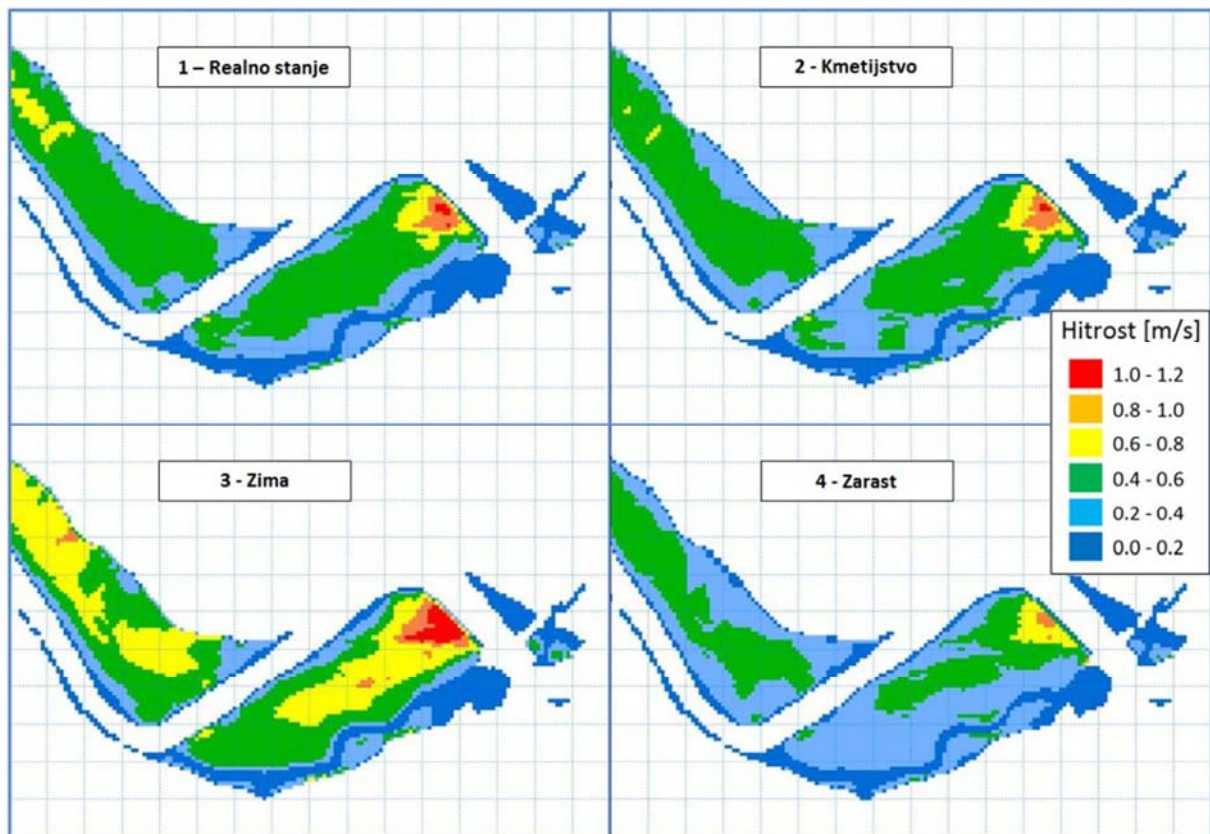
Analiza občutljivosti je bila narejena tudi s pomočjo faktorja razpršenosti. Ta je potrdil rezultate faktorja neelastičnosti. Povprečna vrednost faktorja razpršenosti v devetih raziskavah je bila 68,35. Nekaj manjša skupna povprečna vrednost faktorja razpršenosti izhaja iz nižje razpršenosti obsega poplav pri Q<sub>500</sub>. Povprečne vrednosti faktorjev pri Q<sub>10</sub> in Q<sub>100</sub> pa so praktično iste, saj se nahajajo znotraj 8% odstopanja.

Preglednica 7: Izračun faktorja razpršenosti za parameter obsega poplav

	Obseg poplav - faktor razpršenosti					Relativna razpršenost [%]	Faktor razpršenosti [/]	
	Primer	1	2	3	4			
Q10	Omočena površina [m <sup>2</sup> ]	148832	149456	147824	150544	0,76	<b>41,33</b>	<b>68,35</b>
	Srednja vrednost koeficienta n <sub>g</sub>	0,042	0,049	0,028	0,063	31,57		
Q100	Omočena površina [m <sup>2</sup> ]	203280	203552	202576	204032	0,30	<b>93,34</b>	
	Srednja vrednost koeficienta n <sub>g</sub>	0,039	0,044	0,027	0,055	27,91		
Q500	Omočena površina [m <sup>2</sup> ]	235840	235952	234464	236448	0,36	<b>70,37</b>	
	Srednja vrednost koeficienta n <sub>g</sub>	0,037	0,041	0,026	0,050	25,38		

## 4.2 Vpliv spremembe hrapavosti na hitrost poplavne vode

Stopnjo spremembe matrike hitrosti, povzročene s spremembo hrapavosti, se najbolj očitno lahko predstavi grafično. Na slikovnem prikazu razporeditve hitrosti na manjšem izseku modeliranega območja za vse primere rabe tal ob poplavnem dogodku  $Q_{500}$  lahko vidimo, da so spremembe hitrosti sicer večje kot spremembe poplavne površine, vendar še vedno zelo majhne.



Slika 28: Primerjava hitrostnega polja posameznega primera na odseku modela (vir: Mike Flood)

Poleg grafične primerjave se je vpliv spremembe hrapavosti na hitrost poplavne vode preveril tudi s pomočjo analize občutljivosti.

Obdelava podatkov o povprečni hitrosti vode s pomočjo faktorja modelne neelastičnosti nam razkriva, da je hitrost vode parameter, ki je v primerjavi z obsegom poplave veliko bolj občutljiv na spremembo hrapavosti površine. Občutljivost hitrosti na spremembo hrapavosti ( $FN = -2,18$ ) je namreč kar slabih 50-krat večja od občutljivosti poplavne površine ( $FN = 94,99$ ). Negativne vrednosti faktorja modelne neelastičnosti izhajajo iz dejstva, da povečanje hrapavosti (pozitivna sprememba) povzroča zmanjšanje povprečne hitrosti (negativna sprememba) in obratno. Zaradi želje po primerljivosti rezultatov različnih opazovanih izhodnih parametrov faktor neelastičnosti obravnavamo kot skalar, zato nas zanima le njegova absolutna vrednost. Rezultati analize spreminjanja hitrosti s FN nam povejo, da ima

spreminjanje hrapavosti v povprečju polovičen učinek na spremembo hitrosti poplavne vode. Preglednica izračunov faktorja neelastičnosti za področje hitrosti poplavne vode je podana spodaj.

Preglednica 8: Izračun faktorja modelne neelastičnosti za parameter hitrosti

Hitrost - faktor neelastičnosti	Q10				Q100				Q500			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Povprečna hitrost vode [m/s]	0.167	0.149	0.202	0.133	0.251	0.235	0.293	0.211	0.326	0.312	0.371	0.285
Srednja vrednost koeficienta $M(1/n_g)$	23.60	20.21	35.28	15.86	25.88	22.91	37.04	18.33	27.20	24.41	37.82	19.99
Srednja vrednost koeficienta $n_g$	0.042	0.049	0.028	0.063	0.039	0.044	0.027	0.055	0.037	0.041	0.026	0.050
Odstopanje povprečne hitrosti [%]		-10.38	21.04	-20.17		-6.14	17.04	-15.72		-4.43	13.54	-12.73
Odstopanje srednje vrednosti $n_g$ [%]		16.74	-33.11	48.81		12.97	-30.12	41.18		11.43	-28.09	36.04
Faktor neelastičnosti [/]		-1.61	-1.57	-2.42		-2.11	-1.77	-2.62		-2.58	-2.07	-2.83
Povprečni faktor neelastičnosti [/]	<b>-1.87</b>				<b>-2.17</b>				<b>-2.49</b>			
	<b>-2.18</b>											

Opozoriti velja na dejstvo, da je v primeru 4 (simulacija spontane zarasti območja) v primerjavi s preostalimi primeri vrednost faktorja neelastičnosti za hitrost vode praktično neodvisna od velikosti poplavnega dogodka in v povprečju med vsemi potencialnimi primeri največja ( $FN = -2,62$ ). V povprečju največja občutljivost modela pa se kaže v primeru 3 (zima), in sicer  $FN = -1,81$ .

Tudi za hidravlični parameter hitrosti vode so bili rezultati občutljivosti modela, pridobljeni s pomočjo faktorja modelne neelastičnosti, potrjeni s pomočjo faktorja razpršenosti. Na primeru hitrosti poplavne vode se vrednosti  $FR$  in  $FN$  znotraj posameznega poplavnega dogodka ujemajo znotraj cca. 10% intervala. To pomeni, da je bil s faktorjem razpršenosti izračunan enak razred občutljivosti modela kot z uporabo faktorja neelastičnosti. Vrednosti faktorja razpršenosti za področje hitrosti poplavne vode so podane v sledeči preglednici.

Preglednica 9: Izračun faktorja razpršenosti za parameter hitrosti poplavne vode

	Hitrost - faktor razpršenosti					Relativna razpršenost [%]	Faktor razpršenosti [/]	
	Primer	1	2	3	4			
Q10	Povprečna hitrost vode [m/s]	0,167	0,149	0,202	0,133	18,08	<b>1,75</b>	<b>2,01</b>
	Srednja vrednost koeficienta $n_g$	0,042	0,049	0,028	0,063	31,57		
Q100	Povprečna hitrost vode [m/s]	0,251	0,235	0,293	0,211	13,95	<b>2,00</b>	
	Srednja vrednost koeficienta $n_g$	0,039	0,044	0,027	0,055	27,91		
Q500	Povprečna hitrost vode [m/s]	0,326	0,312	0,371	0,285	11,08	<b>2,29</b>	
	Srednja vrednost koeficienta $n_g$	0,037	0,041	0,026	0,050	25,38		

### 4.3 Vpliv spremembe hrapavosti na razrede poplavne nevarnosti

Za ugotavljanje korelacije med spremembo hrapavosti površja in spremembo razmerij velikosti posameznega razreda ogroženosti se je za primer 1 in primer 3 naredila karta poplavne ogroženosti. S pomočjo orodij programa ArcMap se je pridobilo podatke o velikosti posameznega razreda ogroženosti v obeh primerih. Prikazani so na spodnji preglednici:

Preglednica 10: Primerjava kart poplavne ogroženosti

	Primer 1	Primer 3	Sprememba [%]
<u>Površina [m<sup>2</sup>]</u>			
Velika ogroženost	15.292,37	15.248,43	-0,29
Srednja ogroženost	168.659,04	168.329,78	-0,20
Majhna ogroženost	136.676,29	135.386,98	-0,94
Celotna površina	320.627,69	318.965,18	-0,52
<u>Delež posameznega razreda znotraj poplavljenega območja [%]</u>			
Velika ogroženost	4,77	4,78	0,01
Srednja ogroženost	52,60	52,77	0,17
Majhna ogroženost	42,63	42,45	-0,18
Celotna površina	100,00	100,00	0,00

Že primerjava obsega poplavljenega površine iz poglavja 4.1 nam pove, da se, glede na osnovno stanje, poplavljen območje v zimskem času (primer 3) zmanjša. S primerjavo deležev posameznega razreda ogroženosti pa eliminiramo vpliv zmanjšanja absolutne velikosti poplavljanja, zato smo lahko opazovali le spremembo relativnih deležev posameznih razredov. Zaradi zmanjšanja obsega poplavljanja se je v primeru 3 povprečna hitrost pričakovano povečala, temu ustrezna pa je tudi smer spreminjanja razredov ogroženosti. Na račun razreda majhne ogroženosti (0,18%) se je v glavnem povečal razred srednje ogroženosti (0,17%), komaj zaznavno pa je bilo relativno povečanje razreda velike ogroženosti.

Ker so vse spremembe površine (tudi absolutne) manjše od 1%, lahko vpliv hrapavosti na spremembo kart poplavne ogroženosti ob upoštevanju dejstva, da so bile spremembe povzročene s kar 33% zmanjšanjem povprečnega Manningovega koeficienta, v naši študiji primera mirno zanemarimo oz. zanikamo.

