

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:

Grobljar, S., 2016. Modeliranje odtočnih razmer na poplavnih urbanih površinah. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Steinman, F., somentor Rak, G.): 68 str.

Datum arhiviranja: 13-07-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Grobljar, S., 2016. Modeliranje odtočnih razmer na poplavnih urbanih površinah. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Steinman, F., co-supervisor Rak, G.): 68 pp.

Archiving Date: 13-07-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
HIDROTEHNIČNA SMER

Kandidatka:

SARA GROBLJAR

**MODELIRANJE ODTOČNIH RAZMER NA POPLAVNIH
URBANIH POVRŠINAH**

Diplomska naloga št.: 3470/HS

FLOOD MODELLING IN URBAN AREAS

Graduation thesis No.: 3470/HS

Mentor:

prof. dr. Franc Steinman

Somentor:

viš. pred. mag. Gašper Rak

Ljubljana, 04. 07. 2016

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Spodaj podpisana študentka **GROBLJAR SARA**, vpisna številka 26108075, avtorica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: »**MODELIRANJE ODTOČNIH RAZMER NA POPLAVNIH URBANIH POVRŠINAH**«

IZJAVLJAM

1. Obkrožite eno od variant a) ali b)

a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;

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

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

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

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

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

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

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

V/Na: _____

Datum: _____

Podpis študentke: _____

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	556.536:627.132(497.4)(043.2)
Avtor:	Sara Grobljar
Mentor:	prof. dr. Franc Steinman
Somentor:	viš. pred. mag. Gašper Rak
Naslov:	Modeliranje odtočnih razmer na poplavnih urbanih površinah
Tip dokumenta:	diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	68 str., 17 pregl., 47 sl., 19 en., 5 pril.
Ključne besede:	dvodimenzijsko hidravlično modeliranje, urbane površine, porušitev protipoplavnega zidu, HEC-RAS 5.0, upoštevanje objektov

IZVLEČEK

V urbanih območjih so posledice poplav večje kot v ruralnih območjih, saj je verjetnost ogrožanja človeških življenj in lastnine večja. Zato je potreba po hidravličnih modelih, ki predvidijo smeri poplavljanja ob teh ujmah, velika. Objekti, kot so na primer stavbe in zidovi, predstavljajo ovire v toku, ki bistveno vplivajo na potek vodnega polja in jih je zato treba upoštevati v hidravličnih modelih. V tej nalogi bosta primerjana dva različna načina upoštevanja objektov v hidravličnih matematičnih 2D modelih. Prvi upošteva objekte s povišanjem hidravlične hrapavosti, drugi pa z nadvišanjem terena v digitalnem modelu terena na lokaciji stavb. Za namen te naloge je bil narejen enoten 2D hidravlični model reke ter mesta, ki je pred visokimi vodostaji zaščiten s protipoplavnim zidom. Scenarij predpostavlja, da se del betonskega zidu poruši, voda pa se razliva po ravninskem delu mesta. Uporabljen je bil program HEC-RAS 5.0., ki omogoča upoštevanje detajlov topografije pod vsako računsko celico. Narejena je bila analiza občutljivosti modela na velikost računske mreže, ki bistveno vpliva na rezultate hidravličnega modela. Vpliv načina upoštevanja objektov, ter velikosti računskih celic na odtočne razmere in poplavno nevarnost znotraj obravnavanega območja je bil preverjen s primerjanjem rezultatov globin in hitrosti vodnega toka, obsega poplavljenosti, razredov poplavne nevarnosti itd. Vpliv teh parametrov je bil preverjen tudi na časovni zamik v potovanju poplavnih voda vzdolž urbanega območja.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 556.536:627.132(497.4)(043.2)
Author: Sara Grobljar
Supervisor: Prof. Franc Steinman, Ph.D.
Co-advisor: Sen. Lect. Gašper Rak, M.Sc.
Document type: Graduation Thesis – University studies
Title: Flood modelling in urban areas
Notes: 68 p., 17 tab., 47 fig., 19 eq., 5 ann.
Key words: two-dimensional hydrodynamic model, urban areas, dam-break, HEC-RAS 5.0, modelling obstacles

ABSTRACT

In urban areas, the impact of flooding is significantly greater compared to rural environments, as the chance of property damage and loss of life is higher. Therefore, there is a great need for hydraulic models, which can predict flooding direction when these natural disasters occur. Structural elements (e.g. buildings, walls) represent obstacles in the flow, which considerably affect the course of the water flow and should be taken into account in the hydraulic models. In this thesis, we compared two different ways to take account of the structural elements in 2D hydraulic mathematical models. The first approach models buildings with a high hydraulic roughness coefficient for building footprints, while the second approach includes buildings in a digital terrain model at their locations. A 2D hydraulic model of the river and a city was made. There is a floodwall protecting the city and the scenario assumes that a part of the concrete wall collapses and the water spills into the city. The case study was made using HEC-RAS 5.0., which uses high-resolution topographic data to develop explicit parameterization of sub-grid-scale topography. A sensitivity analysis was made as it is important to determine the effect of the cell size of the numerical mesh. The impact of cell size and the approach of modelling obstacles was checked by indicators, such as water depth, velocity of the water current, extent of flooded areas, etc. The impact of these parameters was also checked by comparing the duration of flood propagation along the urban area.

ZAHVALA

Najlepše bi se zahvalila prof. Francu Steinmanu ter somentorju Gašperju Raku za strokovno pomoč, motivacijo ter potrpežljivost pri nastajanju te diplomske naloge.

Zahvaljujem se tudi svoji družini za moralno in finančno podporo v času mojega študija.

KAZALO

Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček	I
Bibliographic-documentalistic information and abstract	II
Zahvala	III
1 UVOD	1
1.1 NAMEN DIPLOMSKE NALOGE	1
1.2 STRUKTURA DELA.....	2
2 TEORETIČNA IZHODIŠČA	3
2.1 Hidravlika toka s prosto gladino.....	3
2.1.1 Osnovne enačbe.....	3
2.1.1.1 Kontinuitetna enačba (zakon o ohranitvi mase)	3
2.1.1.2 Navier-Stokesova dinamična enačba (zakon o ohranitvi gibalne količine).....	4
2.1.1.3 Energijska enačba (zakon o ohranitvi energije).....	4
2.1.2 Globinsko povprečne enačbe (Shallow water equations)	5
2.1.3 Poenostavitev globinsko povprečenih enačb (Diffusion Wave Equations).....	8
2.1.4 Upoštevanje topografije pod računskimi celicami v HEC-RAS 5.0	9
2.2 HIDRAVLIČNO MODELIRANJE	10
2.2.1 Faze hidravličnega modeliranja.....	10
2.2.2 Izbira hidravličnega modela	12
2.2.3 Hidrološki podatki	14
2.2.3.1 Hidrometrija	14
2.2.3.2 Hidravlični robni, notranji in začetni pogoji.....	15
2.2.4 Geometrija obravnavanega območja	16
2.2.4.1 Geometrija struge	16
2.2.4.2 Geometrija poplavnih površin	17
2.2.4.3 Izdelava numerične geometrije modela	18
2.3 GIS TEHNOLOGIJA V HIDRAVLIČNEM MODELIRANJU	19
2.4 LOKALNE IN TRENJSKE ENERGIJSKE IZGUBE	21
2.4.1 Hidravlična hrapavost.....	21
2.4.2 Lokalne izgube kot posledice topografije, batimetrije in objektov z lokalnim vplivom ...	22
2.5 OPIS UPORABLJENEGA NUMERIČNEGA MODELA – HEC RAS 5.0	23
2.6 NEGOTOVOST PRI HIDRAVLIČNEM MODELIRANJU.....	23
2.7 POSTOPEK IZDELAVE KARTE POPLAVNE NEVARNOSTI	24
3 VPLIV UPOŠTEVANJA OBJEKTOV V NASELJU NA REZULTATE HIDRAVLIČNEGA MODELA ODSEKA REKE MURE	26
3.1 OPIS OBRAVNAVANEGA OBMOČJA	26
3.2 IZDELAVA HIDRAVLIČNEGA MODELA.....	27
3.2.1 Topografija območja.....	27
3.2.1.1 Pridobitev podatkov.....	27

3.2.1.2	Priprava topografskih podatkov	28
3.2.2	Raba površin in določanje hidravlične hrapavosti.....	30
3.2.3	Ustvarjanje 2D računske mreže v HEC RAS 5.0	31
3.2.4	Hidrotehnični objekti.....	32
3.2.5	Začetni pogoj – projektni pretoki	35
3.2.6	Spodnji robni pogoj.....	35
3.2.7	Umerjanje modela	35
3.3	IZDELAVA ANALIZ OBČUTLJIVOSTI ZA RAZLIČNE PARAMETRE.....	38
3.4	KARTA POPLAVNE NEVARNOSTI.....	39
4	PRIKAZ IN ANALIZA REZULTATOV.....	40
4.1	VPLIV VELIKOSTI RAČUNSKE MREŽE NA REZULTATE	42
4.1.1	Vpliv velikosti računske mreže na obseg poplave	43
4.1.2	Vpliv velikosti računske mreže na hitrost poplavne vode.....	44
4.1.3	Vpliv velikosti računske mreže na razrede poplavne nevarnosti	45
4.2	VPLIV UPOŠTEVANJA STANOVANJSKIH OBJEKTOV S POVIŠANIM MANNINGOVIM KOEFIČIENTOM ALI Z VIŠINAMI OBJEKTOV NA REZULTATE MODELIRANJA.....	46
4.2.1	Vpliv upoštevanja stanovanjskih objektov s povišanim Manningovim koeficientom ali z višinami objektov na obseg poplave.....	46
4.2.2	Vpliv upoštevanja stanovanjskih objektov s povišanim Manningovim koeficientom ali z višinami objektov na hitrost poplavne vode	47
4.2.3	Vpliv upoštevanja stanovanjskih objektov s povišanim Manningovim koeficientom ali z višinami objektov na razrede poplavne nevarnosti.....	48
4.3	VPLIV OBLIKE MREŽE NA REZULTATE.....	49
4.3.1	Vpliv oblike mreže na obseg poplave	50
4.3.2	Vpliv oblike mreže na hitrost poplavne vode.....	50
4.3.3	Vpliv oblike mreže na razrede poplavne nevarnosti	51
4.4	VPLIV MANNINGOVEGA KOEFICIENTA N_G NA CELOTNEM OBMOČJU URBANIH POVRŠIN (OBJEKTI IZVZETI) NA OBSEG, GLOBINE, HITROSTI TER RAZREDE POPLAVNE NEVARNOSTI	52
4.5	VPLIV PARAMETROV NA ŠIRJENJE POPLAVLJANJA ZNOTRAJ URBANEGA OBMOČJA	54
4.6	SKUPNE UGOTOVITVE.....	59
5	ZAKLJUČEK.....	62
VIRI.....		64
PRILOGE		68

KAZALO SLIK

Slika 1: Na desni grafičen prikaz podatkov o terenu na mejni ploskvi celice (face cell), na levi pa razmerje višine vodne gladine in površine A_k (H).	7
Slika 2: Računska mreža s podrobnim opisom topografije pod njo (Brunner, 2014).	9
Slika 3: Poln 2D numerični model, kjer 2D celice pokrivajo celotno obravnavano območje.	13
Slika 4: Vodomerne postaja s poševnim vodomernim trakom in vertikalno merilno lato za merjenje visokih vodostajev (ARSO, 2015).	14
Slika 5: Idejna zasnova vodomerne postaje Vir pri Domžalah (projektna dokumentacija Eprojekt d.o.o.).	15
Slika 6: Meritve prečnega profila Save z ultrazvočnim globinomerom SonarMite (Grangeo d.o.o., 2011).	17
Slika 7: Simboličen prikaz snemanja z LIDAR tehnologijo (Čekada M. T., 2010, str. 184).	18
Slika 8: Primer digitalnega modela terena s TIN mrežo na levi, na desni 3D pogled na raster digitalnega modela višin z različno velikostjo celic (Scientific Software Group, 2016; Warner T., 2014).	20
Slika 9: Raziskava Manningovih koeficientov v območju stavb in dreves (Karvononen, Hepojoki, et al. 2000, RESCDAM, 2000 Appendix 2: strani 19 in 43).	22
Slika 10: Legenda oznak na karti poplavne in erozijske nevarnosti pri pretoku Q100 (Pravilnik, 2007, priloga C).	25
Slika 11: Lokacija obravnavanega območja in izbrano mesto porušitve zidu.	26
Slika 12: Porazdelitev gostote točk OTR v bloku B24 (Geodetski inštitut Slovenije, 2014, str. 19).	28
Slika 13: Ortofoto(levo) in DMT(desno) iz višinskih točk obravnavanega območja.	29
Slika 14: Postopek kreiranja kombinacije rastra tal in rastra objektov.	29
Slika 15: Raba tal na območju Gornje Radgone.	30
Slika 16: Preprosta mreža na levi in natančna, zgoščena mreža ob objektih na desni risb.	32
Slika 17: VP Gornja Radgona I in odprtina za dostop k strugi, ki se ob visokih vodah zatesni (foto: UL FGG, 2014).	33
Slika 18: Primerjava globine in hitrosti v točki 1 pri prelivu, če uporabimo različni način računanja toka preko preliva, temno modra je izračun pri Normal 2D equation, svetlo modra pa pri enačbi preliva.	33
Slika 19: Pogovorno okno za vnašanje podatkov o dogajanju, ko se zgodi porušitev betonskega zidu.	34
Slika 20: Potek tokovnic ob zidu v naselju, ki je postavljen prečno na porušeni del protipoplavnega zidu ob Muri.	34
Slika 21: Spodnji robni pogoj, pretočna krivulja na iztoku iz 2D modela.	35
Slika 22: Meritve pretokov Mure na dan 22.8.2005 (Blažic S., 2005, str. 20).	36
Slika 23: Primerjava merjenih in izračunanih gladin modela za vodomerne postajo G. Radgona I.	37
Slika 24: Prikaz vodne gladine v prečnem prerezu struge pri Vodomerne postaji Gornja Radgona I.	37
Slika 25: Poplavna karta iz projekta Dra-Mur-CI(MIKE) levo, na desni karta globin v HEC-RAS.	38
Slika 26: Lokacije (1, 2, 3 in 4), kjer bo opazovana časovna odvisnost hitrost – čas in globina – čas.	40
Slika 27: Omočene površine za vse izračunane verzije pri maksimalnih globinah, referenčni model (10) je rdeče barve.	42

Slika 28: Preprosta računsko mreža z velikostjo celic 20x20 m na levi in velikostjo 6x6m na desni (HEC-RAS).....	43
Slika 29: Razlika med natančnima, zgoščenima računskima mrežama z osnovno velikostjo celice 20 x20 m (levo) in desno 6 x 6 m (HEC-RAS).....	43
Slika 30: Spremembe povprečnih hitrosti glede na referenčni model.....	44
Slika 31: Primerjava sprememb površine posameznega razreda iz karte poplavne nevarnosti glede na kriterij globin in osnovno velikost računskih celic v verziji modela.....	45
Slika 32: Območje, kjer je hitrost vodnega toka večja od 1 m/s pri verziji 3 (velikost celice 6 x 6 m).....	46
Slika 33: Primerjava rezultatov maksimalnih hitrosti pri modelih z velikostjo računske celice 20 x 20 m. Levo je model št. 9, na desni pa model št. 12.	48
Slika 34: Primerjava rezultatov maksimalnih hitrosti pri modelih z velikostjo računske celice 6 x 6 m. Levo je model št. 1, desno pa model št. 4.	48
Slika 35: Razmerje poplavnih območij glede na kriterij globine pri posameznih variantah modela. ...	49
Slika 36: Na levi strani je računsko mrežo modela pri katerem celica ob prelivu vsebuje dvignjen teren objekta (model št. 4a), na desni strani je računsko celica ob hiši razdeljena na dva dela (model št 4).....	49
Slika 37: Razlika med maksimalno omočenostjo modela, če spremenimo velikost ene celice pri prelivu skozi porušeni protipoplavni zid: desno verzija 4a, levo verzija 4.	50
Slika 38: Primerjava rezultatov maksimalnih hitrosti pri modelih z velikostjo računske celice 6 x 6 m in z upoštevanjem objektov v DMT. Levo je model št. 10 (natančna mreža), na desni model št. 4 (preprosta mreža).....	51
Slika 39: Območja, v katerih smo spremenili n_g za urbana območja, ki ne vključujejo objektov.	52
Slika 40: Odvisnost velikosti poplavljenih površin v celoti in po posameznih razredih po 1. kriteriju Pravilnika ter povprečnih globin in hitrosti od hrapavosti urbanih površin.	52
Slika 41: Primerjava razredov poplavne nevarnosti po 1. kriteriju Pravilnika za različno hrapavost urbanih površin.....	53
Slika 42: Primerjava polja hitrosti, kot podatek za 2. kriterij, za različno hrapavost urbanih površin..	53
Slika 43: Hidrogram dotoka skozi porušeni protipoplavni zid.....	54
Slika 44: Spreminjanje globin s časom v točki 1.	55
Slika 45: Spreminjanje hitrosti s časom v točki 1.	56
Slika 46: Spreminjanje globin s časom v točki 4.	57
Slika 47: Spreminjanje lokalne hitrosti s časom v točki 4.....	58