Razlog za tako majhen vpliv spremembe hrapavosti na karto poplavne ogroženosti lahko deloma pripišemo tudi metodologiji izdelovanja kart poplavne ogroženosti. Hidravlične spremenljivke (edini neposredno opazovani vhodni in izhodni parameter analize občutljivosti) so v postopku izdelave KPO direktno prikazane le na karti poplavne nevarnosti po prvem in drugem kriteriju. Že izdelava karte razredov poplavne nevarnosti z združevanjem omenjenih kart in klasifikacijo hidravličnih parametrov skrije veliko detajlov enega ali drugega kriterija, saj uvaja enotno lestvico nevarnosti.

Kljub generalizaciji pa karta razredov poplavne nevarnosti še vedno ohranja precej večjo pestrost oz. razgibanost v primerjavi s končnim izdelkom, karto poplavne ogroženosti. Vmesni korak je namreč

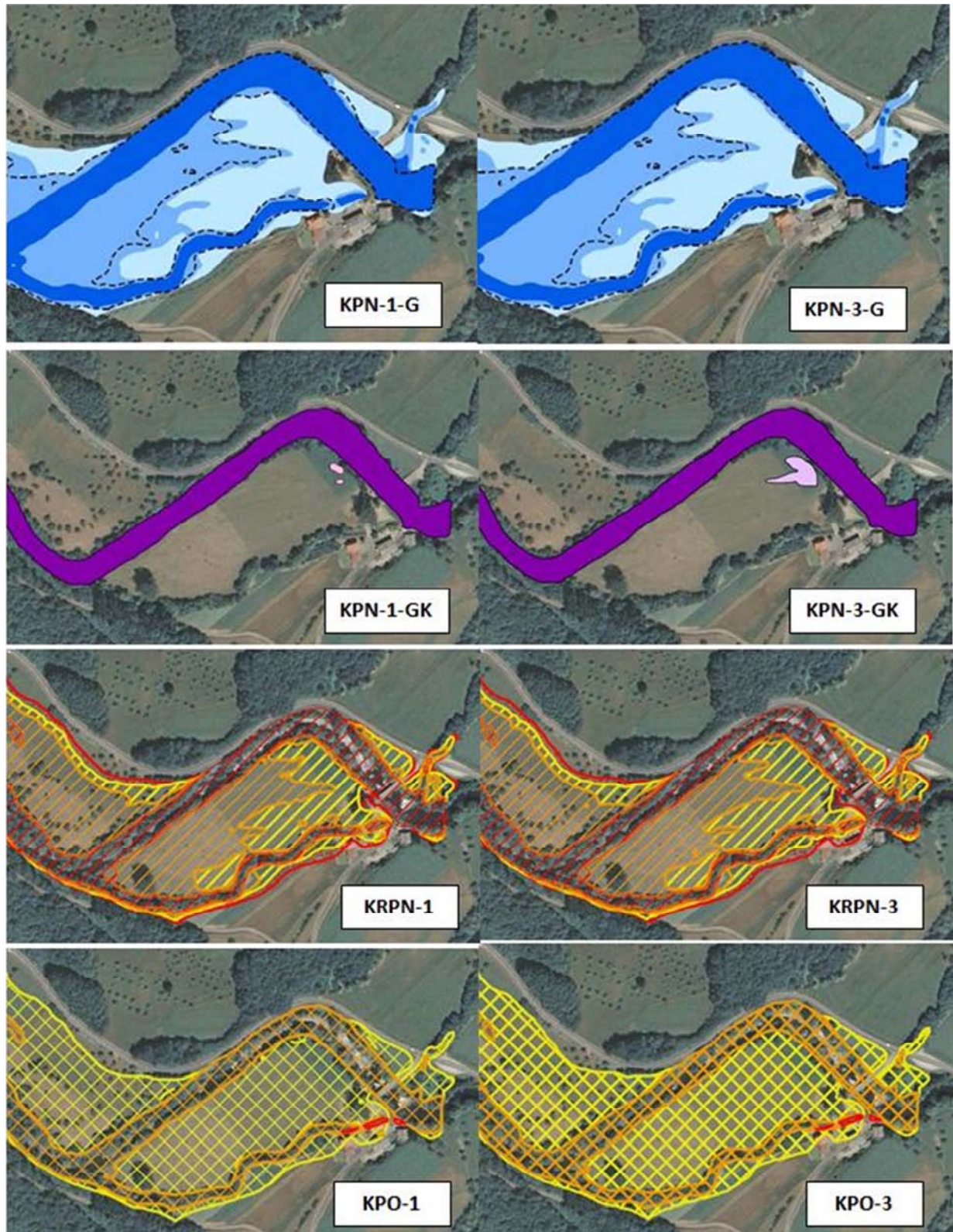
analiza ranljivosti. S presekom karte razredov poplavne nevarnosti in analize ranljivosti pa iz štirih razredov nevarnosti preidemo na le 3 razrede ogroženosti, kar še dodatno skriva detajle na karti.

Posledice opisane generalizacije lahko v konkretnem primeru opazujemo s primerjavo parov posameznih poplavnih kart v postopku izdelave Karte poplavne ogroženosti na sliki 29.

Karti poplavne nevarnosti po kriteriju globin se zaradi velike neelastičnosti modela ne razlikujeta pretirano, saj tudi redke izračunane malenkostne razlike v globini in obsegu vode pri posameznem poplavnem dogodku na karti niso več vidne. Karta poplavne nevarnosti po kriteriju gibalne količine ima zaradi relativno večje hitrosti toka v primerjavi z referenčnim stanjem zaznavno večji razred majhne nevarnosti.

Zaradi nizkih absolutnih hitrosti toka (razred majhne nevarnosti) se vpliv Karte poplavne nevarnosti po drugem kriteriju v Karti razredov poplavne nevarnosti povsem izgubi, saj ga v obeh primerih prekrijejo območja razredov nevarnosti po prvem kriteriju, ki po celotnem območju določajo enak ali celo večji razred nevarnosti. Karta razredov nevarnosti sta si zato ponovno bolj podobni, saj razen minimalnih razlik v poteku linij med razredi ni opaznih razlik.

Kombinacije razredov ranljivosti in nevarnosti, ki ogroženost razdelijo v le tri razrede, v konkretnem primeru še bolj poenostavijo izgled podatkov na Karti poplavne ogroženosti. V grafičnem smislu razlik na KPO torej praktično ni. Le-te bi se seveda pojavile, če bi bila morebitna območja na Karti poplavne nevarnosti 1 (KPN-1) na robu poplavljanja, v primeru KPN-3 pa bili poplavljeni.



Slika 29: Primerjava posameznih kart za primer 1 (levo) in primer 3 (desno) Od zgoraj navzdol si po vrsti sledijo: KPN – kriterij globine, KPN – kriterij gibalne količine, KRPN in KPO)

#### 4.4 Vpliv vrste rabe tal na občutljivost modela

V prejšnjih poglavjih so bili rezultati prikazani v obliki faktorja neelastičnosti oz. faktorja razpršenosti, pri čemer so bile vrednosti faktorjev povprečene po rabi tal, da smo ugotovili povprečni faktor občutljivosti glede na velikost poplavnega dogodka. S povprečenjem rezultatov po povratni dobi poplave pa dobimo zanimivo in zgovorno primerjavo faktorjev občutljivosti glede na rabo tal, ki nam pove, katera vrsta rabe tal povzroča največjo občutljivost modela. Spodnja preglednica prikazuje tudi velikosti povprečnih sprememb hrapavosti in od nje odvisnega obsega poplave oz. hitrosti za vsako rabo tal posebej.

*Preglednica 11: Občutljivost hitrosti in poplavne površine glede na vrsto rabe tal*

	2 - Kmetijstvo	3 - Zima	4 - Zarast	Povprečno
Povprečna sprememba $n_g$ [%]	13.69	-30.44	42.01	28.71
Povprečna sprememba obsega poplave [%]	0.20	-0.54	0.59	0.44
Povprečna sprememba povprečne hitrosti vode [%]	-6.98	17.21	-16.21	13.47
Faktor neelastičnosti za obseg poplave [/]	68.37	56.82	70.88	65.36
Faktor neelastičnosti za hitrost vode [/]	-1.96	-1.77	-2.59	-2.11

V analizi občutljivosti hidravličnega modela glede na vrsto rabe tal se je primer 4 (zarast) s  $FN = 70,88$  izkazal za najmanj občutljivo podlago, primer 3 (zima) s  $FN = 56,82$  pa za najbolj občutljivo. Na podlagi teh izsledkov bi lahko hitro sklepali, da so dejavniki, ki povečujejo hidravlično hrapavost, za verodostojnost modela in KPO manj nevarni od tistih, ki hrapavost zmanjšujejo. Vendar moramo na rezultate gledati celostno in upoštevati ne samo velikosti, pač pa tudi smer sprememb. Večanje hrapavosti v primerjavi z njenim manjšanjem sicer res povzroči manjšo velikost sprememb, vendar gre pri večanju hrapavosti ta sprememba v smeri povečanja površine razredov poplavne nevarnosti, kar je ne glede na velikost spremembe vsekakor neželena posledica. Po drugi strani pa večja hrapavost zmanjšuje hitrost poplavne vode, kar ima lahko predvsem na območjih, kjer je povprečna hitrost vode okoli 1 m/s, zelo pozitiven vpliv na manjšanje stopnje razredov poplavne nevarnosti po drugem kriteriju in v končni fazi stopnje razredov poplave ogroženosti. Le na podlagi naše analize splošnih zaključkov o tem, katera smer spremembe hrapavosti tal se izkaže za bolj oz. manj nevarno za verodostojnost KPO, torej ne moremo delati. Pri posamezni smeri spremembe hrapavosti imata sprememba hitrosti in sprememba obsega poplav namreč nasprotni učinek na zmanjšanje poplavne ogroženosti, pri čemer pa sta smer in velikost njune vektorske vsote različni od primera do primera.



## 4.5 Sinteza

Hidravlični model je kompleksen sistem z več spremenljivkami, ki so lahko potencialni vir nenatančnosti rezultatov modela. Analizo občutljivosti hidravličnega modela smo izvajali samo na enem vhodnem parametru in sicer je bila naša neodvisna spremenljivka v analizi občutljivosti hidravlična hrapavost poplavne površine. V skladu z metodologijo tovrstne analize je za pridobitev verodostojnih rezultatov analize občutljivosti treba ostale vhodne parametre pustiti nespremenjene, za zagotovitev verodostojnosti modela pa se morajo le-ti tudi v čim večji meri skladati z realnim stanjem.

### 4.5.1 Natančnost modela

Pri izdelavi hidravličnega modela so bili na voljo vhodni podatki različne natančnosti. Topografija območja je bila zajeta z gosto mrežo točk, pridobljenih s pomočjo snemanja LIDAR, zato je relief poplavnih površin določen zelo natančno. Zadovoljivo velika natančnost je dosežena tudi pri določanju batimetrije struge, saj je pridobljena iz natančnih in gostih geodetsko izmerjenih prečnih profilov struge, posnetih v povprečnem razmiku 36 m. Začetni pogoj (hidrogram pretoka) je bil v danih razmerah najboljši možni približek realnemu stanju, vendar bi morali v primeru potrebe po večji natančnosti le-tega za vsako povratno dobo izračunati s pomočjo kompleksnega hidrološkega modela, za izdelavo katerega bi potrebovali številne zanesljive terenske meritve in arhivske podatke.

Omenjeni vhodni parametri so omogočali izvedbo zadovoljivo natančnega modeliranja. Kvaliteto oz. verodostojnost izračunov sicer dobrega modela pa zmanjšuje pomanjkanje razpoložljivih terenskih meritev pretoka. Ti so nujno potrebni za izdelavo zanesljive pretočne krivulje za spodnji robni pogoj ter umerjanje celotnega modela. Na voljo sta bila le dva dokaj nezanesljiva podatka o višini in pretoku poplavne vode, kar je za potrditev veljavnosti modela na širšem spektru pretočnih vrednosti premalo.

Kljub temu, da je bil hidravlični model obremenjen z neko absolutno napako oz. nenatančnostjo, pa to bistveno ne vpliva na rezultate analize občutljivosti, saj se je le-ta izvajala z medsebojno primerjavo modelnih izračunov, ki so bili obremenjeni z isto absolutno napako. Primarni namen diplomske naloge oz. analize občutljivosti namreč ni bil določitev absolutne natančnosti produktov hidravličnega modela, pač pa izmeriti parcialni vpliv izbranega vhodnega parametra (v našem primeru hrapavosti poplavne površine) na opazovano izhodno količino ter tako številčno in opisno ovrednotiti relativni prispevek nenatančnega določanja hrapavosti h končni natančnosti opazovanih izhodnih parametrov.

### 4.5.2 Občutljivost modela

V splošnem so vse metode, s katerimi je bila v študiji preverjena občutljivost hidravličnega modela na spremembo hrapavosti površja, pokazale precejšnjo neobčutljivost oz. neelastičnost opazovanih izhodnih parametrov na testirano količino. Razlika v občutljivosti posameznih opazovanih izhodnih

parametrov vseeno ostaja. Iz preglednice 11 lahko razberemo, da je pri skoraj 29-odstotni spremembi povprečne vrednosti Manningovega koeficienta povprečna sprememba poplavljenega območja le slabih 0,5 %, sprememba povprečne hitrosti pa kar dobrih 13 %. Občutljivost hitrosti v izdelanem modelu je torej glede na občutljivost obsega poplav v povprečju kar 30-krat višja, zato je vpliv spremembe hrapavosti na hitrost poplavne vode vreden toliko večje pozornosti in obravnave.

Ker so bili posamezni potencialni primeri rabe tal namenoma zasnovani tako, da so testirano spremembo rabe tal upoštevali v pretiranem obsegu, smo v smeri povečanja in zmanjšanja povprečne hrapavosti območja gotovo zajeli realne skrajne zmožnosti spreminjanja rabe tal. Zato lahko na podlagi maksimalnih izračunanih odstopanj opazovanih parametrov, prikazanih v preglednici 11, z veliko gotovostjo trdimo, da znaša:

- parcialna napaka izračuna obsega poplave zaradi spremembe hrapavosti pod **0,6 %** in
- parcialna napaka izračuna povprečne hitrosti vode zaradi spremembe hrapavosti pod **17%**.

Posledice večje občutljivost hitrosti na spremembo hrapavosti so se opazile predvsem na karti poplavne nevarnosti po drugem kriteriju (kriterij globina \* hitrost). Povprečna hitrost ob poplavnem dogodku  $Q_{100}$  v primeru 3 (zima) bi se povečala za kar 17%, zato bi pričakovali še večje spremembe na tej karti. Vendar je zaradi širokega razpona razredov nevarnosti po 2. kriteriju in nizke absolutne hitrosti sprememba le-te imela zanemarljivo majhen vpliv na karto razredov poplavne nevarnosti, saj je prevladal vpliv nevarnosti po kriteriju globin. Ob predpostavki iste občutljivosti hitrosti poplavne vode pri višjih hitrostih pa bi ugotovljena korelacija že lahko imela močno zaznaven vpliv, ki bi bil opazen tudi na karti razredov poplavne nevarnosti in posledično na karti poplavne ogroženosti.

Izris kart poplavne ogroženosti za dva primera rabe tal je pokazal, da je izračunani velikostni razred občutljivosti modela v splošnem premajhen, da bi lahko vplival na verodostojnost izdelane karte ogroženosti. Razlike poplavnega stanja, ki jih povzročajo nenatančno določeni parametri hidravličnega modeliranja, so v izdelani študiji zanemarljivo majhne in v prvi fazi vplivajo le na karto poplavne nevarnosti, nato pa izzvenijo. Na končni karti poplavne ogroženosti se tako absolutne velikosti posameznih razredov niso spremenile za več kot 1%, njihovi relativni deleži skupne površine pa so se razlikovali za manj kot 0,2 %.

Rezultatov korelacije med spremembo hrapavosti in spremembo poplavne ogroženosti, dobljene s pomočjo izvedene študije odseka reke Reke, ne smemo posplošiti oz. interpretirati kot merodajno korelacijo za vse nadaljnje primere hidravličnega modeliranja poplavnih površin v splošnem.

Obravnavano modelirano območje je namreč predvsem v primerjavi z nižinskimi predeli večjih rek neprimerno bolj strmo. Ozka in strma rečna dolina ima glede na širok in položen obvodni prostor precej manjša poplavna območja, zato je tudi absolutna sprememba njihove velikosti v primeru spreminjanja hidravličnih pogojev manjša. S tega vidika bi bil za ugotavljanje občutljivosti obsega

poplavljanja na spremembo hrapavosti kakšen ravninski predel večje reke v srednjem ali spodnjem toku primernejša izbira. Na takih območjih bi verjetno ugotovili višjo korelacijo med spremembo hrapavosti in spremembo velikosti poplavljenega območja, manjša pa bi bila korelacija na področju spremembe povprečne hitrosti. Za dokončno ovržbo (ali morebitno potrditev) diplomske teze bi bilo zato enako analizo treba izvesti na nekaj morfološko različnih odsekih rek s čim večjo diverzijo reliefnih dejavnikov (naklon in velikost rečne struge, naklon in velikost poplavnega območja, število sotočij, razvejanost in zavrtost rečne struge,...). Le z uporabo številnih, medsebojno različnih rečnih odsekov bi lahko izničili vpliv reliefnih danosti in za opazovane hidravlične količine podali splošno veljavno oz. univerzalno oceno modelne občutljivosti na hrapavost tal.

Neodvisno od hidravlične analize občutljivosti modela se je tekom izdelave karte poplavne ogroženosti pokazala velika sistemska pomanjkljivost pri zagotavljanju ustrezne natančnosti kart poplavne ogroženosti. Vire nenatančnosti karte poplavne ogroženosti moramo namreč iskati ločeno v karti poplavne nevarnosti in karti poplavne ranljivosti. Če se je z opravljeno analizo občutljivosti izkazalo, da je natančnost hidravličnih modelov in s tem karte poplavne nevarnosti s stališča vpliva spremenljive hrapavosti tal načeloma zadostna, pa ima natančnost trenutno razpoložljivih orodij, podatkovnih baz in predpisov, na podlagi katerih se določa poplavna ranljivost prostora, še veliko raziskovalnega potenciala in potrebe za izboljšanje.

Kot velik potencialen vir nenatančnosti KPO se je namreč izkazala obstoječa metodologija izdelave analize ranljivosti, ki je po obstoječem Pravilniku karti poplavne nevarnosti popolnoma enakovreden vir podatkov v fazi izdelave karte poplavne ogroženosti. Obstoječa metodologija izdelave analize ranljivosti pa je v primerjavi z metodologijo karte poplavne nevarnosti neprimerno manj natančna. Če želimo torej izboljšati natančnost karte poplavne ogroženosti, je namesto optimizacije že zadovoljivo natančnih metod izdelave hidravličnega modela bolj smiselno, da se pozornost usmeri na dodelavo in konkretizacijo še vedno precej ohlapnih pravil za izdelavo analize ranljivosti.

## 5 ZAKLJUČEK

Človekova potreba po varnosti je ena od temeljnih potreb, ki morajo biti zadoščene za njegovo normalno delovanje in enako velja tudi za družbo kot celoto. Iskanje virov nevarnosti ter strmenje k zmanjšanju ogroženosti bivanja je prisotno že od praveka, obenem pa predstavlja eno najmočnejših gibal tehnološkega razvoja civilizacij. Na področju varnosti pred poplavami, s katerimi je človeštvo zaradi sobivanja z vodo tesno povezano že tisočletja, se je zagotavljanje ustrezne stopnje družbene varnosti v preteklosti dosegalo večinoma le s hidrotehničnimi ukrepi, v zadnjih letih pa so se zaradi zavedanja o kompleksnosti, razsežnosti in interdisciplinarnosti problema uveljavili tudi strokovno ustrezni zakonski predpisi, ki v luči preventivnih in trajnostnih načel uvajajo celostno shemo zmanjševanja poplavne ogroženosti. Ta temelji na ustvarjanju ustreznih baz arhivskih podatkov, izmenjavi izkušenj, ozaveščanju javnosti, prognozi poplavnega dogajanja, sistemu obveščanja in mednarodnemu pristopu k zmanjšanju problema.

Evropska unija je z Evropsko poplavno direktivo zasnovala dober in poenoten koncept zmanjšanja poplavne ogroženosti, ki zahteva strokovno podprt in celovit pristop k reševanju problema. V verigi postopkov sistematičnega manjšanja negativnih vplivov celinskih poplavnih voda predstavlja Karta poplavne ogroženosti pomemben in zelo vpliven člen. Ker gre za dokument, ki ima pomembno vlogo pri sprejemanju novih prostorskih načrtov, načrtovanju protipoplavnih ureditev, omejevanju posegov in dejavnosti v ogroženem prostoru in ne nazadnje tudi določanju ekonomske vrednosti zemljišč, je razumljivo, da obstaja velik strokovni, družbeni in ekonomski interes po čim višji natančnosti na karti prikazanih vsebin.

Namen diplomske naloge je bil, s pomočjo analize občutljivosti ugotoviti, s kakšno napako oz. intervalom zaupanja lahko opremimo hidravlične količine, ki so prikazane na kartah poplavne nevarnosti glede na oba kriterija. Nadalje nas je zanimalo tudi, v kakšnem obsegu se omenjena napaka izrazi na karti poplavne ogroženosti. S tem bi lahko objektivno ovrednotili njeno verodostojnost oz. ustreznost obstoječega sistema kartiranja poplavne ogroženosti.

Rezultati analize občutljivosti hidravličnega modela glede na vrsto spremembe vhodnega parametra v splošnem potrjujejo pričakovano smer sprememb opazovanih hidravličnih količin in posledično vsebine karte poplavne ogroženosti, precej manjša od pričakovane pa je velikost teh sprememb. Analiza občutljivosti na konkretnem primeru zato zavrača domnevo o upoštevanja vrednem vplivu spremembe hrapavosti poplavne površine na velikost in razporeditev razredov poplavne ogroženosti in s tem posledično na verodostojnost izdelane karte poplavne ogroženosti.

Izdelava analize občutljivosti je znanstveno področje, kjer se lahko najde potrebe in možnosti za nadaljnje raziskave na področju matematičnega hidravličnega modeliranja. Poleg že omenjene

razširitve diplomske naloge v obliki analize občutljivosti na hrapavost tal na več različnih tipih rečnih odsekov so raziskovalne teme lahko usmerjene v testiranje občutljivosti hidravličnega modela na druge vhodne parametre. Glede na razmerje med pomembnostjo in nedoločljivostjo samega vhodnega parametra bi verjetno dala zanimive rezultate analiza občutljivosti hidravličnega modela na spremembo spodnjega robnega pogoja. Ostale, sicer večinoma že bolj raziskane možnosti, pa so analiza občutljivosti hidravličnih modelov na hidrogram pretoka, na natančnost oz. gostoto topografske mreže, tip hidravličnega modela,...

Čeprav bi ponovitev analize občutljivosti iz diplomske naloge na nekem novem odseku reke v spodnjem toku predvidoma pokazala večjo stopnjo občutljivosti modela na spremembo hidravlične hrapavosti, pa vpliv le-te na verodostojnost karte poplave ogroženosti skoraj gotovo ne bi bil večji od vpliva nenatančnih oz. skopih meril za določanje razredov ranljivosti.