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Faze hidravličnega modeliranja (Rak, 2013).....	11
Preglednica 2: Uporaba GIS orodij.	19
Preglednica 3: Primerjava med rastrskim in vektorskim pristopom (Šumrada, 2005, str. 60).	20
Preglednica 4: Primerjava merjenih in računskih gladin visokih vod na dan 25.8.2005 v merilnem prerezu.	36
Preglednica 5: Vhodni parametri za analizo občutljivosti.	38
Preglednica 6: Oznake verzij modela - Preprosta mreža.	41
Preglednica 7: Oznake verzij modela - Natančna, zgoščena mreža ob objektih.	41
Preglednica 8: Primerjava različnosti obsega poplav glede na referenčen model.	42
Preglednica 9: Sprememba obsega poplav glede na referenčni model z velikostjo celice 6x6m,	43
Preglednica 10: Primerjava kart poplavne nevarnosti glede na kriterij globine pri verzijah z oznakami 1,2 in 3.	45
Preglednica 11: Primerjava deleža spremembe obsega poplav glede na odstotek, ki ga zasedejo tlorisi objektov glede na referenčno verzijo, ki ima velikost celic 6 x 6 m in upošteva objekte v DMT.	47
Preglednica 12: Primerjava deleža spremembe obsega poplav za vse verzije modela z velikostjo celic 20x20 m glede na referenčni primer, ki ima velikost celice 6 x 6 m in upošteva objekte v DMT.	47
Preglednica 13: Odstopanje povprečne hitrosti pri posamezni varianti upoštevanja objektov glede na referenčni primer z velikostjo celice 6 x 6 m, zgoščeno mrežo in z upoštevanjem objektov v DMT.	47
Preglednica 14: Sprememba razredov poplavnih nevarnosti za 1. kriterij karte poplavnih nevarnosti pri verzijah modela 4 in 4a.	51
Preglednica 15: Legenda za verzije modelov.	54
Preglednica 16: Izračun volumna pri treh verzijah modela.	55
Preglednica 17: Sprememba maksimalnih hitrosti v točki 1 pri luknji v zidu za različne hrapavosti urbanih površin glede na referenčni primer.	58

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

DSW diffusion wave approximation of Shallow Water equations (poenostavitev difuznega vala v sklopu globinsko povprečenih enačb)

DW Diffusion Wave equations (enačbe poenostavitve difuznega vala)

DTK državna topografska karta

EMV elektro-magnetno valovanje

GIS geografski informacijski sistemi (globalni sistem pozicioniranja)

GNSS globalni navigacijski satelitski sistem

INS inercialni navigacijski sistem

KPN Karta poplavne nevarnosti

KRPN Karta razredov poplavne nevarnosti

LAS oblika datoteke LIDAR Data Exchange

LIDAR Light Detection And Ranging (lasersko skeniranje)

LS laserski sistem

MHM matematični hidravlični model

URSZR Uprava Republike Slovenije za zaščito in reševanje

VP vodomerna postaja

WISE Skupni informacijski sistem ES za vode

1 UVOD

Naselja so se vedno pojavljala v bližini vodotokov in drugih virov vode. Z napredkom inženirskega znanja so se ljudje naučili zavarovati pred pojavi visokih vod. Omejevanje naravnih poti vodotokov je na marsikaterem območju povzročilo degradacijo vodnega okolja in poslabšanje razmer dolvodno. Danes je gradnja na poplavnih območjih nadzirana in je preverjanje vpliva novih objektov na tok vode sestavni del postopka za pridobivanje gradbenega dovoljenja. Iz vidika hidravličnega modeliranja lahko objekti (hiše, zidovi, ...) predstavljajo majhen del poplavnega območja, vendar imajo potencialno velik vpliv na volumen, smer in hitrost poplavnih voda.

Za modeliranje hidravličnih razmer na poplavnih območjih so bili z razvojem računalniške tehnologije razviti različni numerični modeli tudi za dvodimenzijsko modeliranje. S pomočjo povprečenih Navier-Stokesovih enačb v polni obliki ali v poenostavljeni obliki difuznega vala (diffusion wave), je narejenih veliko raziskav, ki z dobro natančnostjo napovedo obseg poplav in globin na ruralnih poplavnih območjih. Na urbanih območjih pa je tok vode zaradi goste poselitve bolj kompleksen in je natančno modeliranje poplavnih tokov zahtevnejše.

Ob izdelavi hidravličnih numeričnih modelov se vedno pojavi vprašanje o izbiri velikosti numerične celice. Seveda se z uporabo gostejše numerične mreže oz. manjših dimenzij numeričnih celic natančnost rezultatov modela večja, zaradi numerične stabilnosti pa je ob tem treba ustrezno zmanjšati časovni korak. To pa poveča čas izračuna, ki je lahko pri 2D modeliranju (npr. pri poplavnih valovih dolgega trajanja) že problematičen. Tako je treba pri izdelavi vsakega hidravličnega numeričnega modela izbrati ustrezno gostoto numerične mreže, ki bo dajala dovolj natančne rezultate ob čim manjšem računskem času.

1.1 Namen diplomske naloge

Namen diplomske naloge je opisati parametre, ki vplivajo na modeliranje odtočnih razmer na urbanih poplavnih površinah v primeru poplav vodotokov. Posebna pozornost je bila namenjena ocenitvi vpliva upoštevanja stanovanjskih objektov v poplavnem območju na rezultate hidravličnega modela. Objekti so upoštevani na dva načina, ali s povečanjem Manningovega koeficienta n_g ali z zvišanjem (nad gladino vode) digitalnega modela terena na dotičnih območjih. Z uporabo kazalnikov, kot so obseg površine poplavljenih območij, povprečna globina in hitrost ter potovalni čas poplavnega vala, bodo analizirani vplivi velikosti računskih celic, način zajetja objektov, oblike mreže in vpliv hrapavosti urbanih površin.

Hidravlični izračuni so bili narejeni s pomočjo programa HEC-RAS 5.0. na odseku reke Mure pri Gornji Radgoni. Območje Mure je ob Gornji Radgoni zaščiteno s protipoplavnim zidom, ki zaradi dotrajanosti predstavlja potencialno nevarnost ob velikih poplavih. V računski situaciji je bilo predpostavljeno, da se poruši del obstoječega protipoplavnega zidu na izpostavljenem odseku in začne Mura poplavljeni naselje v Gornji Radgoni. Za začetni pogoj je bil vzet teoretičen poplavni dogodek z nestalnim tokom in s pretoki Q_{100} .

Cilj diplomske naloge je raziskati, kateri pristop modeliranja objektov znotraj poplavnih območij omogoča zanesljivejši opis vpliva objektov na rezultate hidravličnega modeliranja. Običajna praksa je bila, da so se objekti v numeričnih hidravličnih modelih upoštevali s povečano hidravlično hrapavostjo ali z izločanjem celic, kjer so objekti (stavbe), iz računske mreže modela. Vendar danes, ko so natančni podatki o višini terena iz LIDAR laserskega skeniranja javno dostopni, se zdi uporaba digitalnega modela z natančno resolucijo primeren način za upoštevanje objektov. Na ta način se izognemo problemu upoštevanja objektov s pomočjo drugih parametrov, ki jih je treba umeriti.

1.2 Struktura dela

V teoretičnem delu so definirana izhodišča s področja modeliranja odprtih vodotokov, določitev vhodnih podatkov ter pregled potencialnih negotovosti. Predstavljeni so pristopi k modeliranju odtočnih razmer na poplavnih površinah.

V praktičnem delu je bil analiziran vpliv načina upoštevanja objektov, vpliv velikosti računskih celic in usmerjenosti mreže ter vpliv spreminjajoče hidravlične hrapavosti na potovanje poplavnih valov. Analiziran je bil trend spreminjanja obsega celotne poplavljenе površine, povprečnih in maksimalnih hitrosti vode ter spreminjanja obsega posameznih razredov poplavne nevarnosti, kot so določeni v predpisih o določanju poplavne nevarnosti.

2 TEORETIČNA IZHODIŠČA

V tem poglavju bodo predstavljene osnovne zakonitosti hidravličnega modeliranja odprtih vodotokov, teoretično ozadje zajema in določitve vhodnih podatkov za vzpostavitev hidravličnega modela ter opis uporabljenega programskega orodja za izračun numeričnega modela.

2.1 Hidravlika toka s prosto gladino

Osnovna lastnost toka s prosto gladino je, da na gladino vodotoka (reka, potok,..) deluje atmosferski tlak okolice. Odtočne razmere na urbanih površinah so izrazito dvodimenzionalne, saj poplavnega vala ni mogoče opisati zgolj z eno glavno smerjo hitrosti, kot je to možno pri enodimenzionalnih modelih. V našem primeru je tok modeliran z nestalnim 2D tokom s prosto gladino.

2.1.1 Osnovne enačbe

V nadaljevanju bodo podane osnovne enačbe za dvodimenzionalni tok s prosto gladino.

2.1.1.1 Kontinuitetna enačba (zakon o ohranitvi mase)

Osnovno obliko kontinuitetne enačbe dobimo, če izhajamo iz pogoja, da je sprememba mase v izbranem volumnu enaka razliki dotoka in iztoka na njegovi površini:

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

kjer so:

S ... sklenjena ploskev,

ρ ... gostota tekočine,

\vec{v} ... vektor hitrosti,

t ... čas,

V ... obravnavan volumen.

Diferencialno obliko kontinuitetne enačbe za prostorski (3D) tok dobimo, če je enačba izpolnjena za vsak del volumna dV :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

kjer so:

v_x ... komponenta hitrosti v x smeri,

v_y ... komponenta hitrosti v y smeri,

v_z ... komponenta hitrosti v z smeri.

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

Dinamična enačba izhaja iz predpostavke, da lahko sile, ki delujejo na kontrolni volumen, razdelimo na masne in površinske:

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

kjer je V obravnavan volumen, \bar{v} vektor hitrosti, t čas, ρ gostota tekočine, \bar{F} rezultanta delujočih sil, S sklenjena ploskev, $[\sigma]$ pa tenzor napetosti.

Če upoštevamo lastnosti tekočin in preoblikujemo posamezne člene, dobi enačba obliko, imenovano Navier-Stokesova enačba za realne tekočine:

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

kjer je ν koeficient kinematične viskoznosti in p tlak.

Če predpostavimo, da je tekočina nestisljiva ($\text{div}(\bar{v}) = 0$) in idealna ($\nu = 0$), dobi dinamična enačba za prostorski tok naslednjo obliko:

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = \bar{F} - \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad}(p) \quad (5)$$

To enačbo uporabljamo pri hipnih spremembah v vodnem toku (npr. vodni skok) (Rak, 2013).

2.1.1.3 Energijska enačba (zakon o ohranitvi energije)

Zakon o ohranitvi energije pove, da na spremembo celotne energije v sistemu vpliva le sprememba toplote in dela (dovajanje ali odvzemanje). Tako ima enačba zakona o ohranitvi energije sledečo obliko:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} - \frac{dA}{dt} \quad (6)$$

kjer pomeni:

E ... celotna energija sistema,

Q ... energija dovedene toplote,

A... odvzeta ali dodana energija zaradi opravljenega dela.

Opravljenno delo lahko razčlenimo glede na izvor in tako dobimo obliko enačbe:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} - \frac{dA_p}{dt} - \frac{dA_{ir}}{dt} - \frac{dA_m}{dt} \quad (7)$$

kjer pomeni:

A_p ... delo normalnih tlakov,

A_{ir} ... delo strižnih sil,

A_m ... mehansko delo.

Če upoštevamo predpostavke, da je tok stacionaren in enodimenzionalen, pri čemer se količine parametrov razporedijo enakomerno po prerezu, lahko računamo z njihovimi povprečnimi vrednostmi. Tako dobimo 1D obliko enačbe:

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dA_m}{dt} = \rho \cdot Q \cdot \left(e_{ir} + \frac{p}{\rho} + g \cdot h + \frac{v^2}{2} \right)_{izhodno} - \rho \cdot Q \cdot \left(e_{ir} + \frac{p}{\rho} + g \cdot h + \frac{v^2}{2} \right)_{vhodno} \quad (8)$$

Pri tem e_{ir} predstavlja nepovratno notranjo energijo na enoto mase.

Pri analiziranju hidravlike odprtih vodotokov razlike med dovedeno oziroma odvzeto energijo zaradi mehanskega dela ni, če na izbranem odseku ni hidravličnih ali hidroenergetskih strojev. Energijska bilanca med dvema prečnima prerezoma je na koncu definirana z energijsko enačbo:

$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} + h_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{p_2}{\rho \cdot g} + h_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \Delta E_{ir}, \quad (9)$$

kjer ΔE_{ir} predstavlja spremembo vseh oblik nepovratnih notranjih energij.

2.1.2 Globinsko povprečene enačbe (Shallow water equations)

Pri obravnavanju toka po poplavnih ravninah lahko Navier-Stokesove enačbe, ki opisujejo tok tekočin v treh dimenzijah, poenostavimo, in sicer tako, da vertikalno komponento hitrosti vode zanemarimo. Z integracijo tridimenzionalnih enačb po vertikalni smeri dobimo dvodimenzionalno obliko Navier-Stokesovih enačb.

Pri tem upoštevamo naslednje predpostavke (Rajar, 1980):

- Tok je v tlorisu dvodimenzionalen, torej voda teče le v smeri osi x in y .

- Vertikalna komponenta hitrosti je zanemarljivo majhna v primerjavi s komponento hitrosti v x in y smeri: $v_z \approx 0$.
- Porazdelitev hitrosti po globini je enakomerna, iz česar sledi, da je porazdelitev pritiskov po globini hidrostatična.
- Naklon dna je majhen, tako da z zadovoljivo natančnostjo velja poenostavitev: $I_{0,x} = tg(\beta_x) \approx \sin(\beta_x)$ in $I_{0,y} = tg(\beta_y) \approx \sin(\beta_y)$.
- Notranje trenje v tekočini je zanemarljivo majhno, trenje med tekočino in steno kanala pa je obravnavano kot zunanja sila.

Zgoraj navedene enačbe lahko za globinsko povprečen dvodimenzionalen tok (Shallow water equations) zapišemo takole:

- Zakon o ohranitvi mase oz. kontinuitetna enačba

$$\frac{\partial(v_x \cdot h)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y \cdot h)}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial t} + q = 0, \quad (10)$$

kjer h predstavlja globino vode, q pa izvor ali ponor (flux).

V programu HEC-RAS je, da bi lahko zajeli batimetrijo v numerični mreži (tj. podmrežna batimetrija), kontinuitetna enačba izražena v naslednji obliki, ki jo dobimo, če integriramo po horizontalni ravnini z normalnim vektorjem \vec{n} in z uporabo Gaussovega teorema:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} d\Omega + \iint_S V \cdot n dS + Q = 0 \quad (11)$$

V tem kontekstu volumen Ω predstavlja končen volumen posamezne celice, integrali pa so izračunani s pomočjo informacij o podrobni topografiji pod numerično celico. Vse dotoke/iztoke, ki gredo skozi zgornjo ali spodnjo ploskev volumna Ω (izhlapevanje ali padavine), predstavlja Q . Če volumen zapišemo kot funkcijo vodne gladine (H) in drugi člen enačbe (11) kot vsoto po vertikalnih mejah volumna celice, dobimo enačbo za ohranitev mase v obliki za podmrežno batimetrijo:

$$\frac{\Omega(H^{n+1}) - \Omega(H^n)}{\Delta t} + V_k \cdot \vec{n}_k A_k(H) + Q = 0. \quad (12)$$

Kjer so:

$n+1, n \dots$ indeksi, ki označujejo časovne korake,

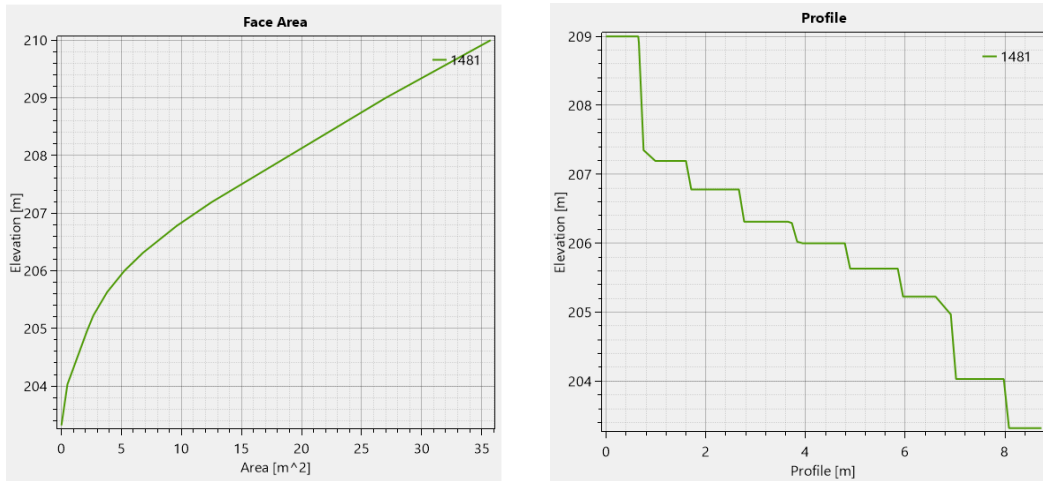
$\Delta t \dots$ razlika med dvema zaporednima časovnim korakoma,

$V_k \dots$ povprečna hitrost,

$\vec{n}_k \dots$ enotski normalni vektor mejne ploskve k ,

$A_k(H) \dots$ površina mejne ploskve, v odvisnosti od višine gladine vode H .