Zaradi slabo dodelanega sistema vrednotenja poplavne ranljivosti so možnosti za nadaljnje raziskave in razvoj na področju izdelovanja kart poplavne ogroženosti oz. *Pravilnika o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda* številne. S pomočjo analize občutljivosti bi bilo na primer zlahka dokazati, da obstoječa, veliko preohlapna merila dopuščajo prevelik subjektivni vpliv izdelovalca analize poplavne ranljivosti na vsebino in končni izgled tako pomembnega dokumenta, kot je karta poplavne ogroženosti. Prav tako se je tekom izdelave diplomske naloge kot področje, potrebno sistematične izboljšave oz. izpopolnitve, izkazala obstoječa metodologija izdelave analize poplavne ranljivosti. Pomanjkanje globljega oz. kompleksnejšega pojmovanja pojma ranljivosti oz. neodpornosti na škodljivo delovanje voda (npr. upoštevanje posrednih in dolgoročnih posledic poplav na prizadetem območju), obenem pa natančnejših, konkretnjših in številčnejših meril za klasifikacijo razredov ranljivosti so namreč lastnosti obstoječe metodologije, ki ji onemogočajo enoumno in realno ovrednotenje poplavne ranljivosti prostora, s tem pa posledično tudi manjšajo možnosti za izdelavo verodostojne karte poplavne ogroženosti.

## VIRI

Agencija RS za okolje. 2012. Seznam vodomernih postaj z nad petletnim delovanjem. [http://www.arso.gov.si/vode/publikacije%20in%20poro%C4%8Dila/bilanca6190\\_4\\_PREGLEDNICE.pdf](http://www.arso.gov.si/vode/publikacije%20in%20poro%C4%8Dila/bilanca6190_4_PREGLEDNICE.pdf) (Pridobljeno 29.4.2012.)

Anzeljc, D., Burja, D., Muck, P., Zupančič, B. 1995. Poplavna ogroženost Slovenije, V: Ujma, Ljubljana, Ministrstvo za obrambo, Uprava RS za zaščito in reševanje. str. 148-155.

Bosnić, Z. 2007. Ocenjevanje zanesljivosti posameznih napovedi z analizo občutljivosti regresijskih modelov, Doktorska disertacija, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko, (Z. Bosnić): 133 str.

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

Brilly, M., Šraj, M. 1999. Vodne ujme: varstvo pred poplavami, erozijo in plazovi. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 186 str.

Brunner, G. W. 2002. HEC-RAS River analysis system hydraulic reference manual. US Army corps of engineers, Hydrologic engineering center. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documents/hydreref/> (Pridobljeno 12.10.2011.)

Chanson, H. 1999. The hydraulics of open channel flow : an introduction basic principles, sediment motion, hydraulic modelling, design of hydraulic structures. London, Arnold: 495 str.

Četina, M., Kryzk, M., Žagar, D. 2004. Dvodimenzijski matematični model tok Malega grabna v Ljubljani. V: 15. Mišičev vodarski dan, zbornik referatov, Maribor : Vodnogospodarski biro: str. 239-246.

Direktiva 2007/60/ES Evropskega parlamenta in Sveta z dne 23. oktobra 2007 o oceni in obvladovanju poplavne ogroženosti

Đurovič, B. 2012. Določitev in razvrstitev poplavno ogroženih območij v Sloveniji, povzetek metode dela in rezultatov, IzVRS, Ljubljana. [http://www.mko.gov.si/fileadmin/mko.gov.si/pageuploads/podrocja/voda/metodologija\\_dolocanja\\_obmocij.pdf](http://www.mko.gov.si/fileadmin/mko.gov.si/pageuploads/podrocja/voda/metodologija_dolocanja_obmocij.pdf) (Pridobljeno 1.3.2013)

European exchange circle on flood mapping. 2007. Atlas of Flood Maps: 183 str. [http://www.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/podrocja/okolje/pdf/vode/atlas\\_primerov\\_kartiranja\\_poplavne\\_nevarnosti\\_ogrozenosti.pdf](http://www.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/podrocja/okolje/pdf/vode/atlas_primerov_kartiranja_poplavne_nevarnosti_ogrozenosti.pdf) (Pridobljeno 15.11.2011.)

European exchange circle on flood mapping, 2007. Handbook on good practices of flood mapping in Europe: 60 str.

[http://ec.europa.eu/environment/water/flood\\_risk/flood\\_atlas/pdf/handbook\\_goodpractice.pdf](http://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/flood_atlas/pdf/handbook_goodpractice.pdf)

(Pridobljeno 25.11.2011.)

Gosar, L., Rak, G., Steinman, F. 2006. Analiza hidravličnih lastnosti vodotokov z uporabo GIS orodja, V: Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2006-2007, Ljubljana: Založba ZRC: str. 123-131.

Gosar, L., Prešeren, T., Kozelj, D., Steinman, F. 2007. Z LIDAR tehnologijo zajeta topografija v hidravličnih analizah vodotokov. Gradbeni vestnik 56, 5: 115-123.

Gosar, A. 2007. Letalsko lasersko skeniranje idrijskega in ravenskega preloma. Ujma 21: 139-144.

Grčar, G. 2009. Poplavna direktiva – opis in način izvajanja v Sloveniji, MOP

[http://www.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/podrocja/okolje/pdf/vode/okvirni\\_program\\_izvajanja\\_poplavne\\_direktive.pdf](http://www.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/podrocja/okolje/pdf/vode/okvirni_program_izvajanja_poplavne_direktive.pdf) (Pridobljeno 10.11.2011)

Hall, J.W., Tarantola, S., Bates, P., and Horritt, M. 2005. Distributed Sensitivity Analysis of Flood Inundation Model Calibration. J. Hydraul. Eng., 131(2): 117–126.

Hojnik, T. 2008. Spletna stran DHD, poglavje O modeliranju. <http://www.dhd.si/model.html>

(Pridobljeno 29.9.2011)

Kozelj, D., Kozelj, K., Steinman, F., Gosar, L. 2008. Poplavna ogroženost in posledice dogodkov preostalega tveganja. Ujma 22: 145-151

Mikoš, M. 2007. Urejanje vodotokov. Skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 201 str.

Mikoš, M. 2009. Osnove hudourništva, varstvo pred hudourniki in zemeljskimi plazovi. Skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 228 str.

Ministrstvo za okolje in prostor. 2007. Zmanjšanje poplavne ogroženosti – PP predstavitev.

[http://www.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/podrocja/okolje/pdf/zmanjsanje\\_poplavne\\_ogrozenosti\\_predstavitev.pdf](http://www.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/podrocja/okolje/pdf/zmanjsanje_poplavne_ogrozenosti_predstavitev.pdf) (Pridobljeno 10.11.2011.)

Ministrstvo za gospodarstvo. 2007. Register kvalificiranih proizvajalcev električne energije.

[http://www.mg.gov.si/fileadmin/mg.gov.si/pageuploads/Energetika/Register\\_KP1.htm](http://www.mg.gov.si/fileadmin/mg.gov.si/pageuploads/Energetika/Register_KP1.htm) (Pridobljeno 5.3.2012.)

- Ministrstvo za kmetijstvo in okolje. 2012. Poročilo o določitvi območij pomembnega vpliva poplav v Republiki Sloveniji in spremljanju aktivnosti obvladovanja poplavne ogroženosti na območjih pomembnega vpliva poplav. [http://www2.gov.si/upv/vladnagradaiva-12.nsf/18a6b9887c33a0bdc12570e50034eb54/5d28300cc594f01cc1257b0400568c69/\\$FILE/Priloga\\_porocilo.pdf](http://www2.gov.si/upv/vladnagradaiva-12.nsf/18a6b9887c33a0bdc12570e50034eb54/5d28300cc594f01cc1257b0400568c69/$FILE/Priloga_porocilo.pdf) (Pridobljeno 1.3.2013.)
- Mlačnik, J., Komare, B. 2003. Vloga hidravličnih modelov v vodarski inženirski praksi. V: 14. Mišičev vodarski dan, zbornik referatov, 15 December 2003. Maribor, Vodnogospodarski biro: p. 172-179.
- Müller, M. 2009. Vpliv zarasti na visokovodne razmere pri hidravličnem modeliranju. Diplomaska naloga. Ljubljana, (M. Müller): 99 f.
- Odlok o razglasitvi kulturnih in zgodovinskih spomenikov v občini Ilirska Bistrica, Uradne objave (Primorske novice), št. 2/93-39. Uradne objave (Snežnik), št. 6/2000-3
- Poslovni register Slovenije. 2008. [www.ajpes.si/prs](http://www.ajpes.si/prs) (Pridobljeno 5.3.2012.)
- Poslovni imenik Bizi. 2008. [www.bizi.si](http://www.bizi.si) (Pridobljeno 9.3.2012.)
- Prašnikar, J., Domadenik, P., Koman, M. 2008. Mikroekonomija. Ljubljana, Gospodarski vestnik: 336 str.
- Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti UL RS št. 60/07: 3216
- Predstavitev reke Reke. 2006. <http://www.burger.si/QTVR/Jame/SkocjanskeJame/Reka/seznam.html> (Pridobljeno 25.1.2012)
- Predstavitvena brošura Leica Distometer Special 5. [http://ptd.leica-geosystems.com/downloads123/cp/disto/special5/manuals/Disto\\_Spezial\\_en.pdf](http://ptd.leica-geosystems.com/downloads123/cp/disto/special5/manuals/Disto_Spezial_en.pdf) (Pridobljeno 24. 4. 2012.)
- Rak, G. 2006. Uporaba prostorskih podatkov v analizi hidravličnih lastnosti vodotokov. Diplomaska naloga. Ljubljana, (G. Rak): 86 f.
- Rak, G., Gosar, L., Steinman, F. 2006. Uporaba LIDAR posnetkov v povezavi GIS in hidravličnega modela. V: 17. Mišičev vodarski dan, zbornik referatov, 14 December 2006. Maribor : Vodnogospodarski biro: p. 108-114.
- Rak, G., Müller, M., Šantl, S., Steinman, F. 2011. Uporaba hibridnega hidravličnega modeliranja pri načrtovanju bodoče HE Brežice. V: 22. Mišičev vodarski dan, zbornik referatov, 6 December 2011. Maribor: Vodnogospodarski biro: p. 193-202.



Rak, G., Steinman, F., Gosar, L. 2008. Kartiranje poplavno ogroženih območij v skladu z novo zakonodajo v Sloveniji. V: Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2007-2008, Ljubljana: Založba ZRC: 107-116.

Register nepremičnin kulturne dediščine. 2012. <http://giskds.situla.org/giskd/> (Pridobljeno 5.3.2012)

Spletna stran LIDAR UK. 2008. <http://www.lidar-uk.com> (Pridobljeno 29.9.2011.)

Spletna stran DHI. 2011. Poglavje Mike Flood.

<http://www.mikebydhi.com/Products/WaterResources/MIKEFLOOD.aspx> (Pridobljeno 15.11.2011)

Spletna stran Geopedia. 2011. <http://www.geopedia.si/> (Pridobljeno 6.12.2011.)

Spletna stran KSH. 1998. Projekt Eksperimentalno porečje reke Reke. <http://ksh.fgg.uni-lj.si/RekaSLO/index.htm> (Pridobljeno 24.1.2012)

Statistični urad Republike Slovenije. 2012. [www.stat.si](http://www.stat.si) (Pridobljeno 5.3.2012.)

Steinman, F. 1999. Hidravlika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 295 str.

Šantl, S., Rak, G. 2010. Analiza poplavne nevarnosti in odtočnega režima, uporaba različnih tipov hidravličnih modelov. Gradbeni vestnik 59, 6: 147-156.

Šumrada, R. 2005. Tehnologija GIS. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 330 str.

Šumrada, R. 2005. Strukture podatkov in prostorske analize. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 284 str.

Uredba o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja UL RS št. 89/08: 3807

Vošnjak, S. 2002. Laboratorijske meritve hidrodinamičnih veličin za umerjanje 2D mat. modelov. Diplomsko delo. Ljubljana, (S. Vošnjak): 89 f.