Vidimo, da enačba (12) potrebuje podatke o podmrežni batimetriji, o obliki volumna celice $\Omega(H)$ in podatek o površini mejnih celic $A_k(H)$ v funkciji od višine gladine vode (slika 1). Če ta informacija ni na razpolago, se iskan volumen izračuna z uporabo preproste škatlaste sheme $\Omega(H) = P \cdot h$ in s površino mejne ploskve $A_k(H) = l_k \cdot h$, kjer je P površina celice, l_k dolžina roba k (oboje neodvisno od H) in $h = H - z$ je globina vode.



Slika 1: Na desni grafičen prikaz podatkov o terenu na mejni ploskvi celice (face cell), na levi pa razmerje višine vodne gladine in površine $A_k(H)$.

Če je površina mejne celice suha, je $A_k(H)$ enak nič in v sistemu enačb bo manjkal člen V_k , torej bo sistem enačb nedefiniran. Vendar bosta dinamični enačbi pri suhih celicah dali rezultat $V_k = 0$, kar omogoča nemoten proces numeričnega simuliranja močenja in osuševanja celic.

Zakon o ohranitvi gibalne količine (dinamični enačbi za 2D tok):

$$\begin{aligned} \frac{Dv_x}{Dt} &= F_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{Dv_y}{Dt} &= F_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \end{aligned} \quad (13)$$

Dinamični enačbi lahko razvijemo v naslednjo obliko (Brunner, 2014):

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_x}{\partial x} \cdot v_x + \frac{\partial v_x}{\partial y} \cdot v_y &= -g \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) - c_f v_x + f v_y \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \cdot v_x + \frac{\partial v_y}{\partial y} \cdot v_y &= -g \cdot \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right) - c_f v_y + f v_x \end{aligned} \quad (14)$$

kjer so :

v_x in v_y ... hitrosti v kartezičnem koordinatnem sistemu,

g ... gravitacijski pospešek,

f ... Coriolisov parameter,

ν_t ... horizontalni koeficient turbulentne viskoznosti.

c_f ... de Chézyjev koeficient trenja ob ostenju $c_f = \frac{n_g g |V|}{R^{4/3}}$ kjer je R hidravlični radij, V hitrost, n_g empirično dobljen koeficient hrapavosti, znan kot Manningov koeficient n_g , katerega enota je $[s/m^{1/3}]$.

Leva stran enačbe vsebuje izraze, ki opisujejo vpliv pospeškov, desna stran pa predstavlja notranje ali zunanje sile, ki delujejo na tekočino.

2.1.3 Poenostavitev globinsko povprečenih enačb (Diffusion Wave Equations)

Zakon o ohranitvi gibalne količine lahko, ob primernih predpostavkah, zapišemo s poenostavljenim opisom difuznega vala (Diffusion Wave Approximation). Ker v plitvih vodah prevladujejo trenje tal in gravitacijske sile, lahko zato, da dobimo poenostavljeno obliko enačbe, zanemarimo nestalnost, advekcijo, turbulenco in Coriolisov člen zakona o ohranitvi gibalne količine. Tok je povzročen z barotropnim gradientom pritiska, ki je pri stalnem toku uravnotežen s trenjem ob ostenju (dno, brežine). Ta povezava je zelo koristna, zaradi svoje preprostosti, a obenem velja pripomniti, da velja samo v ozkem okviru splošne enačbe o ohranitvi gibalne količine. Model torej rešuje samo eno enačbo, znano kot Diffusion Wave Approximation globinsko povprečenih enačb. Rezultat poenostavitve je:

$$V = -\frac{(R(H))^{2/3}}{n_g} \frac{\nabla H}{|\nabla H|^{1/2}}, \quad (15)$$

kjer je ∇H naklon vodne gladine, V je hitrostni vektor, R pa hidravlični radij.

Če vstavimo enačbo (15) v enačbo za ohranitev mase dobimo klasično diferencialno obliko Diffusion Wave Approximation globinsko povprečenih enačb.:

$$\frac{\partial H}{\partial t} - \nabla \cdot \beta \nabla H + q = 0 \quad (16)$$

kjer je $\beta = \frac{(R(H))^{5/3}}{n_g |\nabla H|^{1/2}}$.

Če nas zanima informacija o batimetriji je lahko enačba (16) zamenjana z obliko za podmrežno batimetrijo za kontinuitetno enačbo, da dobimo enačbo:

$$\frac{\Omega(H^{n+1}) - \Omega(H^n)}{\Delta t} - \sum_k \alpha \nabla H \cdot n_g + Q = 0 \quad (17)$$

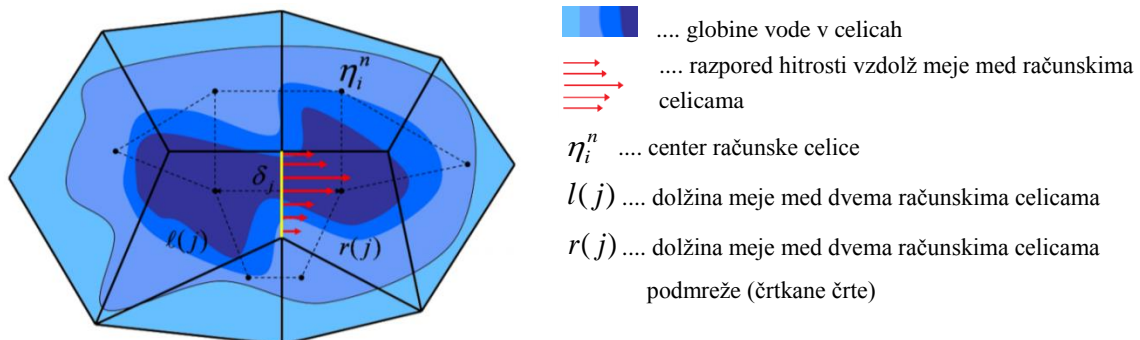
$$\alpha = \alpha(H) = \frac{(R(H))^{2/3} A_k(H)}{n_g |\nabla H|^{1/2}}$$

Kjer je $\Omega(H)$ volumen celice v času n , $A_k(H)$ podatek o površini mejne celice k , v odvisnosti od višine gladine vode, $R(H)$ pa hidravlični radij v odvisnosti od višine vode.

Ko je DSW enačba rešena, se lahko hitrosti izračunajo z vnašanjem gladine vode nazaj v DW enačbo (17).

2.1.4 Upoštevanje topografije pod računskimi celicami v HEC-RAS 5.0

Za izboljšanje časa računanja je HEC-RAS 5.0 ubral pristop s podmrežno batimetrijo (sub-grid bathymetry), ki je opisan na straneh 6 in 7 tega dela. Ideja tega pristopa je, da se uporabi relativno velika računaska mreža s podrobnimi informacijami o topografiji pod posamezno celico. Podrobnosti mreže so upoštewane kot parametri, ki predstavljajo več integralov glede na volumen in površino mejnih ploskev med celicami. Torej transport mase vode upošteva podrobno topografijo posamezne diskretne celice, kot vidimo na spodnji sliki 2. Ta izračun je baziran samo na osnovi enačbe za ohranitev mase in je zato uporaben pri obeh oblikah enačbe gibalne količine.



Slika 2: Računska mreža s podrobnim opisom topografije pod njo (Brunner, 2014).

Za numerično analizo je treba sestaviti mrežo iz poligonov, ki se ne prekrivajo. HEC-RAS ne zahteva, da je mreža ortogonalna, ampak v primeru, da je, numerični solver to upošteva kar zmanjša čas izračuna. Posamezna celica ima lahko največ osem oglišč. Poudariti moramo, da je izbira mreže ekstremno pomembna za stabilnost in natančnost izračuna ter da je rezultat v veliki meri odvisen od velikosti, orientacije in geometrijskih karakteristik mrežnih elementov. Mejne ploskve med celicami (face cell) so upoštewane kot natančen prečni prerez, odvisen od topografije pod njimi. Pri vsaki mejni površini se izračunajo naslednje tabele hidravličnih lastnosti: višina – omočen obod, višina – površina in hrapavost. Razmerje volumen – višina se izračuna za celotno celico.

Računske celice znotraj HEC-RASa so ustvarjene kot dvodimenzijska računaska mreža nepravilnih oblik in različnih velikosti, ki zajema celotno območje modela. Na te računске celice se sklicujemo, ko obravnavamo vpliv velikosti in razporejenosti celic na rezultate modela. Ob tem je treba poudariti, da je program HEC-RAS zastavljen tako, da omogoča tudi delno omočitev računskih celic, kadar voda le

delno zalije celico. To je zelo koristna funkcija pri računskih celicah večje velikosti, saj so na ta način rezultati bolj točni in je prikaz rezultatov neodvisen od velikosti posamezne računske celice.

2.2 Hidravlično modeliranje

Namen hidravličnih modelov je opisati razmere toka vode v naravi in ustvariti model, ki bo dovolj natančno opisal bistvene lastnosti modeliranih pojavov. Pri opisovanju hidravličnih razmer v vodotokih je veliko spremenljivk, ki jih ni mogoče rešiti analitično, razen za najbolj preproste probleme. Zato je model treba poenostaviti in zmanjšati število spremenljivk, da dobimo rešljiv sistem enačb. Določimo katere spremenljivke imajo največji vpliv, druge pa opišemo z empiričnimi izrazi, dobljenimi iz laboratorijskih preizkusov. Posledica tega je, da moramo model na koncu umeriti s pomočjo meritev dogodkov, ki so se že zgodili, glede na izbrane parametre.

Poznamo fizične hidravlične modele in matematične modele, ki so lahko enodimenzionalni do tridimenzionalni, ter hibridne modele, ki so kombinacija prejšnjih dveh. Fizični modeli so bili pred razvojem računalniške tehnologije edini način modeliranja kompleksnih vodnih tokov. Sedaj je večina hidravličnih modelov vodotokov narejena s pomočjo matematičnih numeričnih modelov, vendar pa so fizični modeli še vedno nepogrešljivi pri bolj kompleksnih simulacijah, tj. pri izrazitem tridimenzionalnem gibanju vode, kjer ima turbulenca močen vpliv. Prednost matematičnih modelov pa predstavlja hitra postavitve numerične mreže obravnavanega območja in možnost pogostega spreminjanja vhodnih parametrov ter nadgrajevanje variantnih rešitev brez prostorske potratnosti fizičnih modelov (Moderc, 2013). Glede na tip problematike, kompleksnost in razpoložljivost vhodnih podatkov obravnavanega primera ter želeno natančnost se je treba odločiti za najbolj primeren način modeliranja.

V nadaljevanju bodo opisane faze hidravličnega modeliranja vse od izbire in zasnove modela, zbiranja in obdelave vhodnih podatkov, priprave geometrij, robnih ter začetnih pogojev, umerjanja in verifikacije modela pa vse do analize občutljivosti in na koncu seveda kritične presoje rezultatov.

2.2.1 Faze hidravličnega modeliranja

Hidravlično modeliranje lahko razdelimo na več sklopov ali faz, neodvisno od izbire vrste modela ali tipa obravnavanega problema (preglednica 1). Opisani postopki omogočajo realizacijo verodostojnih hidravličnih raziskav.

Prva faza zbiranja in obdelave podatkov zahteva dobro poznavanje problematike v danem primeru, ki nam pomaga pri oceni sprejemljivih domnev glede na podatke, ki so na voljo. Potrebne vhodne podatke lahko razdelimo na dva sklopa – na podatke o topografiji terena, ter na hidrološke in hidravlične podatke. Geometrijske podatke ločimo na podatke o terenu v strugi (batimetrija) ter na podatke o topografiji poplavnih površin. Med hidravlične in hidrološke podatke pa se štejejo meritve, ki so običajno narejene na meteoroloških in vodomernih postajah, kot so na primer meritve padavin, vodostajev, hitrosti vodnega polja itd. S pomočjo teh podatkov definiramo robne, notranje in začetne pogoje ter si z njimi pomagamo pri umerjanju in verifikaciji modela. Za natančne rezultate moramo

dobljene podatke analizirati, oceniti njihovo točnost, zanesljivost in smiselnost njihove vključitve v model (Rak, 2013).

Preglednica 1: Faze hidravličnega modeliranja (Rak, 2013).

Faza	Postopek	
zbiranje in obdelava podatkov	definiranje problema, bistveni vplivi	
	geometrijski podatki o terenu	
	hidravlični in hidrološki podatki	
izbira in vzpostavitev modela	FIZIČNI MODEL	MATEMATIČNI MODEL
	gradnja oz. razvoj modela	
umerjanje in verifikacija modela	spreminjanje hidravlične hrapavosti oz. vhodnih podatkov	
	določitev območja in pretokov, pri katerih model kaže zadovoljivo ujemanje	
analiza občutljivosti	/	merilna negotovost podatkov
uporaba modela in kritična presoja rezultatov	variacije robnih pogojev in prostorskih ureditev, potrditev rezultatov s terenskimi meritvami	

Druga faza je izbira vrste modela, ki je odvisna od kompleksnosti danega problema ter želene točnosti rezultatov. Ta faza je podrobno opisana v naslednjem poglavju, kjer bo narejena primerjava različnih modelov. Pri vzpostavitvi modela se v vsakem primeru najprej pripravi geometrija obravnavanega območja. V primeru fizičnih modelov gre za posnetek topografije v pomanjšanem merilu, pri matematičnih modelih pa za razvoj računske mreže v primernem računalniškem programu. Nato se določi robne in začetne pogoje.

Fazi sistematičnega in postopnega prilagajanja koeficientov in parametrov modela do točke, da se rezultati z zadovoljivo natančnostjo približajo merjenim veličinam v realnosti in/ali na fizičnem modelu, pravimo umerjanje modela. Od številčnosti in razpršenosti razpoložljivih meritev je odvisno, kako dobro lahko umerimo model. Pri fizičnih modelih se za umerjanje uporabljajo različne frakcije peska in proda, pomešane s cementnim mlekom, ki se nanašajo na ostenje modela. V numeričnih modelih pa se običajno prilagaja koeficient hrapavosti ter parametri, ki se nanašajo na lokalne izgube zaradi zožitev in razširitev, koeficienti prelivov in prepustov, ali koeficient turbulentne viskoznosti (Rak, 2013). Vse rezultate je treba pregledati z inženirsko presojo, saj v tem koraku še lahko izločimo nepravilne podatke ali spremenimo neprimerne parametre. Treba je tudi paziti, da se pri izbiri koeficientov držimo omejenih vrednosti parametrov tako, da posamezni parametri dejansko predstavljajo vpliv za katerega so izbrani.

Če nimamo dovolj podatkov za verifikacijo modela je treba pri numeričnem modeliranju izvesti analizo občutljivosti. Pri tej analizi preverimo velikost vpliva posameznega parametra na delovanje oz. zanesljivo napoved celotnega modela. Pri hidravličnem modeliranju je veliko potencialnih virov merilne negotovosti, do napak lahko pride pri terenskih meritvah, pri določitvi različnih koeficientov in tudi robni pogoji so lahko velik vir negotovosti. Pri vhodnih podatkih lahko pride do napak že pri meritvah, na primer pri merjenju hitrostnega polja ob poplavih lahko prihaja do vrtinčenja in hitrega

nihanja hitrosti. Ko je model umerjen in verificiran, je primeren za analizo različnih scenarijev obratovanja robnih pogojev in drugih parametrov. Rezultate lahko nato na podlagi dobrega razumevanja modeliranega dogodka kritično ocenimo, pri čemer si pomagamo s primerjavo rezultatov z različnimi parametri.

2.2.2 Izbira hidravličnega modela

Na podlagi kompleksnosti obravnavanega primera, razpoložljivosti vhodnih podatkov ter želene natančnosti ciljnih rezultatov se je treba odločiti za najbolj primeren način modeliranja. Za pravilno izbiro modela je potrebno poznavanje prednosti in slabosti posameznih tipov hidravličnih modelov ter bistvenih fizikalnih lastnosti našega primera. Pri presoji možnosti se odločimo za najbolj preprost model, ki pa bo še vedno opisal situacijo z zadovoljivo natančnostjo.

Fizični modeli so bili prva oblika modeliranja procesov in pojavov iz narave. S časom se njihova vloga spreminja, saj so danes uporabljeni za modeliranje pojavov, ki jih z matematičnimi modeli ni možno opisati dovolj natančno. Uporabljajo se tudi pri hibridnem modeliranju v kombinaciji z matematičnimi modeli, v primerih, ko potrebujemo posebno natančne rezultate, saj taki modeli združujejo vse dobre lastnosti obeh vrst modela (Rak, 2013).