Zakon o vodah (ZV-1). UL RS št. 62/2002



## PRILOGA A: PREGLEDNICA MANNINGOVIH KOEFICIENTOV ZA NARAVNE VODOTOKE

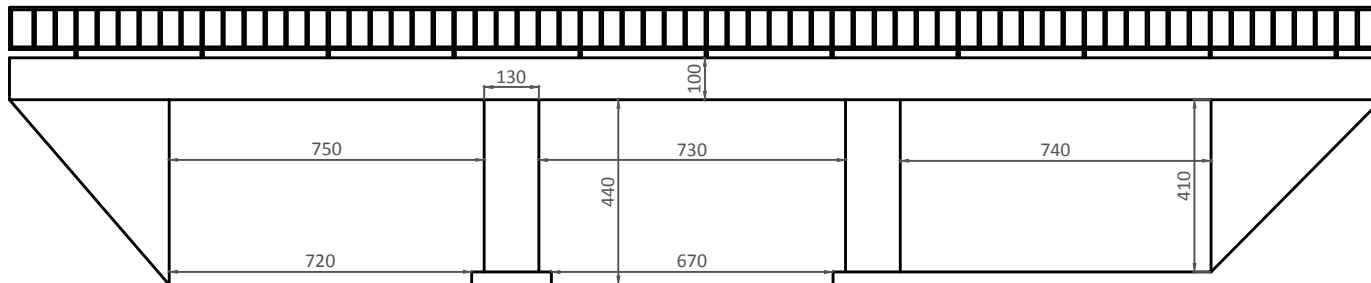
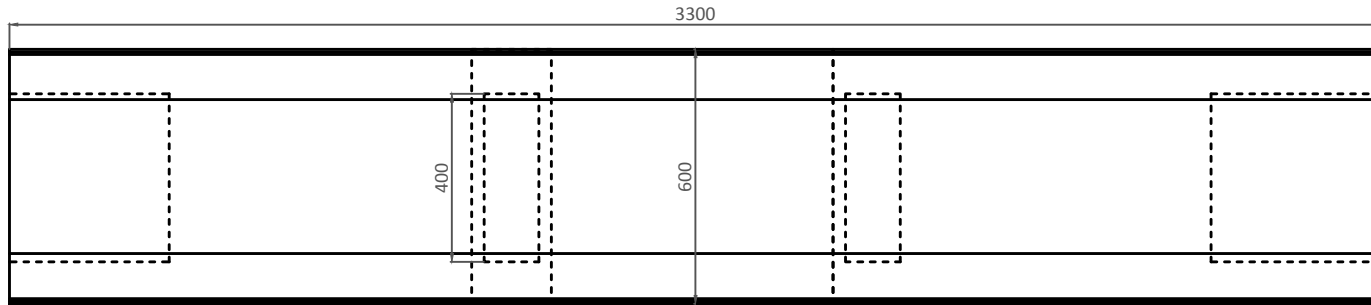
VRSTA IN OPIS KANALA IN POPLAVNIH POVRŠIN	Minimalno	Običajno	Maksimalno
<i>Naravni vodotoki</i>			
<u>1. Rečno korito</u>			
a. Čisto, ravno, polno in brez tolmunov	0.025	0.03	0.033
b. Enako, kot zgoraj, s kamenjem in zarast	0.03	0.035	0.04
c. Vijugast, čist kanal s tolmoni in prodom	0.033	0.04	0.045
d. Enako, kot "c" s kamenjem in pleveli	0.035	0.045	0.05
e. Enako, kot "d" z manjšim padcem in nižjo gladino	0.04	0.048	0.055
f. Podobno kot "d" z večjo količino kamenja	0.045	0.05	0.06
g. Počasni ravni del, z večjo količino pleveli in tolmunov	0.05	0.07	0.08
h. Korito močnejše poraščeno s plevelom in z globokimi tolmoni oziroma gosteje zaraščene poplavne poti	0.075	0.1	0.15
i. Gorski vodotok (strme brežin, brez zarasti) s peščenim ali prodnatim dnom	0.03	0.04	0.05
j. Enako kot "i" z večjimi skalami v koritu	0.04	0.05	0.07
<u>2. Poplavne površine</u>			
a) Travniki brez grmičevja			
1. Nizka pokošena trava	0.025	0.03	0.035
2. Visoka trava	0.03	0.035	0.05
b) Obdelovalne površine			
1. Brez rastlinja	0.02	0.03	0.04
2. Zreli, v vrstah gojeni pridelki	0.025	0.035	0.45
3. Zreli, po vsej površini gojeni pridelki	0.03	0.04	0.05
c) Grmičevje			
1. Posamezni grmi, goste pleveli	0.035	0.05	0.07
2. Redko grmičevje in drevje brez listja (pozimi)	0.035	0.05	0.06
3. Redko grmičevje in drevje z listjem (poleti)	0.04	0.06	0.08
4. Srednje gosto grmičevje in drevje brez listja (pozimi)	0.045	0.7	0.11
5. Srednje gosto grmičevje in drevje z listjem (poleti)	0.07	0.1	0.16
d) Drevje			
1. Čistina z drevesnimi štori in brez mladik	0.03	0.04	0.08
2. Čistina z drevesnimi štori in gostimi mladikami	0.05	0.06	0.12
2. Gostejši gozdovi z malo podrtimi drevesi, podrasti z gladino pod krošnjami dreves	0.08	0.1	0.16
3. Enako kot c., le da nivo vode sega do krošenj	0.1	0.12	0.16
4. Gost gozd z listjem (poleti)	0.11	0.15	0.2

vir: Brunner, 2002

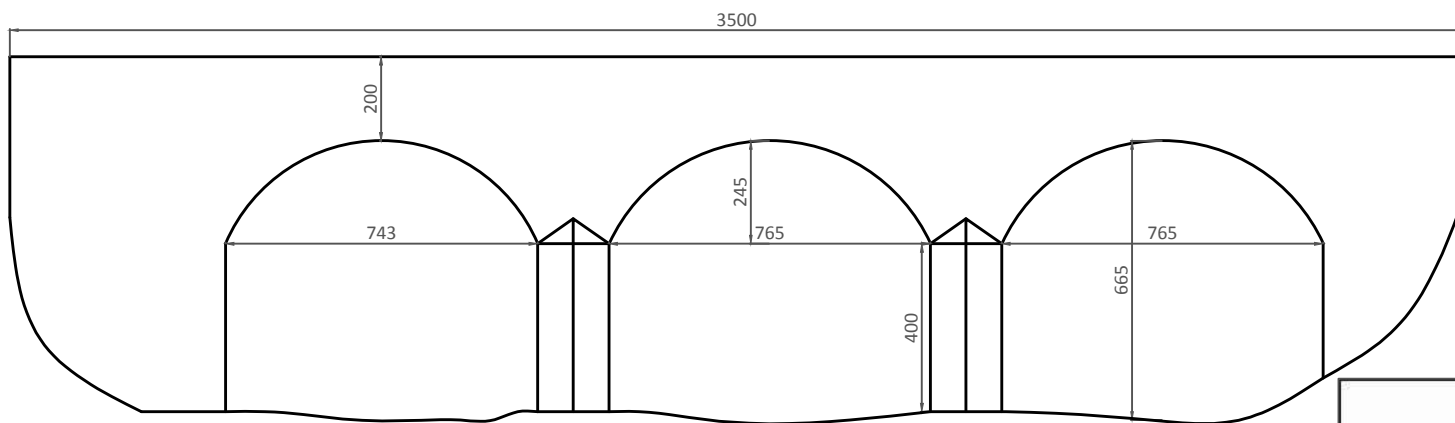
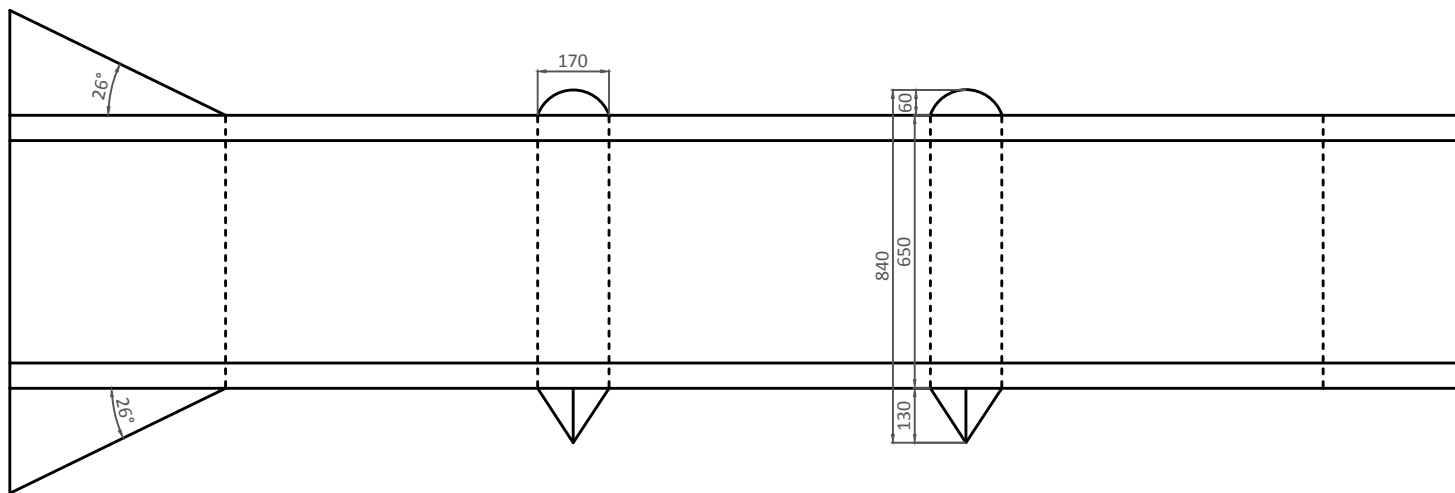
**PRILOGA B: MERILA ZA DOLOČITEV RAZREDOV RANLJIVOSTI**

RAZRED	ELEMENTI OGROŽENOSTI
Zelo majhna ranljivost	gostota prebivalcev: do 10 na km <sup>2</sup>
	manjši obrati gospodarskih in negospodarskih dejavnosti lokalnega pomena
	občutljivi objekti
Majhna ranljivost	gostota prebivalcev: od 11 do 100 na km <sup>2</sup>
	obradi gospodarskih in negospodarskih dejavnosti lokalnega pomena
	občutljivi objekti
	kulturna dediščina lokalnega pomena
	območja s posebnimi zahtevami po predpisih, ki določajo način priprave načrtov upravljanja voda
Srednja ranljivost	gostota prebivalcev: od 101 do 300 na km <sup>2</sup>
	obradi gospodarskih in negospodarskih dejavnosti, pomembni za celotno samoupravno lokalno skupnost
	občutljivi objekti
	obradi in naprave, zaradi katerih lahko pride do onesnaženja
	območja s posebnimi zahtevami po predpisih, ki določajo način priprave načrtov upravljanja voda
	kulturna dediščina regionalnega pomena
Velika ranljivost	gostota prebivalcev: več kot 500 na km <sup>2</sup>
	obradi gospodarskih in negospodarskih dejavnosti državnega pomena
	obradi in naprave, zaradi katerih lahko pride do onesnaženja velikega obsega, še posebej v povezavi z območji z gostoto prebivalcev od 101 do 500 na km <sup>2</sup> ali z območji s posebnimi zahtevami po predpisih, ki določajo način priprave načrtov upravljanja voda
	kulturna dediščina državnega oziroma svetovnega pomena
	občutljivi objekti