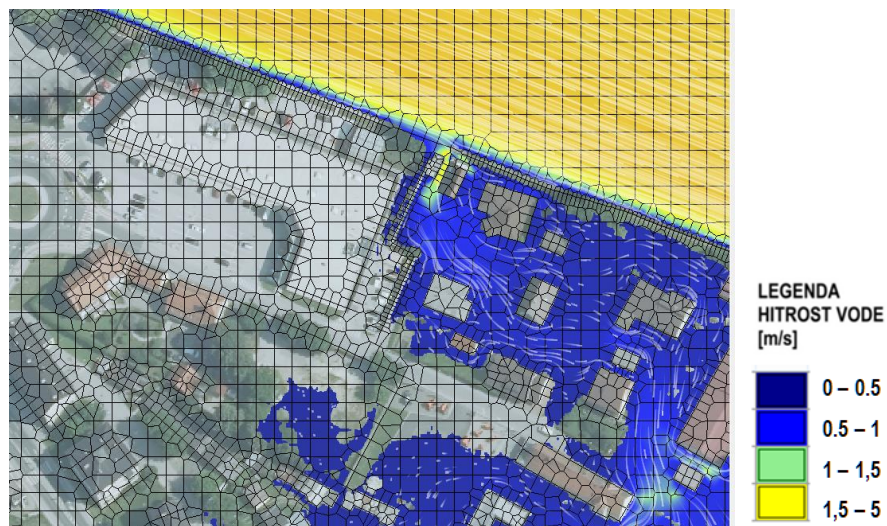
Z razvojem računalniške tehnologije se je pojavilo matematično modeliranje, ki je zelo priročen način hidravličnega modeliranja. Njegove prednosti so predvsem v lažjem spreminjanju vhodnih parametrov, hitrejši vzpostavitvi, modifikaciji in možnosti simuliranja različnih variant in ceni izvedbe. Ta vrsta modelov na numeričen način rešuje končno število enačb, ki opisujejo tiste procese, ki jih znamo opisati in ki temeljijo na matematičnih in hidravličnih zakonitostih, ki so pogosto dopolnjene z empiričnimi komponentami. Te empirične povezave so dobljene v odvisnosti od preizkusov narejenih na fizičnih modelih in so zelo pomembne pri umerjanju modela. Za natančen opis kompleksnih hidravličnih razmer pri numeričnih modelih je treba ustvariti računske mreže z manjšimi velikostmi celic in zmanjšati računski korak izračuna, kar posledično podaljša čas izračuna simulacije. V primerjavi s fizičnimi modeli to predstavlja slabost numeričnih modelov, saj meritve na fizičnih modelih potekajo razmeroma hitro.

Na izbiro je veliko različnih numeričnih modelov, ki se razlikujejo glede na področje uporabe, vrste problematike, načina simuliranja itd. Posebna pozornost mora biti posvečena razumevanju osnovnih hidravličnih zakonitosti, ki veljajo za izbran primer, in se na njihovi podlagi odločiti za primeren program za hidravlično modeliranje. Na podlagi kompleksnosti tokovnih razmer in razpoložljivih podatkov se odločimo, kakšno število komponent hitrosti bo z zadostno natančnostjo opisalo hidravlične razmere v obravnavanem območju. Glede na število komponent hitrosti se numerični modeli delijo na eno-, dvo- ali tridimenzionalne modele.

Pri enodimenzionalnih modelih se upošteva le hitrost vodnih delcev v glavni smeri toka. Danes 1D modeli omogočajo simuliranje pri vseh režimih toka (miren, deroč ali izmenjujoč) pri stalnih in nestalnih pogojih ter simulacijo hipnih sprememb pretočnega prereza. Možna je tudi razdelitev prečnega pretočnega prereza na več delov, v katerih se upoštevajo različni hidravlični parametri. Upoštevanje toka po poplavnih ravninah na tak način je primerno le za redke primere, saj je tok na

poplavnih površinah praviloma izrazito dvodimenzionalen in ima lahko povratne tokove. Enodimenzionalni modeli imajo tudi možnost simuliranja hidravličnih razmer na različnih hidrotehničnih objektih kot so mostovi, prelivni, jezovi itd (Rak, 2013).

Na poplavnih območjih, pri hipnih zožitvah ali razširitvah struge in podobnih situacijah se pojavljajo izrazito dvodimenzionalne tokovne razmere, lastnosti toka pa je v teh primerih vendarle še mogoče po globini povprečiti. Teoretična izhodišča za 2D modeliranje so bila razvita že pred časom (Rajar, 1980), vendar je šele z razvojem zmogljivejše računalniške opreme in posledično zmanjšanim časom računa simulacij prišlo do širše uporabe 2D modelov. Račun se izvede z uporabo računske mreže, ki je lahko sestavljena iz trikotnikov, kvadratov ali večkotnikov, odvisno od uporabljenega programa. Za posamezen element mreže se iteracijsko izračuna globina vode in povprečne komponente hitrosti vode v dveh smereh. Na sliki 3 vidimo razpored hitrosti v urbanem območju, kjer je vodni tok izrazito dvodimenzionalen.



Slika 3: Poln 2D numerični model, kjer 2D celice pokrivajo celotno obravnavano območje.

V mnogih hidravličnih programih je tudi možnost kombiniranja eno- in dvodimenzionalnega modela. Z 1D delom modela se simulira tok v strugi, za poplavne ravnice pa se naredi 2D model obvodnega območja. Prednost takšnega modeliranja je možnost upoštevanja različnih hidrotehničnih objektov znotraj struge (mostovi, jezovi, prepusti), ki jih v dvodimenzionalnih modelih običajno še ni možno enostavno modelirati. Takšni kombinirani modeli so primerno orodje, če nas zanimajo analiza glavnih smeri toka po poplavnih površinah, globine in hitrosti vode ter obseg poplavljanja pri visokih vodah s počasnim potovanjem poplavnega vala. Manj natančni pa so pri takšnem izračunu hitrosti tik ob stikih med 1D in 2D modelom, kjer ima gibalna količina večji vpliv (Weisgerber et al., 2010).

Tridimenzionalni (3D) modeli se uporabljajo za analizo tokovnih razmer čez hidrotehnične objekte ali na krajših odsekih vodotokov, kjer se pojavljajo izrazito tridimenzionalni tokovi. Numerične simulacije pri izračunih z gostejšo numerično mrežo so tudi še danes, kljub sodobni računalniški opremi, zelo zahtevne in časovno zamudne. Prav tako pogosto obstajajo omejitve glede količine in kakovosti vhodnih podatkov, na katere je model umerjen.

2.2.3 Hidrološki podatki

Pri izdelavi hidravličnega modela prispevajo natančni hidrološki podatki o pretokih in vodostajih pomemben del ustreznosti vzpostavljenega modela. Podatki za določitev začetnih robnih pogojev, tj. stalnega ali nestalnega pretoka, so večinoma pridobljeni iz hidrološke merilne mreže postaj državnega monitoringa. Merilna mesta morajo biti locirana na primernih mestih z zanesljivo opremo, da so meritve reprezentativne in verodostojne. Če pa je obravnavano območje predaleč od vodomernih postaj, moramo pridobiti specifične meritve, narejene za namen raziskave.



Slika 4: Vodomerna postaja s poševnim vodomernim trakom in vertikalno merilno lato za merjenje visokih vodostajev (ARSO, 2015)

V Sloveniji meritve vodostajev in ostalih hidroloških parametrov opravlja Agencija Republike Slovenije za okolje, ki je v obdobju 2009–2015 izvajala projekt BOBER (Boljše Opazovanje za Boljše Ekološke Rešitve) nadgradnje sistema za spremljanje in analiziranje stanja vodnega okolja v Sloveniji. V okviru projekta je bila posodobljena skoraj celotna mreža hidroloških merilnih mest, nekaj pa je bilo novo zgrajenih (Bat et al., 2016).

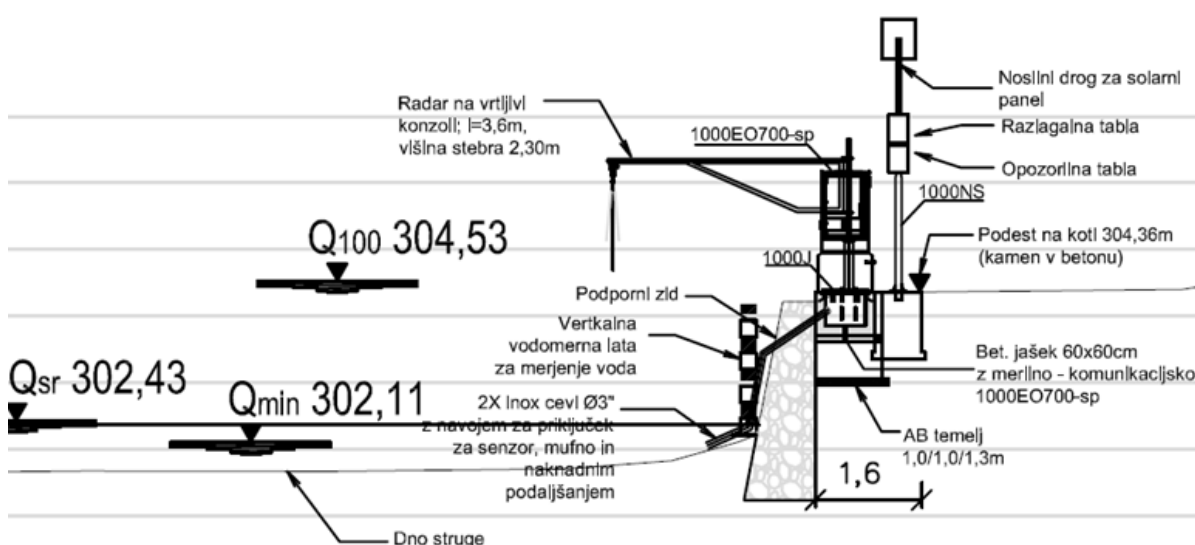
2.2.3.1 Hidrometrija

Podatki o merjenih vodostajih, ki jih opravi ARSO, so na voljo na njihovi spletni strani, bolj natančne meritve ostalih hidroloških parametrov pa lahko različni uporabniki in raziskovalci dobijo na povpraševanje. Hidravlično modeliranje se zanaša predvsem na merjene parametre, kot so pretoki in vodostaji, ki predstavljajo robne pogoje in podatke za umerjanje ter verifikacijo modelov. Z nadgradnjo mreže merilnih mest in z njihovo avtomatizacijo se je zanesljivost in verodostojnost merjenih podatkov močno povečala (ARSO, 2015). Kontinuirane meritve sedaj tudi ob visokih vodah zbirajo podatke o globinah, kar predstavlja dober vir podatkov za umerjanje visokih vodostajev.

Najprimernejše mesto za postavitev VP je raven rečni odsek, ki ni izpostavljen erozijskim procesom ali odlaganju sedimentov. V primeru preoblikovanja oblike pretočnega prereza se namreč lahko spremeni niveleta dna, kar močno vpliva na pretočno krivuljo in posledično na natančnost rezultatov. Ker na odtočne razmere vplivajo ovire v toku in vegetacija, je priporočljivo, da je merilno mesto postavljeno na mestu, kjer ni veliko motenj toka in je vzdolžen padec enakomeren. Na merilnih mestih se izvajajo meritve vodostajev, na podlagi teh podatkov pa se lahko iz pretočne krivulje, določene iz

enačbe za stalni tok, določi tudi pretok v izbranem profilu. Klasična izvedba merilnega mesta obsega eno ali več merilnih lat, na katerih opazovalec odčitava kote gladin. Novejše verzije merilnih mest na površinskih vodomernih postajah (slika 5) pa vsebujejo naslednje elemente:

- tlačno sondo,
- mikrovalovni radar na konzoli,
- komunikacijska omarico,
- poševni vodomerni merilni tlak,
- vertikalno vodomerno lato,
- solarni panel,
- GPRS komunikator.



Slika 5: Idejna zasnova vodomerne postaje Vir pri Domžalah (projektna dokumentacija Eprojekt d.o.o.).

V projektu BOBER so bila vsa merilna mesta posodobljena, tako da je omogočeno avtomatizirano merjenje s pomočjo tlačne sonde, nekatere VP pa so opremljene še z mikrovalovnim radarjem na konzoli za merjenje visokih vodostajev (slika 5).

Za meritve hitrostnega polja in posledično za meritve pretokov se danes najpogosteje uporabljajo akustični Dopplerjevi merilniki (ADMP), ki uporabljajo princip Dopplerjevega pojava. Merijo spremembo med oddano frekvenco (med 500 in 2000 kHz) in odbito frekvenco od suspendiranih in raztopljenih snovi v vodi oziroma od dna.

2.2.3.2 Hidravlični robni, notranji in začetni pogoji

Zakon o naravnih in drugih nesrečah deli nesreče na dve vrsti, prve kot posledico naravnih procesov in druge kot posledico odpovedi delovanja človekovih objektov, naprav ali ureditev bodisi zaradi napak v materialu ali zasnovi konstrukcije bodisi zaradi neustreznega ravnanja človeka ali opustitve dejanj. Človeški posegi ne morejo nikoli zagotoviti absolutne varnosti, pač pa so v prostorski oz. gradbeni dokumentaciji upoštevane t.i. »projektne vrednosti«, ki odražajo, do katere meje je človekov poseg odporen na naravne pojave (Rak, Slokar in Steinman, 2014).

Povratna doba T nekega dogodka je povprečni interval časa (v našem primeru je T 100 let), znotraj katerega je določena vrednost nekega dogodka dosežena ali presežena enkrat. Tako npr. protipoplavni zid Gornjo Radgono varuje pred projektnim pretokom Q_{100} . To pomeni, da je zid zgrajen, da vzdrži pretoke, sile in erozije pri Q_{100} , glede na izračunane vodostaje pa je dodano še varnostno nadvišanje. V primeru, da bi bil pretok višji, pa govorimo o »višji sili« oz. ujmi. Robni pogoji se lahko določijo na podlagi podatkov iz terenskih meritev in vodomernih postaj, ali pa na podlagi rezultatov predhodnih modelov. Hidrogram podaja spreminjanje pretoka v odvisnosti od časa, pretočna Q - h krivulja pa gladino vode pri določenem pretoku.

Vhodni robni pogoji so pri hidrodinamičnem modelu stalnega toka konstantni pretok ali hidrogram oziroma Q - t krivulja pri nestalnem toku. V nalogi je obravnavan nestalni pretok v skladu z verjetnimi razmerami na Muri (npr. potovalni čas, sprememba konice vala ipd.). Notranje pogoje lahko definiramo pri toku čez hidrotehnične objekte in pri dotokih ali odvzemih vode vzdolž odseka. V našem primeru je bil uporabljen notranji pogoj za porušitev protipoplavnega zidu ob določenem času simulacije potovanja poplavnega vala.

Spodnji robni pogoj je pri mirnem toku zelo pomemben člen definiranja hidravličnih razmer na obravnavanem odseku. Z njim je že predvideno hidravlično stanje vodotoka na izhodnem profilu iz modela, na podlagi katerega se izračunajo razmere v gorvodnih območjih. Na izhodnem robu predstavlja pri nestalnem toku robni pogoj gladina (Q - h ali h - t krivulja).

2.2.4 Geometrija obravnavanega območja

Natančna in skrbno pripravljena geometrija obravnavanega območja je nujno potrebna za kvalitetno simulacijo vodnega toka. To še posebno velja za primer urbanih površin, kjer je teren zelo razgiban in ima velik vpliv na tokovno polje. Potrebujemo torej podatke o topografiji z veliko gostoto in natančnostjo, da lahko ustvarimo realen tridimenzionalen model terena. Tehnike, ki omogočajo zajem podatkov o geometriji, se razlikujejo glede na območje, ki nas zanima. Za hidravlično modeliranje je prostor smiselno razdeliti na območje znotraj struge in na območje poplavnih površin.

Pri enostavnejših ozkih rečnih dolinah, kjer je upravičena uporaba enodimenzionalnih hidravličnih modelov, zadoščajo že podatki o prečnih prerezih z relativno veliko oddaljenostjo med merjenimi profili. Pri modeliranju poplavnih tokov z 2D numeričnimi modeli pa so potrebni visoko resolucijski modeli terena (DMT). Posebna pozornost mora biti namenjena natančnosti izmer geometrije in hidravličnim pogojem na ovirah v vodnem toku, na območju rečnega korita in površin, kjer se razliva voda pri višjih vodostajih ali v retenziji. Iz tega razloga so se razvile metode, ki se prilagajajo različnim fizikalnim pogojem snemanja površja.

2.2.4.1 Geometrija struge

Za zajem geometrije struge je najbolj natančna metoda geodetska izmera. To je klasična, uveljavljena metoda za pridobivanje prostorskih podatkov. Geodetske metode, kot na primer tahimetrija ali globalni sistem pozicioniranja (GPS), so v primerjavi z ostalimi načini zajema prostorskih podatkov dražje in dolgotrajne, vendar so še vedno prva izbira za merjenje hidrotehničnih objektov, premostitev

in drugih ovir v toku, kjer so potrebni natančni podatki. Klasične metode imajo relativno natančnost 2–4cm v vseh smereh, absolutna natančnost (položaj glede na državno geodetsko mrežo) znaša cca 2cm glede na pozicijsko natančnost, glede na vertikalno pa od 5 do 10cm (Moderc, 2013). Te metode so primernejše za plitvejša in krajša odseke rek, za večje količine podatkov v večjih rekah pa so razvite druge metode.



Slika 6: Meritve prečnega profila Save z ultrazvočnim globinomerom SonarMite (Grangeo d.o.o., 2011).