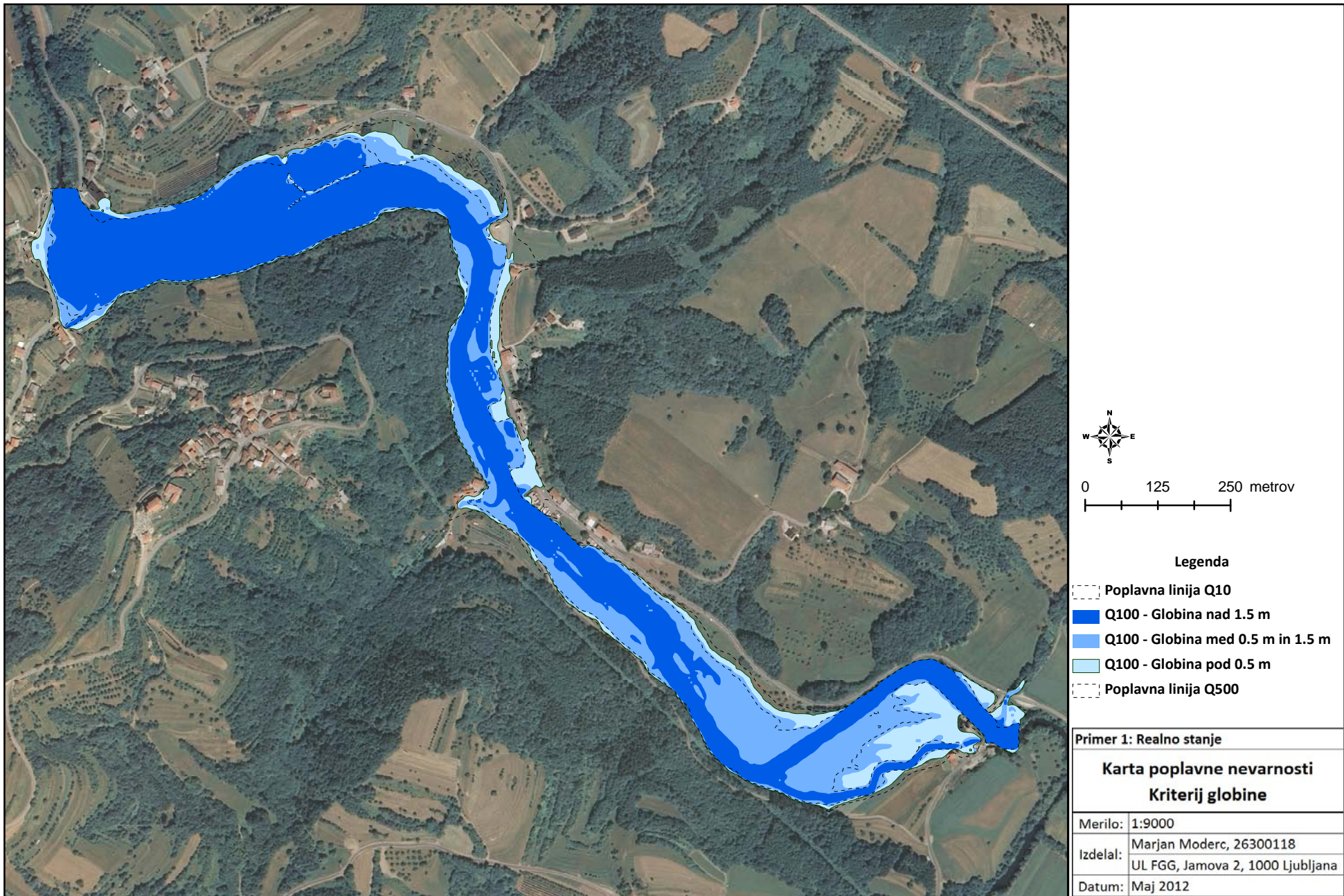
vir: Pravilnik o metodologiji..., 2007

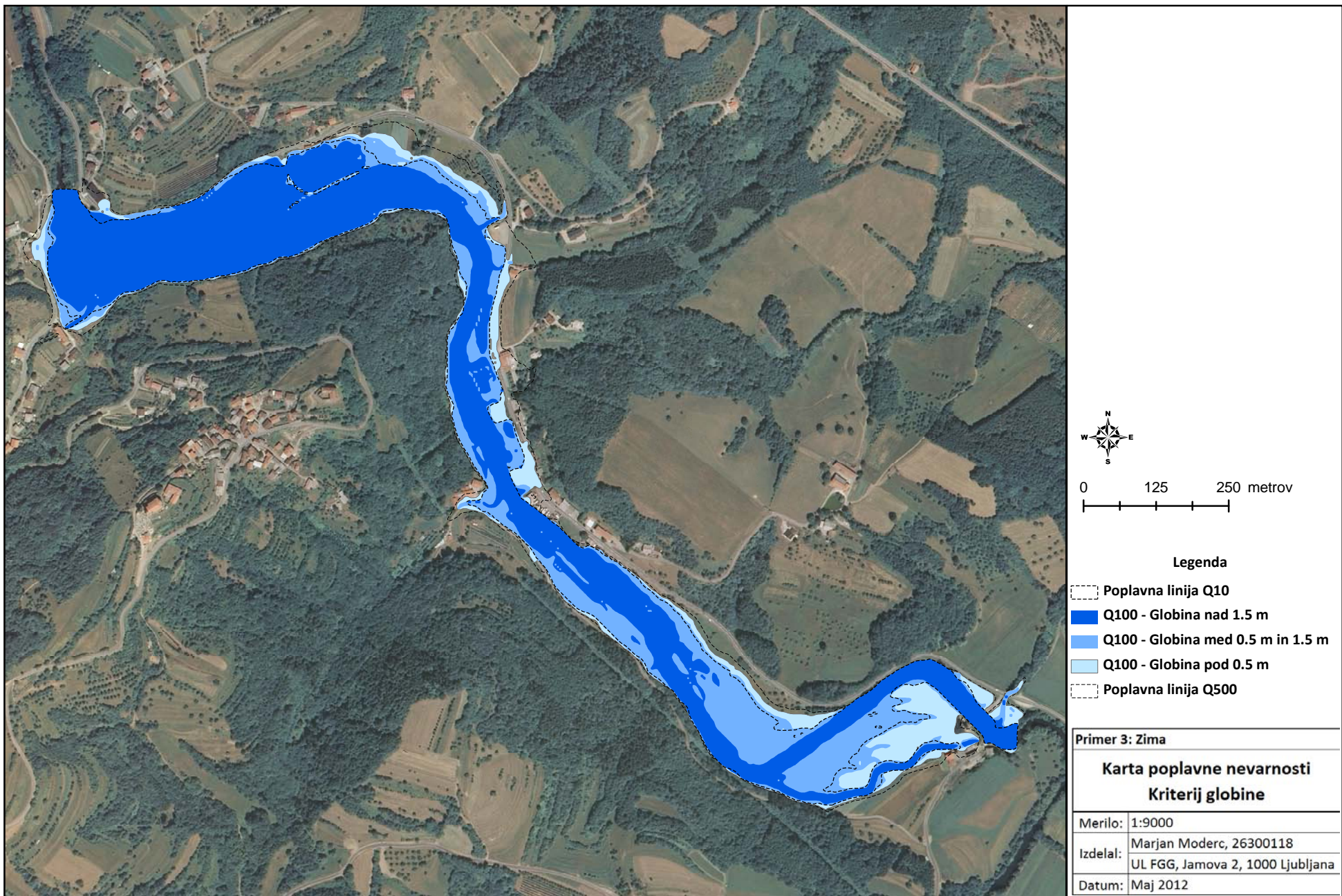


Most 1	
Smrje	
Merilo:	1:180 enote v [cm]
Izdela:	Marjan Moderc, 26300118 UL FGG, Jamova 2, 1000 Ljubljana
Datum:	Maj 2012

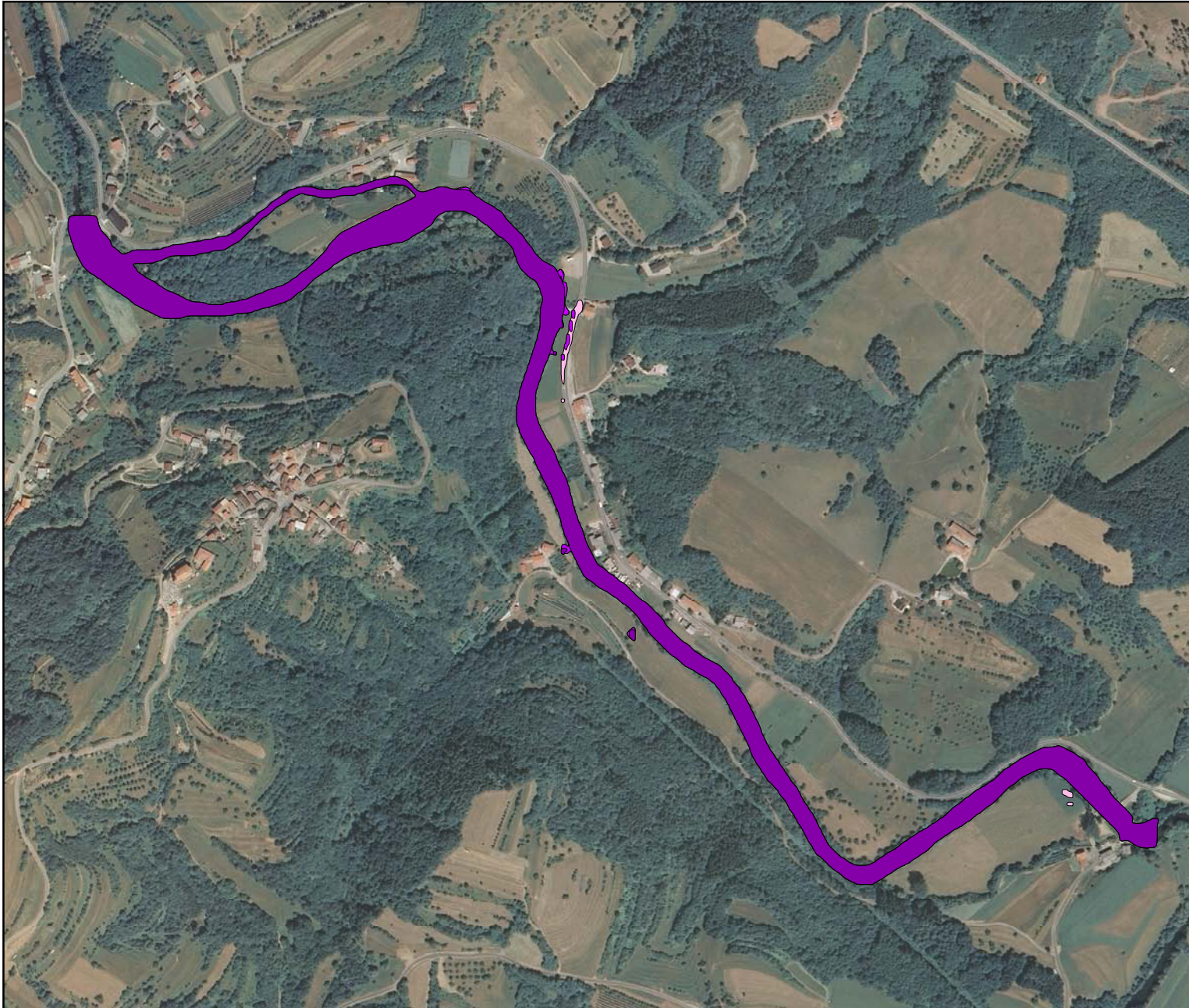


Most 2 Dolnja Bitnja		
Merilo:	1:180	enote v [cm]
Izdela:	Marjan Moderc, 26300118 UL FGG, Jamova 2, 1000 Ljubljana	
Datum:	Maj 2012.	