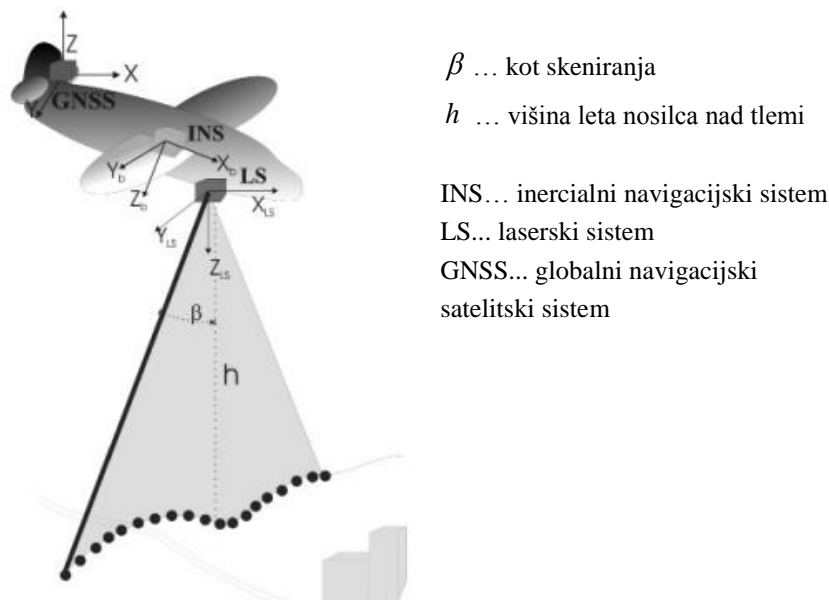
Tehnike daljinskega zaznavanja so na območju struge manj primerne, saj na vodni gladini prihaja do loma ali celo odboja signala. Obstaja sicer posebna vrsta laserskega skeniranja (DIAL – Differential Absorption LIDAR), ki z dvema vrstama žarkov ugotavlja, kje se nahaja teren pod gladino vode. Vendar je ta metoda primerna le za mirne, bistre vodotoke, kjer ni motenj zaradi lebdenja delcev sedimentov. Ostali dve metodi zajema batimetrije sta merjenje iz plovila s pomočjo merilnih lat in pa uporaba ultrazvočnih inštrumentov na plovilih (Grangeo d.o.o., 2011). Uporaba merilnih lat je dolgotrajen postopek, ki je tudi omejen z globino vode. Uporaba ultrazvočnih inštrumentov je primerna tudi za velike globine. Ti delujejo na principu merjenja časa, ki ga poslan zvočni signal rabi, da se odbije od površine dna. Težava pa nastopi, če dno ni jasno določeno, npr. pri blatnem toku oz. suspenzijah ob dnu.

2.2.4.2 Geometrija poplavnih površin

Točni podatki o topografiji poplavnih površin so bistveni za dobro geometrijsko podlago hidravličnih izračunov. Pri obravnavi ravninskih območij je vertikalna natančnost izmerjenih točk zelo pomembna, ker lahko v primeru poplav na takšnih območjih voda prodre do razmeroma zelo oddaljenih področij.

Za pridobivanje topografskih podatkov obstaja veliko različnih tehnik. Med njimi so najpogostejše metode zajem podatkov iz obstoječih kart, geodetska izmera, fotogrametrija in tehnologija LIDAR. Podatki o topografiji poplavnih površin morajo imeti dovolj veliko gostoto, zato klasična geodetska izmera ni primerna za zajem velike količine topografskih podatkov za poplavne površine. Tudi digitalizacija izohips ali točk iz obstoječih kart ima običajno premajhno gostoto točk za izdelavo natančne geometrije hidravličnega modela. Fotogrametrija je tehnologija pridobivanja informacij iz stereofotografskih posnetkov. Ta metoda je primerna tudi za masovno pridobivanje geografskih

podatkov o topografiji na podlagi ortofoto posnetkov (Rak, 2006). V zadnjem času pa za zajem topografskih podatkov prevladujejo tehnike LIDAR, ki temeljijo na laserskih aktivnih senzorjih (angl. Laser Induced Direction And Ranging).



Slika 7: Simboličen prikaz snemanja z LIDAR tehnologijo (Čekada M. T., 2010, str. 184).

Lasersko merjenje deluje po enakem principu kot radar oziroma sonar. Merjenje smeri in razdalj je narejeno na osnovi poznavanja hitrosti uporabljenega EM valovanja ter merjenja časa potovanja impulza od vira do tarče ter nazaj (Čekada M. T., 2010). Tako je možno izračunati razdaljo do tarče in na podlagi teh podatkov in kombinacije GPS podatkov o položaju letala dobimo model terena v točkovni obliki. Ker so v tehnologiji LIDAR uporabljena valovanja z manjšo valovno dolžino v primerjavi s sonarjem ali z radarjem, omogoča merjenje precej manjših objektov, kar posledično pomeni gostejši zajem podatkov in višjo natančnost. Skeniranje se največkrat izvaja iz zračnih plovil, iz tal pa se skenirajo posamezni objekti ali zelo strma pobočja. Prostorsko lasersko skeniranje torej delimo na aerolasersko skeniranje (angl. Airborne Laser Scanning – ALS) in terestrično lasersko skeniranje (angl. Terrestrial Laser Scanning – TLS) (Moderc, 2013).

ALS tehnologija se uporablja večinoma za izdelavo digitalnih modelov površja. Zaradi hitrega zajema točk velike gostote (do 20 točk na m^2) in primerne natančnosti (višinska do 2cm, pozicijska 10–15 cm) je primerna za natančno določitev reliefnih in hidroloških danosti, kot so odvodnice, razvodnice, padnice, prelomnice, plastnice, karakteristične točke terena, nagibi ipd. Tako lahko ustvarimo kakovosten DMR, ki je nujno potreben pri veliki reliefni razgibanosti (Bric, 2013). V primerjavi s fotogrametrijo je ALS dražji, ampak neodvisen od vremenskih dejavnikov.

2.2.4.3 Izdelava numerične geometrije modela

Ko imamo zbrane podatke o detajlih struge v obliki prečnih profilov in dovolj natančen 3D oblak točk obravnavanega območja iz LIDAR snemanja, lahko s pomočjo programskih orodij GIS in CAD

podatke povežemo v enoten digitalni model terena. S pomočjo posebnih orodij, kot je na primer HEC GeoRAS, je možno uvoziti tudi geometrijo iz različnih hidravličnih modelov.

Z novimi načini zajema prostorskih podatkov, kot je na primer LIDAR tehnologija, je omogočen dostop do detajlnih informacij višinskih točk terena, ki so osnova za izdelavo visoko resolucijskega digitalnega modela terena. Pri obravnavanju ravninskih poplavnih območij je vpliv gostote višinskih točk zelo velik, saj lahko že majhni detajli spremenijo potek vodnega toka. Ob izdelavi numeričnih hidravličnih modelov je tako nastala dilema, kako te natančne podatke ustrezno upoštevati. V večini programov za hidravlično modeliranje namreč velja, da ena računska celica predstavlja eno višinsko točko. Danes pa je običajna velikost računske mreže v hidravličnih modelih že veliko večja od razpoložljivih podatkov iz LIDAR snemanj, ki imajo gostoto višinskih točk do 20 točk/m².

Iz tega sledi, da se detajli o topografiji poplavnih območij, ob klasičnem načinu generirane 2D mreže, posplošijo. Za rešitev tega problema se razvijajo novi načini generiranja 2D računskih celic in posledično drugačen način izračuna numeričnih enačb. V programu HEC-RAS 5.0 je uporabljen izračun s pomočjo podmrežne batimetrije, ki s pomočjo parametrov ohrani glavne lastnosti terena pod računsko celico. Tak način zelo pozitivno vpliva na natančnost izračuna in tudi na skrajšanje časa izračuna (Hartnack et al., 2008).

2.3 GIS tehnologija v hidravličnem modeliranju

Od običajnega slikovnega prikaza prostorskih podatkov se GIS razlikuje v tem, da so podatki georeferencirani, kar omogoča veliko preglednost in kompatibilnost rezultatov iz različnih virov, enostaven prenos podatkov med različnimi uporabniki ter zlasti učinkovit prikaz in analizo podatkov. Zaradi široke možnosti uporabe GIS tehnologije so se razvila številna orodja, ki so ozko usmerjena za potrebe posamezne panoge kot so geodezija, urbanizem, geologija, hidrologija, arhitektura, gradbeništvo ipd.

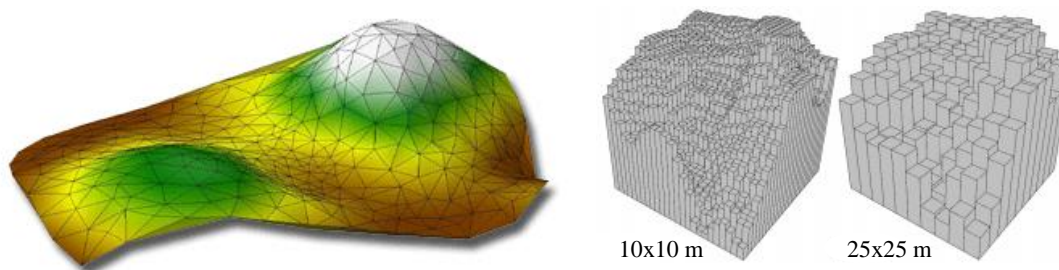
Pri vzpostavitvi hidravličnega modela je uporaba GIS tehnologije neprecenljivo orodje, ki omogoča učinkovito zajemanje, shranjevanje, obdelavo in analizo ter prikazovanje prostorskih (geografskih) podatkov (Preglednica 2).

Preglednica 2: Uporaba GIS orodij.

Zajem podatkov	višinske točke (LIDAR snemanje, geodetska izmera)
	raba tal (GIS posameznih občin)
	ortofoto posnetek
Obdelava podatkov	Ustvarjanje DMT iz višinskih točk
	Ustvarjanje profilov struge iz DMT
	Priprava sloja rabe tal za določitev koeficienta hrapavosti
Analiza	Izračun površin -obseg poplav
	Izračun povprečnih vrednosti (hitrosti, globine, zmnožek v·d)
	Razdelitev rezultatov na razrede (hitrosti, globine, zmnožek v·d)
Prikaz	Ustvarjanje kart poplavnih nevarnosti

Natančnost hidravličnega izračuna je v veliki meri odvisna od kakovosti podatkov o topografiji iz katerih se ustvari digitalni model terena (DMT). Predvsem vertikalna natančnost meritev neposredno vpliva na rezultate hidravličnih izračunov. Pri bolj ravninskih območjih je razlika v nadmorskih višinah majhna in je natančnost topografije še bolj pomembna. V primeru poplavljanja takšnih območjih lahko voda prodre do oddaljenih mest oz. področij in je zato natančen zajem topografije bistven za kvalitetne hidravlične izračune (Rak, 2006).

Oblak višinskih točk, pridobljen z daljinskimi laserskimi snemanji, lahko pretvorimo v ploskve na dva glavna načina. Točke, ki imajo tri komponente x , y , in z v referenčnem koordinatnem sistemu lahko povežemo v obliko rastrske mreže ali pa v mrežo neenakih trikotnikov (TIN). Osnovni gradnik rastrskega objekta (Warner T., 2014) je pravilna kvadratna celica, ki nosi informacije ali vrednosti enotnega podatkovnega tipa. Mreža TIN pa je definirana kot vektorski objekt, ki ima za osnovni gradnik točke, ki jih poveže v trikotnike poljubnih oblik in velikosti (Scientific Software Group, 2016) (Pranjić, S., 2008).



Slika 8: Primer digitalnega modela terena s TIN mrežo na levi, na desni 3D pogled na raster digitalnega modela višin z različno velikostjo celic (Scientific Software Group, 2016; Warner T., 2014).

Kot vidimo iz zgornje slike, je lahko razlika med tema dvema načinoma prikazovanja topografije zelo velika. Prednosti in slabosti posameznega načina prikazovanja topografije bomo razložili v nadaljevanju.

Preglednica 3: Primerjava med rastrskim in vektorskim pristopom (Šumrada, 2005, str. 60).

opravilo	rastrski model	vektorski model
podatki	hiter, enostaven zajem velika količina	zamuden zajem majhna količina
grafika	povprečna	odlična
struktura podatkov	enostavna	zelo zapletena
geometrična natančnost	slaba (odvisna od resolucije)	teoretično neomejena
mrežne analize	zelo slabe	odlične
površinske analize	odlične	povprečne, težavne
posplošitev podatkov	enostavna (slabša resolucija)	zapletena in zahtevna

Vektorski elementi v GIS tehnologiji so primerni predvsem za naloge linijske oziroma omrežne analize, v katerih je pomembna prostorska natančnost. Za modeliranje številnih slojev podatkov hkrati, za njihovo analizo ter za daljinsko zaznavanje in prostorsko zvezno spreminjajoče se pojave pa je primernejša rastrska oblika podatkov.

V tej nalogi je bil uporabljen program ArcGIS (programsko orodje podjetja ESRI), ki je najbolj razširjeno GIS orodje, ki omogoča analizo, izris, uporabo in upravljanje prostorskih podatkov. V sklopu orodij 3D Analyst, Data Management, Spatial Analyst in drugih funkcij so bili narejeni vsi postopki, ki so opisani v preglednici 3. Pri obdelavi rezultatov hidravličnega modela je zelo koristna funkcija Batch, s katero je možno analizirati ali ustvariti več slojev naenkrat, kar je zelo koristno pri veliki količini podatkov.

2.4 Lokalne in trenjske energijske izgube

Če si ogledamo osnovno energijsko enačbo za realno tekočino za enodimenzijski tok, v primeru dveh zaporednih profilov vidimo, da se razpoložljiva energija v smeri toka zmanjšuje (ob izločitvi oblik energije, ki so medsebojno popolnoma pretvorljive). Vzdolž toka se energija spreminja v ireverzibilne oblike kot so trenje, toplota, stiskanje in širjenje. Zanima nas predvsem tisti del energije, ki se pretvori v ireverzibilno obliko energije zaradi odpora pri toku vode. Ta del celotne energije imenujemo "energijske izgube", ki jih lahko razdelimo na trenjske in lokalne izgube (Steinman, 2010).

2.4.1 Hidravlična hrapavost

Pri toku vodotokov lahko predpostavimo, da sta prevladujoči sili v sistemu sila težnosti in nasprotna sila zunanjega trenja. Ob tem zanemarimo notranje trenje tekočine in ne upoštevamo lokalnega odpora objektov. S tako poenostavitvijo je bila razvita semi-empirična Chezyjeva enačba za praktične potrebe izračunov hitrosti realnega enakomernega toka s prosto gladino. Manningova enačba pa je nastala brez izpeljave izključno na podlagi eksperimentov. Izgube zaradi trenja med vodnim telesom in hrapavim omočenim obodom so v enačbah izražene z de Chézyjevim oziroma Manningovim koeficientom linijskih izgub. Najpogosteje se uporablja Manning-Stricklerjeva enačba, ki jo zapišemo v obliki:

$$v = \frac{1}{n_g} \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{I} \quad (18)$$

kjer je:

n_g ... Manningov koeficient trenja, ki ni brezdimenzijski [$s \cdot m^{-1/3}$],

v ... povprečna hitrost v prečnem prerezu,

R ... hidravlični radij, ki predstavlja razmerje med površino in omočenim obodom ($R=S/O$),

I ... vzdolžni naklon kanala (stalni enakomerni tok).

Hrapavost ostenja vpliva na vertikalno razporeditev hitrosti ter na tokovno sliko celotnega prereza. Pri naravnih vodotokih je hidravlična hrapavost odvisna od sestave dna in brežin ter obrežne zarasti. Kot smo omenili, je Manningova enačba nastala izključno z empiričnimi poskusi. Zato je vrednost koeficientov v posameznem primeru najnatančneje določiti, če imamo rezultate meritev globin in hitrosti vodnega toka v posameznih točkah vzdolž izbranega odseka. V večini primerov tako goste meritve hitrosti niso dane in je treba koeficient trenja oceniti na podlagi tabel iz literature (priloga A). Tabelačno podane vrednosti so razvrščene glede na posamezne dejavnike vpliva.

Spreminjanje koeficienta hrapavosti je glavni način umerjanja modela. S pomočjo znanega pretoka in meritev globin v točkah vzdolž obravnavanega odseka spreminjamo Manningov koeficient tako, da dobimo pri danem pretoku enake gladine. Koeficient hrapavosti je lahko odvisen od globine in hitrosti vode, tipa in stopnje potopljenosti vegetacije itd.

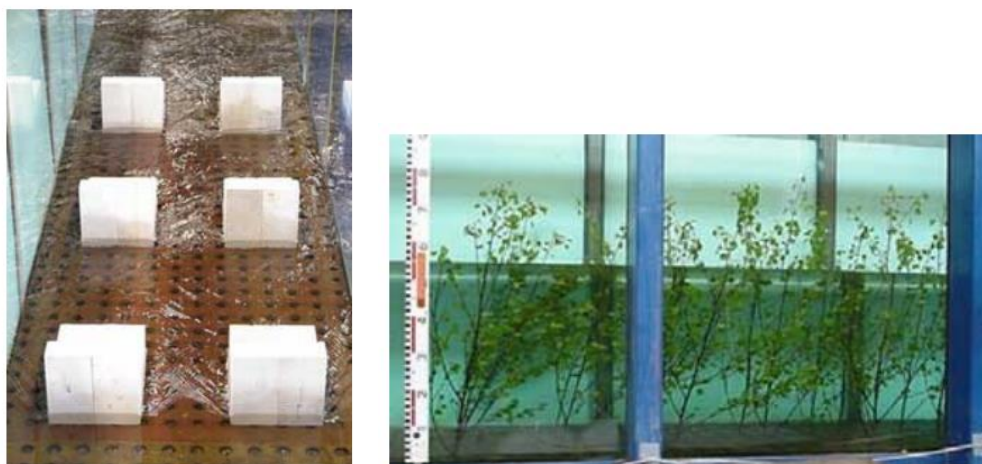
V koeficientu hrapavosti pa lahko zajamemo tudi druge vplive, kot na primer spreminjanje prečnega preseka (tolmuni, prodišča), trasa vodotoka (meandriranje), stik območij vode z različnimi hitrostmi vodnega toka itd. Pristop W. H. Shen-a iz leta 1972 zajema celo vrsto vplivov in ima obliko:

$$n_g = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m \quad . \quad (19)$$

Kjer so n_0 , n_1 , n_2 , n_3 in n_4 vpliv materiala, ki sestavlja omočeni obod rečnega korita, stopnja hrapavosti oboda, relativni vpliv ovir v koritu, zaraslosti z vegetacijo in vpliv stopnje meandriranja osi vodotoka (Steinman, 2010).

2.4.2 Lokalne izgube kot posledice topografije, batimetrije in objektov z lokalnim vplivom

Do lokalnih izgub pride zaradi sprememb smeri tokovnic, kot se to zgodi pri razširitvah in zožitvah pretočnega prereza, razcepkih, spremembah smeri toka, krivinah, objektih itd. Pri takih spremembah vodnega toka se pojavi vrtinčenje in turbulenca in posledično pride do disipacije energije. Določanje lokalnih izgub zahteva detajlno hidravlično, pogosto tudi eksperimentalno obdelavo, kot na primer v raziskavi, ki jo vidimo na spodnji sliki (Karvononen, Hepojoki, et al., 2000). V študiji so bili Manningovi koeficienti hrapavosti določeni na podlagi izmerjenih globin in pretokov za različne postavitve pomanjšanjih objektov (priloga B).



Slika 9: Raziskava Manningovih koeficientov v območju stavb in dreves (Karvononen, Hepojoki, et al. 2000, RESCDAM, 2000 Appendix 2: strani 19 in 43).

V 2D modelih je upoštevanje turbulence in vrtinčenja omogočeno s parametrom turbulentne viskoznosti. Vendar je možno upoštevati izgube energije v okolici lokalnih ovir tudi z zvišanim Manningovim koeficientom ali pa z nadvišanjem terena v ustreznih celicah, da skozi voda ne teče.

Pri modeliranju poplav na urbanem območju je količina ovir v toku lahko zelo velika, in medtem ko vodni tok potuje po urbanem območju, prihaja do energijskih izgub zaradi zožitev ter razširitev toka. Če objekte upoštevamo z nadvišanjem terena, tokovnice spremenijo smer in obtekajo modelirane objekte. Na tak način je simulirana večja izguba energije. Pri upoštevanju ovir z Manningovim koeficientom pa se hitrost vodnega toka zmanjša, ampak potek tokovnic ni tako natančen kot pri upoštevanju objektov z nadvišanjem terena.

2.5 Opis uporabljenega numeričnega modela – HEC RAS 5.0

Na ameriškem centru za hidrologijo (Hydrologic Engineering Center; HEC) so leta 1995 razvili brezplačen in javno dostopen hidravlični program HEC-RAS (River Analysis System), ki ga tudi redno posodablajo. Do letošnje verzije 5.0. je bil program zasnovan le za računanje hidravlike stalnih in nestalnih enodimenzionalnih tokov s prosto gladino. Zadnja verzija pa poleg enodimenzionalnega modela omogoča izdelavo polnega dvodimenzionalnega modela in kombiniranega 1D–2D modela pri nestalnem toku.

Program temelji na numeričnem reševanju Reynoldsovih povprečenih Navier-Stokersovih enačb (Shallow water equations). V nekaterih primerih je vpliv gravitacije in trenja tal dominanten v dinamični enačbi, vpliv viskoznosti in advekcije pa lahko zanemarimo. S kombinacijo te enačbe z enačbo za ohranitev mase dobimo eno enačbo, ki se imenuje Diffusion Wave Approximation globinsko povprečenih enačb. Za numeričen izračun je uporabljen diskretiziran način za kombinacijo metode končnih volumnov z metodo končnih razlik za upoštevanje poenostavitev pri ortogonalnih mrežah (Brunner, 2016).

Ko zaženemo program, imamo v dodatnih opcijah za numerični izračun 2D območij možnost izbire računa med navadno in poenostavljeno enačbo za gibalno količino (med Full Momentum enačbo in Diffusion Wave enačbo). V izvedenih modelih je bila izbrana poenostavljena enačba Diffusion Wave, in sicer s predpostavko, da je vpliv viskoznosti in advekcije zanemarljiv.

2.6 Negotovost pri hidravličnem modeliranju

Hidravlične analize poplav simulirajo redke in obsežne naravne pojave, zato se v njih akumulirajo tudi viri napak, ki jih lahko razdelimo glede na njihov izvor:

- vhodni podatki (topografija, pretoki),
- empirični koeficienti (hrapavost, prelivni objekti),
- pretočna krivulja na spodnjem robu,
- vpliv neopisljivih pojavov v naravi,
- uporabljen način izgradnje modela.

Pri hidravličnem modeliranju je treba v fazi vzpostavitve in umerjanja modela izvesti analizo občutljivosti, s katero se oceni natančnost oziroma toleranca izračunov in tudi stopnja zaupanja v rezultate. Iz raziskave, narejene na analizi porušitve nasipa Tous v Španiji (IMPACT, 2004), so prišli

do zaključkov, da je pri numeričnemu modeliranju porušitve nasipa priporočljivo preveriti, kakšen vpliv imajo na rezultate modela naslednji parametri (IMPACT, 2004):

- izbira numeričnega izračuna
- velikost računske celice
- izbira koeficienta hrapavosti
- oblika konice vhodnega hidrograma
- čas prihoda vala
- podatki o terenu

2.7 Postopek izdelave karte poplavne nevarnosti







Da bi določili vpliv različnih parametrov hidravličnega računa na poplavno varnost, je bil izbran kriterij stopnje poplavne nevarnosti, kot ga določa 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 (v nadaljevanju Pravilnik).

Pravilnik in 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 (v nadaljevanju Uredba) sta pravni podlagi za izpolnjevanje zahtev EU po izdelavi načrtov za obvladovanje poplavne ogroženosti. Določanje kart poplavne nevarnosti (KPN) je eden od korakov za določitev poplavne ogroženosti. Razložen bo zgolj ta segment Pravilnika, saj bo v diplomski nalogi obravnavan izreden dogodek, ki po tem predpisu spada v razred zelo majhne poplavne nevarnosti.

Potencialna poplavna nevarnost je v veliki meri odvisna od topografskih značilnosti območja. V primeru poplav na ravninskih območjih lahko že ob majhnem dvigu gladine pride do relativno velikega povečanja obsega poplavljanja. Pri poplavljanju ožjih dolin, ki so omejena s hribovjem, s protipoplavnimi nasipi, cestami in s podobnimi preprekami, pa višje gladine ne povzročijo spremembe v obsegu poplav, pač pa se poveča hitrost vodnega toka vzdolž teh območij (Rak, 2013). Zaradi različnih procesov, iz katerih izvira potencialna poplavna nevarnost Pravilnik pri določanju poplavne nevarnosti zajema tako kriterij globine vode kot tudi kriterij gibalne količine vodne mase (silo impulza) izraženo kot produkt hitrosti in globine vode.

Pri določitvi karte poplavne nevarnosti je torej treba celotno površino poplavljenega območja razdeliti na tri razrede glede na kriterij globine pri Q100, kot vidimo na sliki 10. In sicer na prvi razred, kjer so globine manjše od 0,5 m, drugi razred, kjer globine merijo od 0,5m do 1,5m, ter na tretji razred, kjer so globine večje od 1,5 m.

Glede na drugi kriterij pri Q100 določimo še območja, kjer je hitrost vode večja od 1 m²/s. Znotraj teh območij pa določimo območja, kjer je zmnožek globine in hitrosti vode manjši 0,5 m²/s oziroma med 0,5 m²/s in 1,5 m²/s, ter kjer je večji od 1,5 m²/s.

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

Slika 10: Legenda oznak na karti poplavne in erozijske nevarnosti pri pretoku Q_{100} (Pravilnik, 2007, priloga C).

V nalogi so bile opazovane spremembe posameznih razredov poplavljenega območja glede na prvi kriterij globin. Posamezno so bile analizirane spremembe razredov poplavne nevarnosti zaradi naslednjih vplivov: velikosti računskih celic, načina upoštevanja objektov, hrapavosti urbanih površin in oblike računske mreže.

3 VPLIV UPOŠTEVANJA OBJEKTOV V NASELJU NA REZULTATE HIDRAVLICNEGA MODELA ODSEKA REKE MURE

3.1 Opis obravnavanega območja

Za izdelavo analize občutljivosti je bil obravnavan 723 m dolg odsek Mure pri Gornji Radgoni ter poplavne površine Gornje Radgone s površino 0,85 km² (slika 11). Območje se začne 30 m dolvodno od mostu, kjer je nekoč stal mednarodni mejni prehod med Slovenijo in Avstrijo in obsega del Gornje Radgone, ki je najbolj ogrožen ob potencialni porušitvi obstoječega protipoplavnega zidu.



Slika 11: Lokacija obravnavanega območja in izbrano mesto porušitve zidu

Reka Mura, z izvirom v Avstriji, je mejna reka med Slovenijo in Avstrijo ter Hrvaško in Madžarsko. Dolga je 444 km in se konča z izlivom v reko Dravo. Njeno porečje je veliko 14304 km². Slovenski del porečja obsega 1393 km², hrvaški 987 km² in madžarski 1911 km², ostali del porečja, kar je več kot polovica prispevnih površin reke Mure, pa se nahaja v Avstriji. Dolžina toka od avstrijske do hrvaške meje znaša 94,90 km, od česar 67,30 km predstavlja mejni odsek s Slovenijo. Njena glavna pritoka sta Ledava in Ščavnica. Povprečni padec reke Mure je 0,21 %, povprečni padec v Sloveniji je 0,1 % in manj kot 0,06 % na mejnem odseku med Hrvaško in Madžarsko (Halcrow in Vodnogospodarski inštitut, 2000).

Mura je glavni odvodnik Pomurja, ki je območje na slovenskem delu Mure, ki leži med zgornjim hribovitim delom, gričevnatim svetom Goričkega, Slovenskih in Lendavskih goric vse do ravninskega sveta Ljutomerskega polja. Peščenoprodne naplavine Mursko-Ljutomerskega polja ter prodni zasip Apaškega polja so pomemben zbiralnik podtalnice tega območja. Na vzhodu Goričkega, predvsem na porečju reke Krke, pa prevladujeta pesek in prod, ki ju na debelo prekriva glinasta preperina. Na zahodu Goričkega in na območju Slovenskih in Ljutomerskih goric prevladujejo neprepustni laporji in peščene glinice z vložki meljastega peska (Kolbezen in Pristov, 1998).

Primerjava pretočnih režimov obdobja 1971–2000 z režimi v preteklih obdobjih odraža številne razlike. V zadnjih dveh desetletjih 20. stoletja se je močno zmanjšal vpliv snega na visokih dinarskih planotah ter v alpskih hribovskih in kotlinah, kjer se je trajanje snežne odeje močno zmanjšalo. (Dolinar et al., 2000). Mura, ki so jo vsi dosedanja raziskovalci prištevali med reke z enostavnim snežnim režimom, se je skupaj z Dravo pri novi klasifikaciji uvrstila med reke z mešanim snežnodežnim režimom. Predvsem se je zmanjšal vpliv taljenja snega, kar se odraža v neizrazitem zimskem snežnem zadržku in v skromnem spomladanskem višku, ki je v veliki meri odvisen od taljenja snežne odeje (Bat et. al, 2008).

Znotraj obravnavanega območja je 72 m pred koncem modela postavljena vodomerna postaja (VP) na površinskih vodah Gornja Radgona I. Vodomerna postaja v Gornji Radgoni je bila med prvimi na slovenskih tleh, po ohranjenih zapisih naj bi delovala že od leta 1850.

Mesto Gornja Radgona ščiti pred poplavami obstoječ visokovodni protipoplavni zid, ki je na posameznih mestih že dotrajan in predstavlja potencialno nevarnost ob visokih vodah. Na območju pri vodomerni postaji ima zid povprečno debelino 54 cm in povprečno višino 1,30 m. Absolutna višinska kota krone zidu znaša 209,14 m n.m., pri čemer je največja višina zidu 2,60 m. Na tem območju je predvidena nadzidava zidu in ojačitev temeljne pete (Sklep ARSO, 2016).

3.2 Izdelava hidravličnega modela

Hidravlični model je bil narejen v programu HEC-RAS 5.0.1. Območje struge in poplavno območje sta bila računana kot enotno območje znotraj dvodimenzionalnega modela. Za izdelavo modela so bili potrebni naslednji vhodni podatki: podatki o višini terena, rabi tal in določitev Manningovega koeficienta, hidrogram dotoka in spodnji robni pogoj. Podroben opis pridobivanja podatkov je opisan v naslednjih podpoglavjih.

3.2.1 Topografija območja

Od natančnosti vhodnih podatkov o topografiji terena je v veliki meri odvisna natančnost hidravličnega izračuna. Teren se konstantno spreminja, na primer zaradi sprememb prečnih prereзов (nanašanje ali odnašanje materiala) ali gradenj novih objektov, kot so hiše in ceste, zato je nujno upoštevati najnovejše razpoložljive podatke o topografiji.

3.2.1.1 Pridobitev podatkov

Informacije o topografiji izbranega območja so bile pridobljene iz dveh virov. Osnovni vhodni podatek o višinah terena so pridobljeni z LIDAR snemanjem. Ti podatki so javno dostopni na spletni strani Agencije RS za Okolje: <http://gis.arso.gov.si/evode/>. S pomočjo spletnega pregledovalnika je možen pregled in prenos Lidar podatkov za območja Slovenije, za katera je že izdelan georeferenciran oblak točk. Podatki so razdeljeni v skupine kvadratov velikosti 1 km².

Dostopni so naslednji produkti:

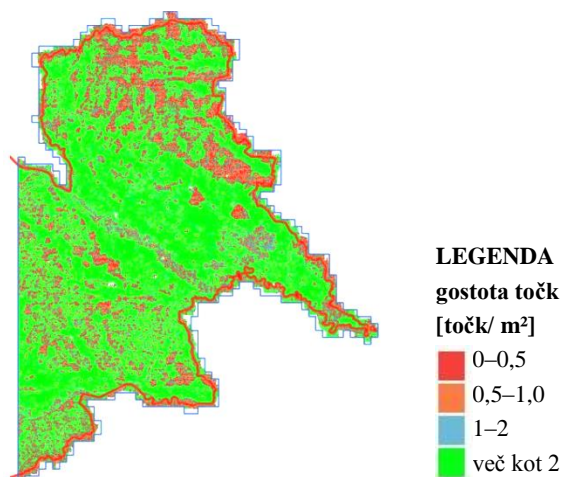
OTR – georeferenciran oblak točk reliefa je izdelek, kjer so shranjene samo točke, ki so bile klasificirane kot tla, vse ostale točke pa so pobrisane.

GKOT – georeferenciran in klasificiran oblak točk. V njem so točke razvrščene tako, da opisujejo tla, stavbe in 3 različne tipe vegetacije (nizka, srednja in visoka). Uporabnik si lahko po prenosu podatka oblak točk razvršča po svoje.

DMR – digitalni model reliefa je interpolacija reliefa na osnovi točk OTR, ki je zapisana v pravilno mrežo $1\text{ m} \times 1\text{ m}$. Shranjen je v ASCII datoteki.

Podatkovni sloji OTR in GKOT so shranjeni v zLAS obliki zapisa, ki je stisnjena oblika originalnega načina zapisa, ki je v LAS obliki (Navodila za prenos podatkov Lidar, 2016). Kvadrati v velikosti $10 \times 10\text{ m}$ so obarvani glede na gostoto, rdeča predstavlja najmanjšo gostoto, zelena pa najvišjo (Geodetski inštitut Slovenije, 2014).

Za izdelavo našega modela terena so bili vzeti podatki OTR, ki vsebujejo samo višinske točke tal. Območje hidravličnega modela pade v območje 24 (Prekmurje) in zajema 6 kvadrantov. Podatki so bili posneti od marca do junija 2014 iz višine 1200 do 1400 m nad tlemi. Iz slike 12 je razvidno, da je gostota višinskih točk večinoma večja ali enaka 2 točki/ m^2 (zelena barva).