0 125 250 metrov

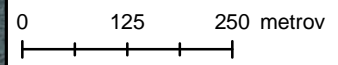
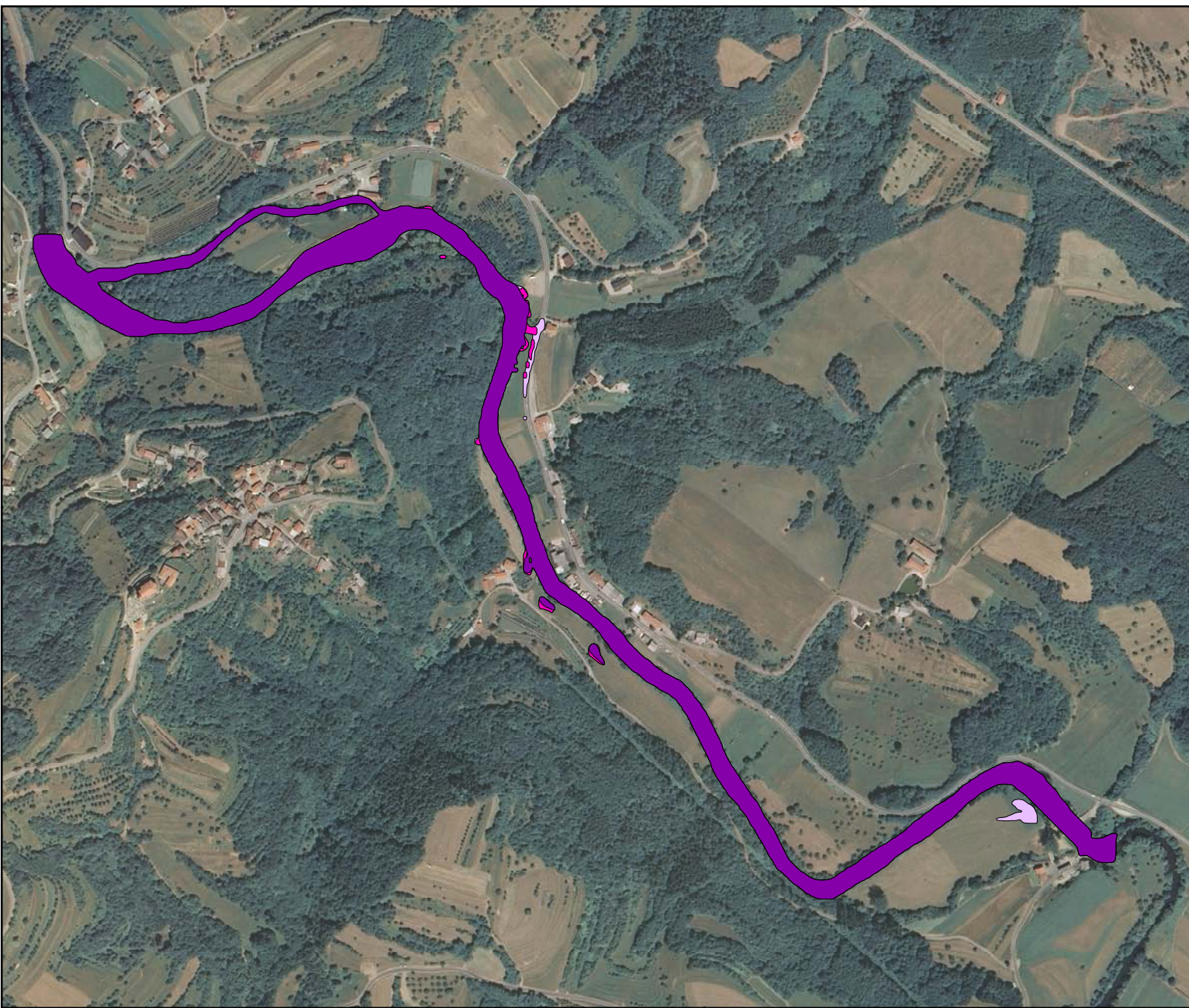
**Legenda**

-  Q100 - Globina\*hitrost nad 1.5 m<sup>2</sup>/s
-  Q100 - Globina\*hitrost med 0.5 m<sup>2</sup>/s in 1.5 m<sup>2</sup>/s
-  Q100 - Globina\*hitrost pod 0.5 m<sup>2</sup>/s

**Primer 1: Realno stanje**

**Karta poplavne nevarnosti  
Kriterij gibalne količine**

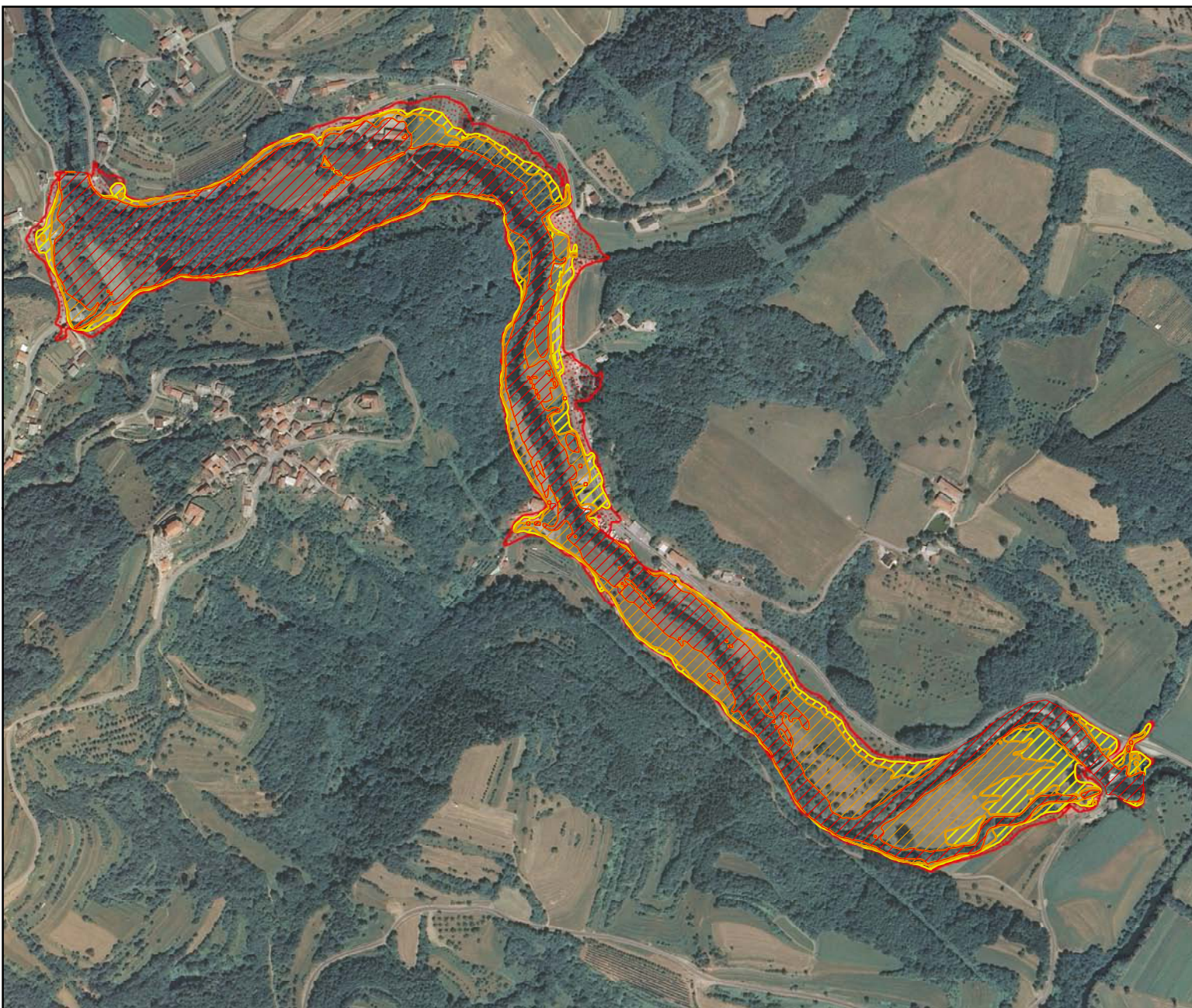
Merilo:	1:9000
Izdelal:	Marjan Moderc, 26300118
Datum:	Maj 2012



Legenda





- Q100 - globina\*hitrost nad 1.5 m2/s
- Q100 - globina\*hitrost med 0.5 m2/s in 1.5 m2/s
- Q100 - globina\*hitrost pod 0.5 m2/s

Primer 3: Zima	
Karta poplavne nevarnosti	
Kriterij: gibalna količina	
Merilo:	1:9000
Izdelal:	Marjan Moderc, 26300118
	UL FGG, Jamova 2, 1000 Ljubljana
Datum:	Maj 2012



0 125 250 metrov

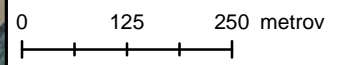
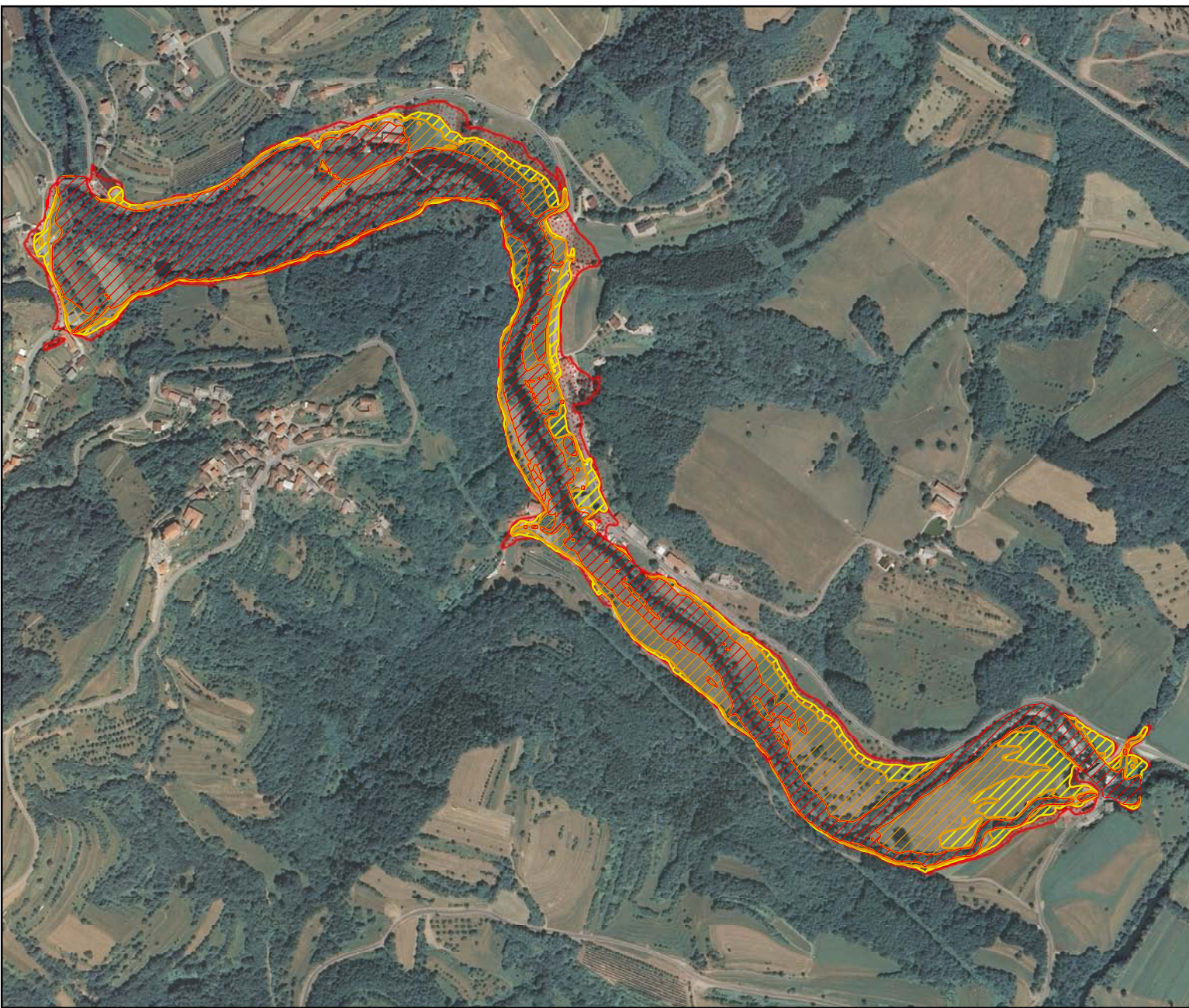
**Legenda**

-  Območje velike nevarnosti
-  Območje srednje nevarnosti
-  Območje majhne nevarnosti
-  Območje preostale nevarnosti