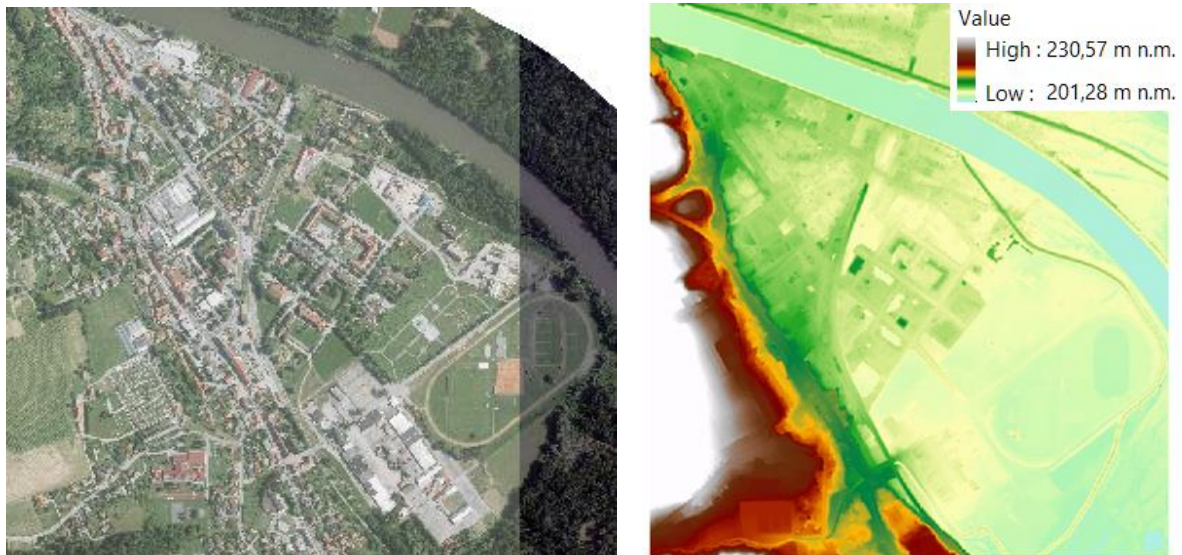
Slika 12: Porazdelitev gostote točk OTR v bloku B24 (Geodetski inštitut Slovenije, 2014, str. 19).

Za območje struge pa so bili uporabljeni podatki geodetske izmere, saj snemanje LIDAR ne omogoča merjenja višine terena (globine struge) pod gladino vode. Iz podatkov klasične geodetske izmere so bili definirani prečni profili 1D odseka reke Mure v HEC-RAS 5.0. Ti podatki so bili pridobljeni iz hidravličnega modela reke Mure, narejenega v sklopu projekta Dra-Mu-Cl, kjer so bile vzete meritve prečnih profilov iz leta 2010 (Muller, Steinman in Novak, 2011).

3.2.1.2 Priprava topografskih podatkov

Cilj diplome je bil analizirati vpliv upoštevanja zajema objektov v hidravličnem modelu. Eden od možnih načinov upoštevanja stavb v programu HEC-RAS je zajem objektov v digitalnem modelu terena DMT, kjer so nivoji ustreznih celic dvignjeni nad teren. Zato sta bila v osnovi narejena dva modela terena, pri čemer prvi ne upošteva višin hiš (temveč močno povečan koeficient hrapavosti n_p), drugi pa jih upošteva.

Iz oblaka točk OTR je bil, s pomočjo GIS orodij, izdelan model reliefa v obliki TIN mreže. Nato je bil digitalni model reliefa DMR pretvorjen v rastrsko mrežo DMT z velikostjo celice 0,1 m x 0,1 m (slika 13). Tako majhna velikost rastrske celice je bila izbrana, ker potrebujemo veliko natančnost pri upoštevanju geometrije obstoječega protipoplavnega zidu, ki ima majhno debelino. Ker raster terena definira višine točke za posamezno celico (kvadrat), je treba vzeti majhno kvadratno mrežo, če želimo, da je zid zvezno predstavljen v DMT, še posebno, ker zid poteka pod kotom glede na mrežo rastra.



Slika 13: Ortofoto (levo) in DMT (desno) iz višinskih točk obravnavanega območja.

Nova različica HEC-RAS-a omogoča ustvaritev 2D modela terena iz podatkov prečnih profilov struge. Paziti je treba, da sta levi in desni breg, v prečnih profilih 1D modela struge, označena na kraju gladine vode v času snemanja LIDAR posnetkov, saj imajo podatki iz klasične geodetske izmere manjšo gostoto podatkov od LIDAR posnetkov nad gladino vode.



Slika 14: Postopek kreiranja kombinacije rastra tal in rastra objektov.

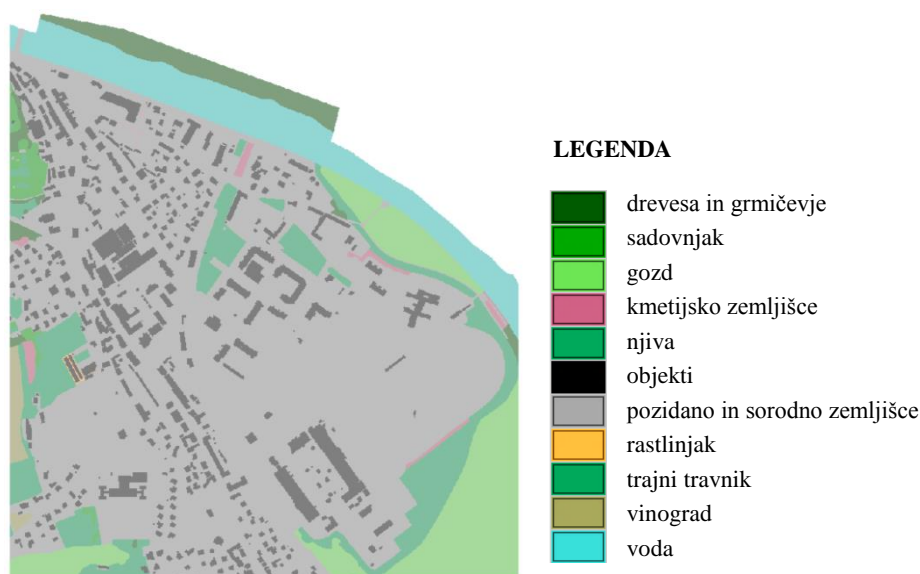
Za združenje rastra iz točk LIDAR snemanja in rastra iz struge reke lahko uporabimo HEC-RAS ali pa GIS orodja, kjer obstaja možnost kombiniranja rastrov na način, da ne pride do popačenja terena (npr. funkcija Mosaic to NewRaster v sklopu programa ArcGIS). Naslednji korak je bil nadvišanje višine v celicah z objekti in s protipoplavnim zidom v digitalnem modelu višin (DEM). To je bilo narejeno s

pomočjo novega sloja v obliki poligonov, ki so bili ustvarjeni na podlagi ortofoto posnetka terena. V sloju rabe tal so bili dodani vsi objekti, ki še niso bili označeni, in pa tudi obstoječ poplavni zid, ki ščiti mesto Gornja Radgona pred poplavami. V modelu je v zidu predpostavljena 18 m široka luknja, izbrana v najbolj izpostavljenem (statistično najšibkejšem) delu protipoplavnega zidu.

Objekti so bili spremenjeni iz poligonov v rastrsko obliko, zatem je bil ustvarjen še nov raster iz kombinacije rastra objektov in rastra, ki je kombinacija struge in LIDAR podatkov terena. Iz slike 14 vidimo rezultat, DMT brez dodanih višin objektov in DMT z dodanimi višinami objektov.

3.2.2 Raba površin in določanje hidravlične hrapavosti

Od rabe površin je odvisna hrapavost površine, na podlagi katere določimo trenjske energijske izgube, ki so v hidravličnem modelu upoštevane z Manningovim koeficientom. V HEC-RAS-u se Manningovi koeficienti za 2D območja definirajo z uvozom rabe tal kot shape file v obliki poligonov posamezne dejanske rabe prostora. Upoštevanja rabe tal se lotimo tako, da na podlagi ortofoto posnetka izbranega območja za posamezne rabe naredimo poligone različnih slojev rabe tal, tj. tloris stavb, površine travnikov, struge, gozdov itd. (slika 15).



Slika 15: Raba tal na območju Gornje Radgone.

Pri določitvi Manningovih koeficientov za strugo ter poplavne površine si pomagamo s preglednicami kot so v prilogi A, na podlagi študij, narejenih na istem območju, ter na podlagi izkušenj oziroma inženirske ocene. Med umerjanjem hidravličnega modela te koeficiente spreminjamo tako, da dobimo rezultate primerne glede na podatke meritev. Izgube, ki jih zajamemo s koeficientom hrapavosti, lahko vključujejo tudi energijske izgube zaradi lastnosti topografije in batimetrije. Eden od načinov, kako upoštevati stavbe, je, da na lokaciji stavb upoštevamo zelo velik Manningov koeficient, npr. $n_g=1$. Manningova enačba sicer v osnovi ni bila ustvarjena za modeliranje ovir v toku, vendar je eden od možnih načinov upoštevanja lokalnih ovir v hidravličnem modelu. Pri tako velikem koeficientu so hitrosti na lokacijah objektov zelo zmanjšane, vendar pa objekti niso upoštevani kot neprepustne ovire.

V literaturi lahko najdemo zelo različne Manningove koeficiente za 2D modeliranje toka po mestih in na cestiščih. Uporabljajo se Manningovi koeficienti od $n_g=0,01$ (Aronica and Lanza, 2005), $n_g=0,025$ do $0,05$ (Mignot et al., 2006) do $n_g=0,08$ (Calenda et al., 2005). V tej nalogi je bil za urbane površine, ki ne vključujejo stavb, izbran enoten Manningov koeficient $n_g=0,04$. Glede na količino ovir (npr. drevesa, avtomobili, ograje itd) je izbran koeficient morda malce podcenjen, ker je bila umeritev modela narejena le na podlagi maksimalnega obsega poplav, pri katerih je zaradi večjih globin poplavljenosti vpliv ovir relativno manjši. Za enoten n_g smo se odločili zaradi poenostavitve umerjanja, v splošnem bi bilo bolj primerno v nadaljevanju ločiti urbane površine na asfaltirane površine in na območja parkov in vrtov. Vendar pa je glavna tema te diplomske naloge način upoštevanja objektov in je zaradi števila spremenljivk izbran poenoten Manningov koeficient za vse urbane površine, ki ne vključujejo stavb.

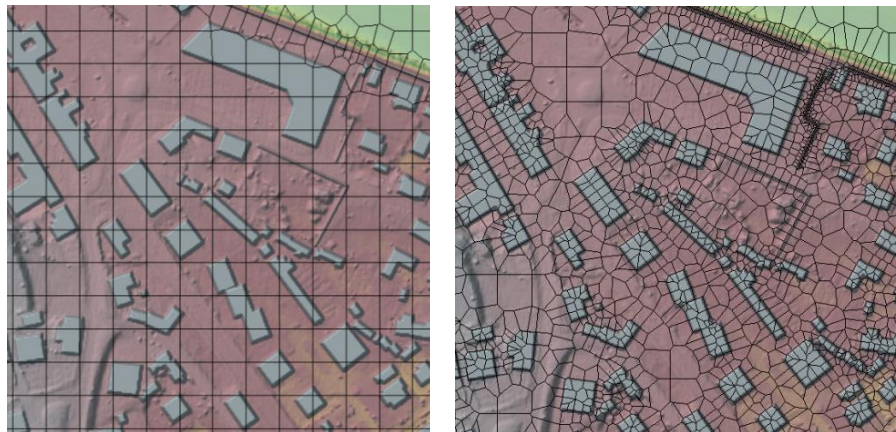
3.2.3 Ustvarjanje 2D računske mreže v HEC RAS 5.0

V novi verziji je možno uporabiti poln 2D hidravlični model ali različne kombinacije 1D–2D modela. V obeh primerih je treba narediti 2D numerično mrežo za obravnavana območja. RasMapper je v novi verziji prenovljena funkcija, kje lahko ustvarimo digitalni model terena, upoštevamo rabo tal, dodamo različne zemljevide in ortofoto posnetke. Vendar je treba poudariti, da v programu HEC-RAS ni mogoče spreminjati višine terena posameznih celic. Edini način, da spremenimo uvožen model terena, je, da ustvarimo 1D odsek reke in iz nje ustvarimo nov model terena in nato kombiniramo izbrane modele terena. Tak način je primeren za upoštevanje nasipov, ne pa tudi za dodajanje stavb v model. Torej je najbolj praktično, da je natančen model terena pripravljen v GIS programu, ki ga uvozimo v naš hidravlični model.

Obvezna podatka za kreiranje 2D območja sta:

- model terena v eni izmed oblik, ki jih HEC-RAS podpira (npr. grid file s končnico .adf)
- raba tal, ki jo uvozimo v obliki poligon shape file

Kot je opisano v navodilih programa lahko velikost, orientacija in pozicija računske mreže bistveno vplivajo na rezultate hidravličnega računa. Zato so bili za ugotavljanje vpliva velikosti računske celice narejeni modeli s tremi različnimi osnovnimi velikostmi celic, in sicer 20 m, 10 m in 6 m. Glede na orientacijo in pozicijo mreže pa sta bila pri vsaki velikosti mreže narejena dva različna načina strukturiranja mreže (slika 16). Preprosta struktura mreže je avtomatsko generirana ortogonalno za notranjost definirane območja v obliki kvadratnih računskih celic. Drug način pa je, da znotraj 2D območja definiramo linije, ob katerih se generirajo celice. Torej definiramo linije vzdolž nasipov, zidov in stavb. Urejanje pozicije celic je možno še ročno, in sicer z dodajanjem/brisanjem ali s premikanjem celice. Pri ročnem urejanju točk je treba paziti, da ustvarjene celice nimajo več kot osem stranic, in sicer zaradi hitrosti računanja. Ta omejitev lahko predstavlja problem, če želimo znotraj večjih celic zgostiti mrežo na zelo majhno velikost. V primeru, da ustvarimo celico z več kot osmimi stranicami, se prikaže opozorilo v obliki rdeče pike nad neustrezno celico.



Slika 16: Preprosta mreža na levi in natančna, zgoščena mreža ob objektih na desni risb

S temi funkcijami je ustvarjanje modela zelo preprosto in predstavlja veliko prednost pred ostalimi 2D programi za hidravlično modeliranje, saj večina drugih modelov ne omogoča poravnanje celic vzdolž pomembnih objektov, kot so na primer nasipi. Pri zgoščevanju velikosti celice je treba misliti tudi na stabilnost računa nestalnega toka glede na izbran računski korak ΔT . Manjša kot je celica, manjša je razdalja med oglišči celice ΔX in posledično dobimo večje Courantovo število:

$$C = \frac{V \cdot \Delta T}{\Delta X},$$

kjer je:

V ... hitrost toka,

ΔT ... izbran časovni korak,

ΔX ... razdalja med oglišči.

Problemi s stabilnostjo računa lahko nastanejo, kjer so hitrosti relativno velike in Courantovo število preseže vrednost 2. Takrat je treba ali zmanjšati časovni korak ΔT ali povečati velikost celice, če je možno, ne da bi se s tem zmanjšala natančnosti rezultatov. Najmanjši časovni korak, ki ga lahko izberemo v HEC-RAS-u je $\Delta T = 0,1$ s, pri katerem se čas računanja znatno poveča v primerjavi z večjimi časovnimi koraki, na primer $\Delta T = 1$ s.

3.2.4 Hidrotehnični objekti

Scenarij za poplavni dogodek je bil prevzet iz slovensko-avstrijske štabne vaje zaščite in reševanja ob poplavah na reki Muri, poleti 2014 v Radgoni. Dogodek predpostavlja, da bi ob stoletnem pretoku Q100 voda porušila en odsek betonskega zidu, ki varuje Gornjo Radgono. Voda bi vdiral skozi petnajstmetrsko odprtino v zidu in postopoma poplavljal območje v smeri proti sejmišču. Porušitev odseka betonskega protipoplavnega zidu, na sliki 17, je upoštevana tako, kot da se hipno prevrne 15 m dolg betonski blok med dilatacijami (Rak, Slokar, Steinman, 2014).

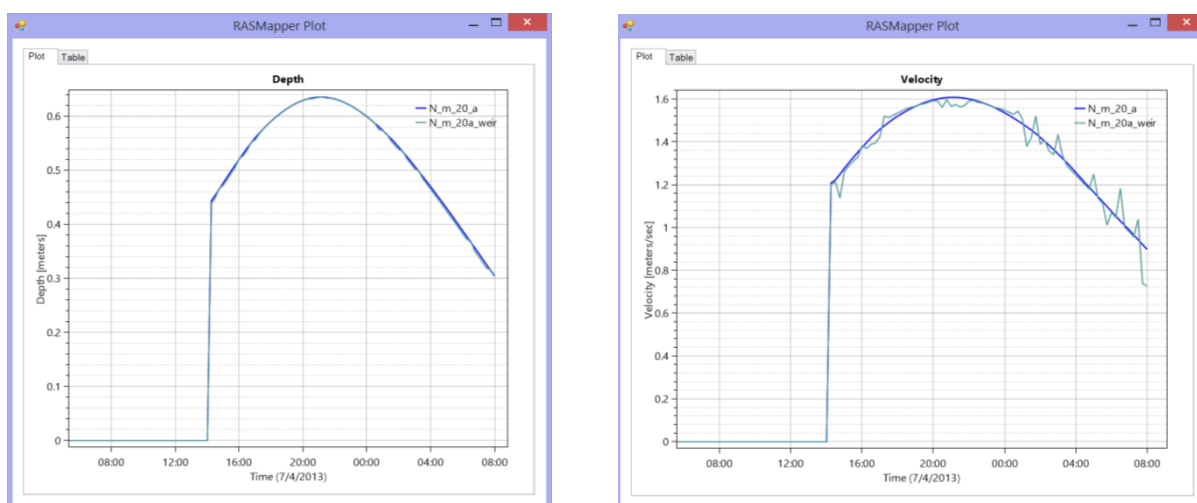


Slika 17: VP Gornja Radgona I in odprtina za dostop k strugi, ki se ob visokih vodah zatesni (foto: UL FGG, 2014).