Primer 1: Realno stanje

**Karta razredov poplavne nevarnosti**

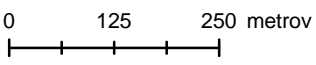
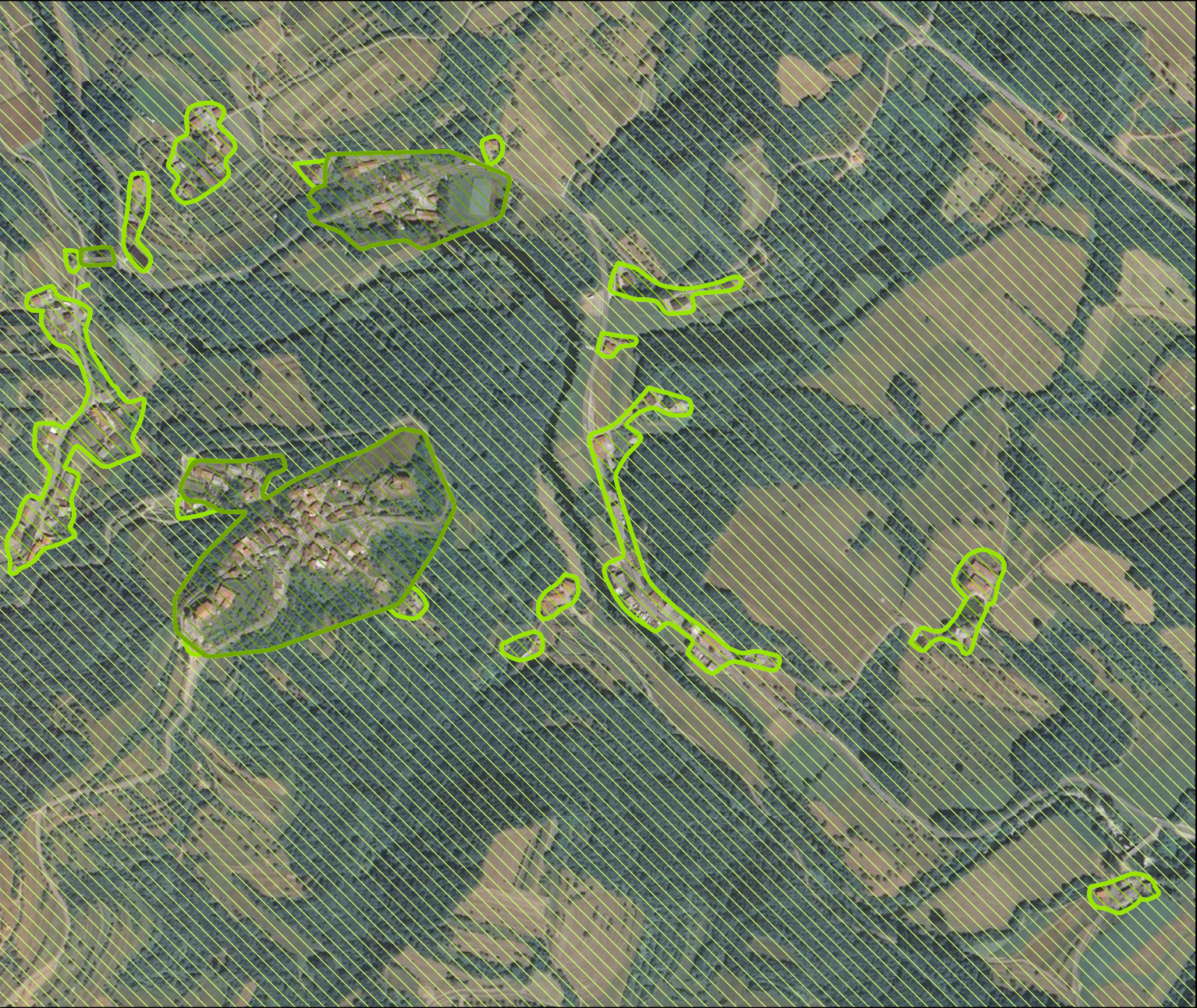
Merilo:	1:9000
Izdela:	Marjan Moder, 26300118
	UL FGG, Jamova 2, 1000 Ljubljana
Datum:	Maj 2012






Legenda

-  Območje velike nevarnosti
-  Območje srednje nevarnosti
-  Območje majhne nevarnosti
-  Območje preostale nevarnosti

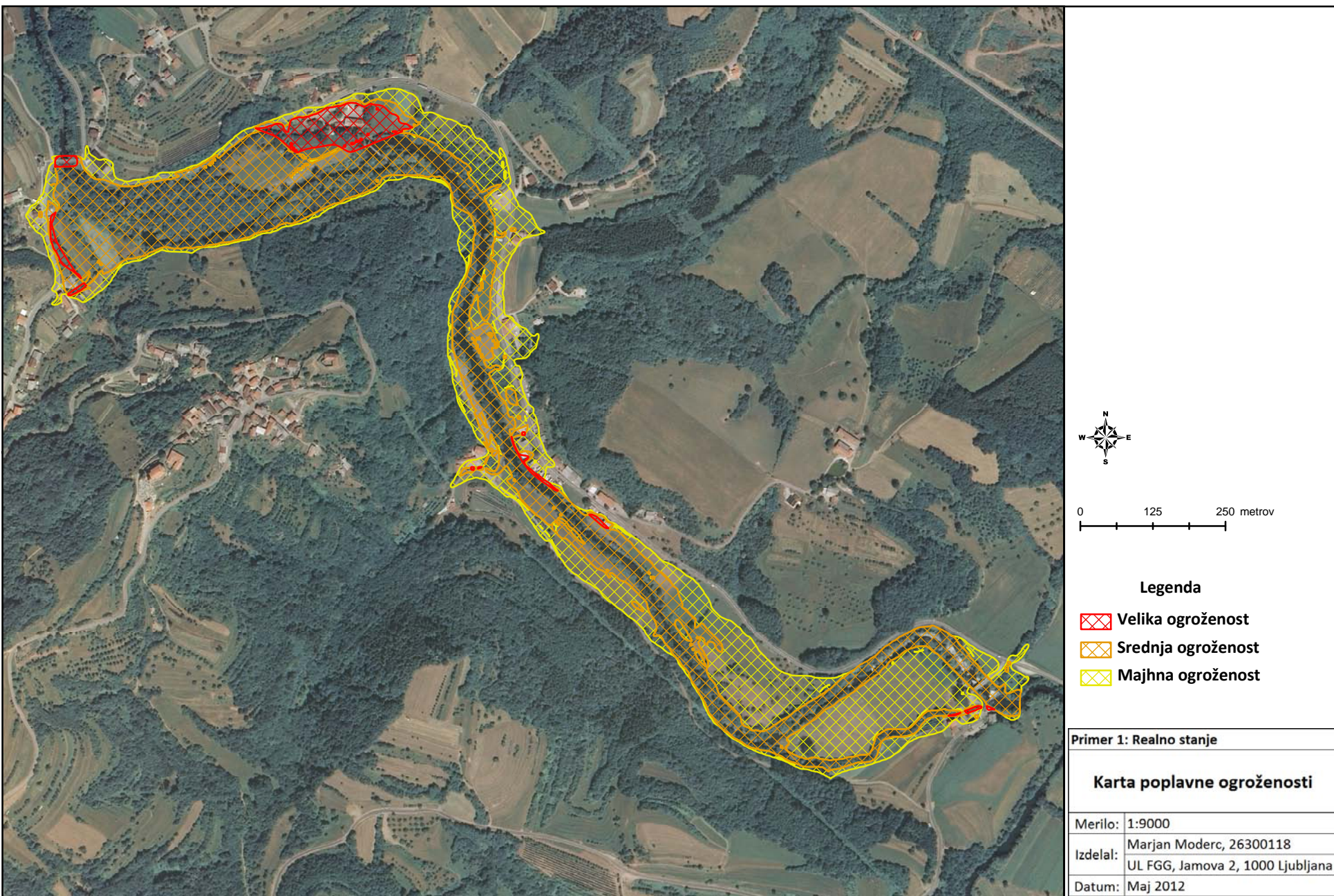
<b>Primer 3: Zima</b>	
<b>Karta poplavne nevarnosti</b>	
<b>Kriterij: gibalna količina</b>	
Merilo:	1:9000
Izdelal:	Marjan Moderc, 26300118
	UL FGG, Jamova 2, 1000 Ljubljana
Datum:	Maj 2012

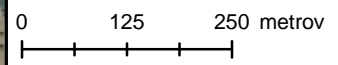
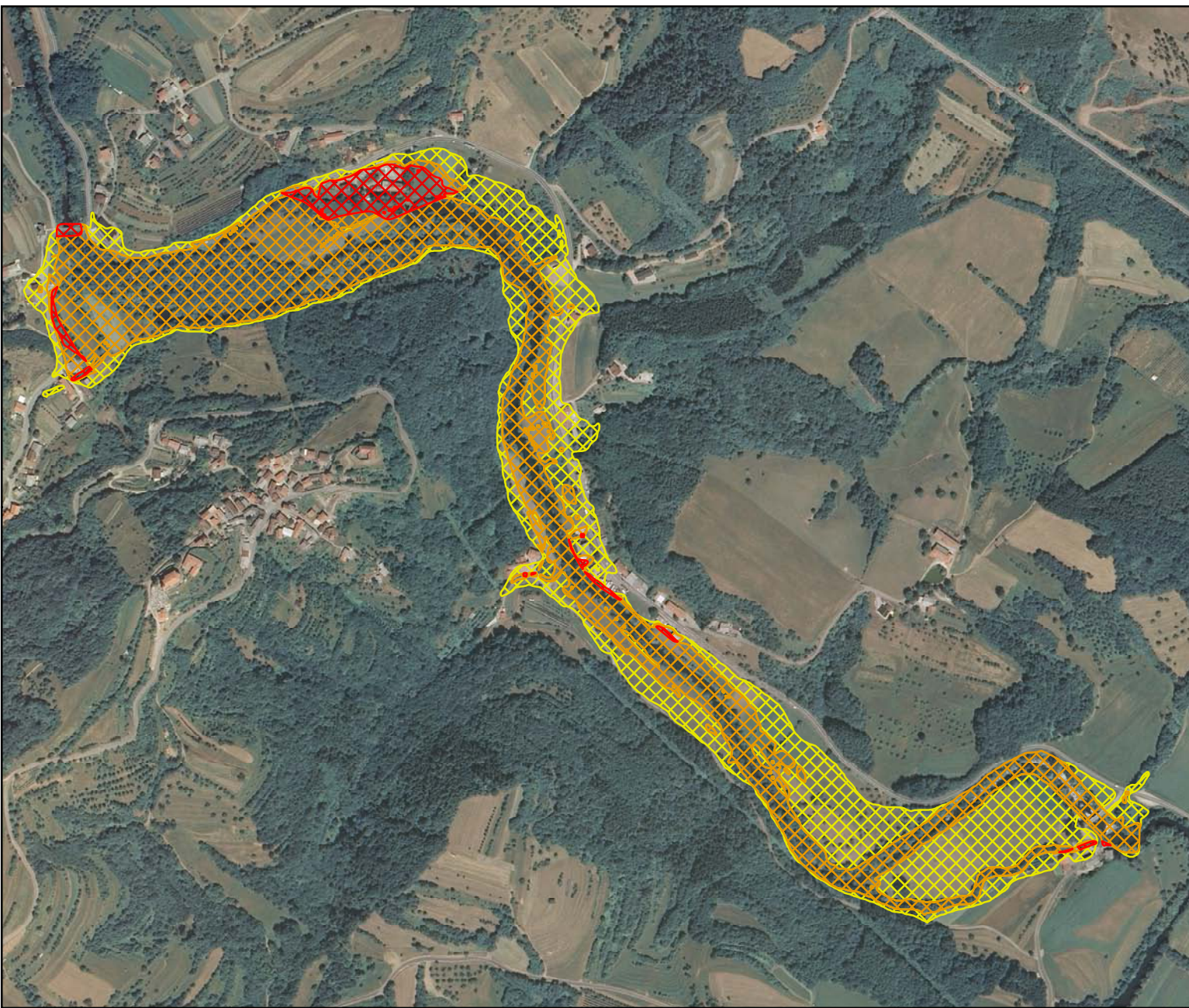


Legenda




-  Srednja ranljivost
-  Majhna ranljivost
-  Zelo majhna ranljivost

<b>Primer 1: Realno stanje</b>	
<b>Analiza ranljivosti</b>	
Merilo:	1:9000
Izdelal:	Marjan Moderc, 26300118 UL FGG, Jamova 2, 1000 Ljubljana
Datum:	Maj 2012





Legenda

-  Velika ogroženost
-  Srednja ogroženost
-  Majhna ogroženost

Primer 3: Zima	
<b>Karta poplavne ogroženosti</b>	
Merilo:	1:9000
Izdela:	Marjan Moderc, 26300118 UL FGG, Jamova 2, 1000 Ljubljana
Datum:	Maj 2012