Hipna porušitev povzroči hiter vdor vode na območje naselja, kar otežuje interventne ukrepe za postavljanje preprek (npr. vreče s peskom) oziroma za preusmerjanje vodnega toka, zato je toliko pomembnejše poznati glavne smeri in lastnosti poplavljanja, da bi lahko preventivne intervencijske ukrepe izvajali na dovolj oddaljenih lokacijah in da bi bile poznane ubežne poti oziroma nepoplavljene dostopne poti za interventne ukrepe.

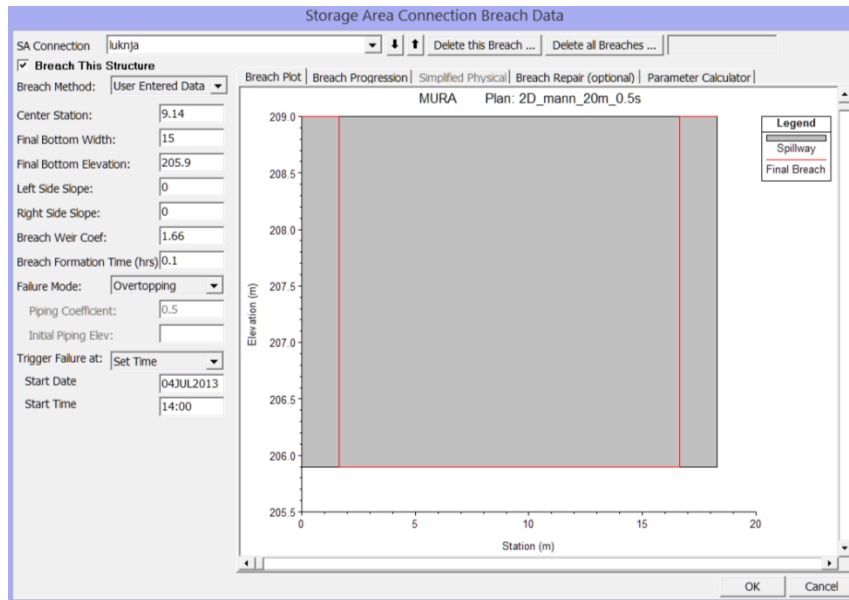
Zid je bil modeliran z nadvišanjem terena v DMT. Odprtina v protipoplavnem zidu je bila definirana znotraj 2D območja s pomočjo funkcije 2D Area Connection, kjer je bila na 15 m dolgem odseku povezava med celicami definirana kot preliv, kjer pa se voda ne preliva do izbranega trenutka porušitve. Tam tudi določimo, za kakšno vrsto povezavo gre, in izberemo, katero enačbo program izbere pri računanju toka čez preliv.

Na izbiro imamo možnost, da podamo enačbo, ki opisuje dinamiko preliivanja (Normal 2D Equation Domain), ali pa možnost, da uporabimo enačbo preliva (Weir Equation). Izbrali smo račun z Normal 2D Equation Domain, ker je bil račun v tem primeru bolj stabilen pri računu hitrosti in ker ni bilo opazne razlike pri primerjavi rezultatov izračuna po obeh načinih (slika 18).



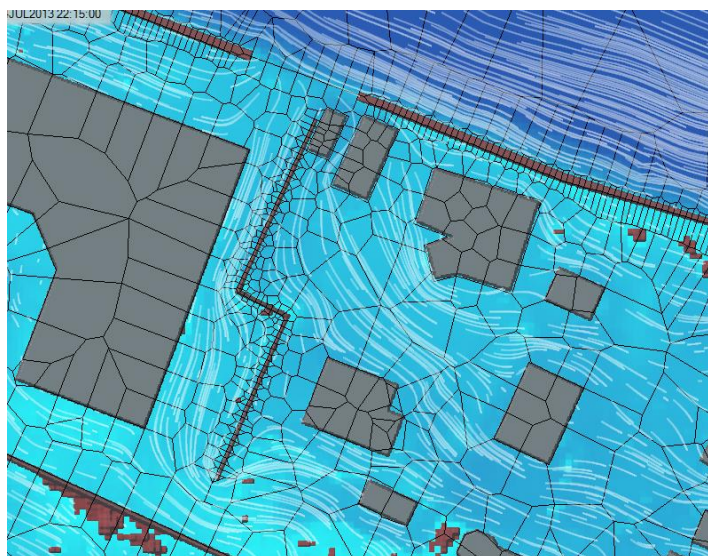
Slika 18: Primerjava globine in hitrosti v točki 1 pri prelivu, če uporabimo različni način računanja toka preko preliva, temno modra je izračun pri Normal 2D equation, svetlo modra pa pri enačbi preliva.

Modeliranje preliivanja ali porušitve zidu se definira z opcijo Breach (slika 19). Nova verzija HEC-RAS ima tudi možnost poenostavljenega računa porušitve nasipov glede na različne parametre. V naši situaciji gre za hipno porušitev betonskega zidu. V opciji Breach smo določili, da se odprtina v zidu pojavi ob 14uri 4. 7. 2013, kot je bilo simulirano v sklopu projekta Dra-Mu-CI.



Slika 19: Pogovorno okno za vnašanje podatkov o dogajanju, ko se zgodi porušitev betonskega zidu.

Nedaleč stran od luknje v zidu je na meji med zemljiščem trgovine in stanovanjskimi hišami postavljen dvometrski zid, ki je zelo ozek. Zaradi bližine pritoka vode iz Mure smo se odločili, da ga bomo modelirali kot neprepustno oviro. Zaradi majhnih dimenzij v tlorisu ni bilo možno dobro zajeti njegovega vpliva zgolj z dvigom terena, zato je v modelu upoštevan tudi kot preliv. Na ta način je bil preprečen tok skozi zid, kot vidimo iz tokovnic na sliki 20.



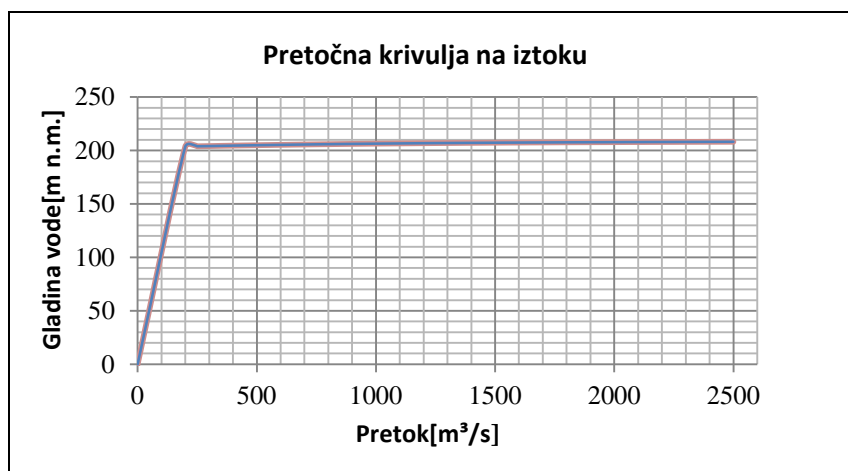
Slika 20: Potek tokovnic ob zidu v naselju, ki je postavljen prečno na porušeni del protipoplavnega zidu ob Muri.

3.2.5 Začetni pogoj – projektni pretoki

Hidrogram dotoka za poplavni dogodek smo povzeli po scenariju B, ki je bil ustvarjen v sklopu projekta Dra-Mu-Cl (spletna povezava v poglavju Viri). Hidrogram je bil določen na podlagi dejanskega hidrograma iz leta 2010 na VP Mureck, le pretoki so bili povišani tako, da je konica dosegla vrednost Q_{100} . Iz primerjave zabeleženih hidrogramov na VP Mureck in VP Gornja Radgona je mogoče ugotoviti, da konica vala potuje na tem odseku 5 ur in 50 min, velikost konice pa se vzdolž odseka zniža zaradi obvodnega poplavnega prostora za $120 \text{ m}^3/\text{s}$. Račun je narejen za obdobje dveh dni, od 3. 7. do 5. 7., oziroma v času, ko je gladina vode v strugi dovolj velika, da še doseže protipoplavni zid. Maksimum pretoka $Q=1718 \text{ m}^3/\text{s}$ je dosežen 4. 7. 2013 ob 20.49, torej skoraj 7 ur po simulirani porušitvi protipoplavnega zidu. Čas simulacij je bil skrajšan na 56ur, in sicer zaradi dolgotrajnosti računa.

3.2.6 Spodnji robni pogoj

Spodnji robni pogoj je v hidravličnem modelu podan kot pretočna krivulja, ki je bila pridobljena na podlagi hidravličnega modela reke Mure, narejenega v sklopu projekta Dra-Mu-Cl (slika 21). Omenjen projekt je zajemal širše območje – od prihoda Mure v Slovenijo pri mejnem prehodu Spielfeld-Šentilj vzdolž državne meje do Petanjcev pri Radencih. Naše območje se nahaja v sredini tega modela in je zato uporaba pretočne krivulje kot spodnjega robnega pogoja primerna. Pretočna krivulja je bila določena na podlagi uradnih podatkov iz arhiva hidroloških podatkov, ki so dostopni na spletni strani ARSO za VP Radgona I. Definiran je bil tudi naklon $I=0,1 \%$.



Slika 21: Spodnji robni pogoj, pretočna krivulja na iztoku iz 2D modela.

Zelo položna krivulja pri visokih pretokih je posledica poplavljanja obvodnega prostora Mure, ki se pojavi dolvodno od obravnavanega območja.

3.2.7 Umerjanje modela

Hidravlični model je v območju struge umerjen za visoke vode na podlagi uradne pretočne krivulje vodomerne postaje Gornja Radgona I ter na osnovi najvišjega zabeleženega vodostaja na dan 22. 08.

2005 pri pretoku $Q = 1350 \text{ m}^3/\text{s}$. Uporabljen je Manningov koeficient $n_g = 0.028$ za območje struge, na podlagi hidravličnih izračunov narejenih v sklopu projekta Dra-Mur-CI. Za umeritev je bil narejen model z modificiranim DMT, v katerem ni luknje v protipoplavnem zidu.



Slika 22: Meritve pretokov Mure na dan 22.8.2005 (Blažič S., 2005, str. 20).

Agencija Republike Slovenije za okolje ob pojavu visokih voda občasno izvede meritve pretokov in hitrosti. Ta vrsta podatkov je razmeroma redka in zato predstavlja veliko prednost pri umerjanju visokih vod. V Gornji Radgoni sta bila 22. avgusta izvedena dva niza hidrometričnih meritev z Dopplerjevim merilnikom, ki pa sta bili, zaradi visokega vodostaja in deroče Mure, oteženi (Blažič S., 2005), zato je tudi merilna negotovost večja. Pri prvem nizu meritev je bil pretok v mejah med 1200 in $1350 \text{ m}^3/\text{s}$ (hitrosti vode med $2,8$ in $3,2 \text{ m/s}$), v drugem nizu meritev med 1300 in $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ (hitrosti vode med $2,5$ in $3,0 \text{ m/s}$) (Kobold, M., 2006).

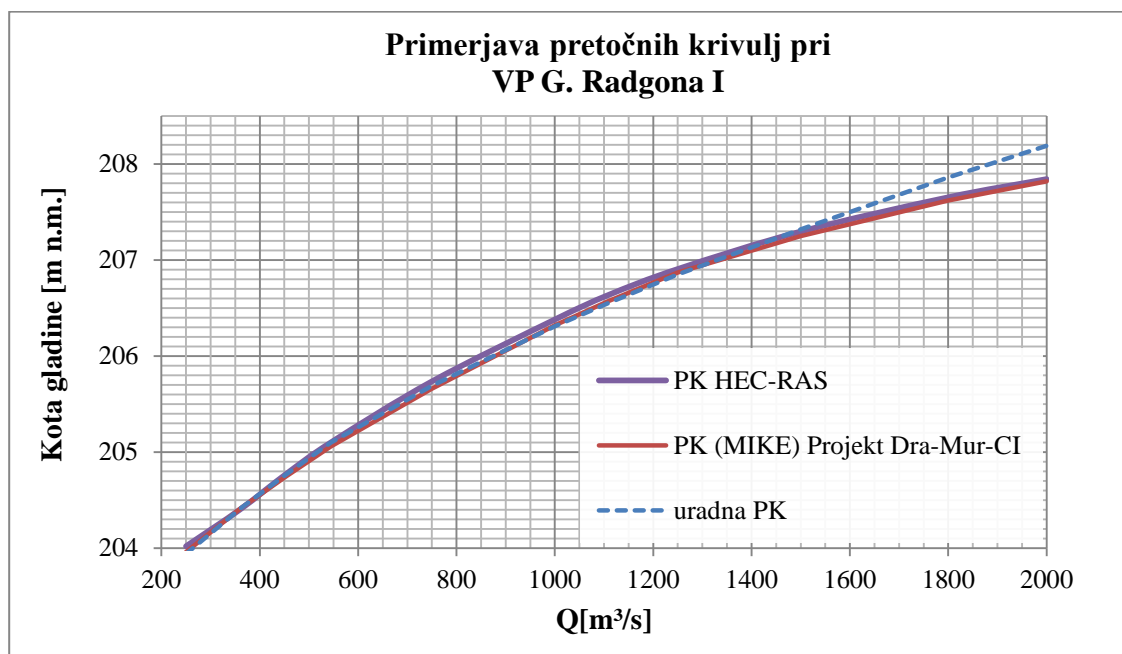
Primerjava izračunanih gladin kaže na dobro ujemanje pri večjih pretokih. Razlika med merjeno in izračunano koto pri modelu z velikostjo $20 \times 20 \text{ m}$ je 1 cm pri pretoku iz leta 2005 (preglednica 4).

Preglednica 4: Primerjava merjenih in računskih gladin visokih vod na dan 25.8.2005 v merilnem prerezu.

Meritev v M.P.	Pretok [m^3/s]	Kota gladine [m n.m.]		
		meritev	model	razlika [m]
22. 08. 2005	1350	207,16	207,17	+0,01

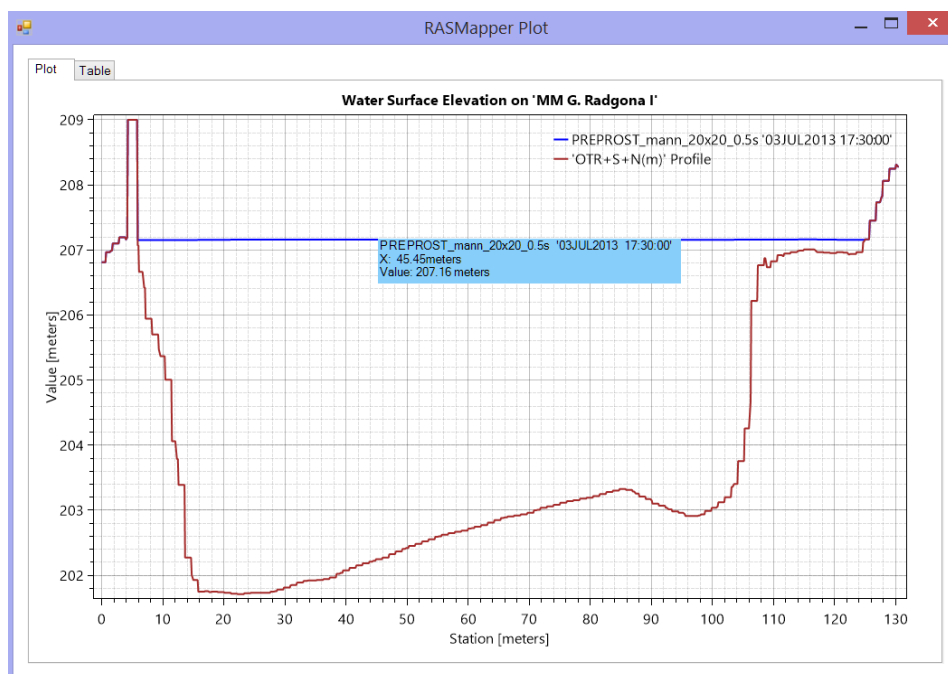
Razlika med uradno in izračunano pretočno krivuljo vodomerne postaje G. Radgona I je za pretoke, manjše od Q_{100} okoli 8 cm . Pri pretokih, ki so bistveno večji od Q_{100} , pa pride do večji razlik, in sicer do 35 cm pri $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ (slika 23). Glede na to, da primerjava z modelom narejenim v okviru projekta Dra-Mu-CI v programu MIKE Flood, kaže na dobro ujemanje izračunane pretočne krivulje, je odstopanje od pretočne krivulje verjetno posledica preliivanja visokih vod čez protipoplavne nasipe in poplavljanja območij dolvodno od merilne postaje, ki jih statistična interpolacija iz izmerjenih točk na VP ne more upoštevati.

Torej lahko rečemo, da je model na območju struge umerjen z zadovoljivo natančnostjo glede na to, da se vrednosti Manningovega koeficienta ne spreminjajo bistveno vzdolž 723 m dolgega odseka reke Mure pri Gornji Radgoni.



Slika 23: Primerjava merjenih in izračunanih gladin modela za vodomerno postajo G. Radgona I.

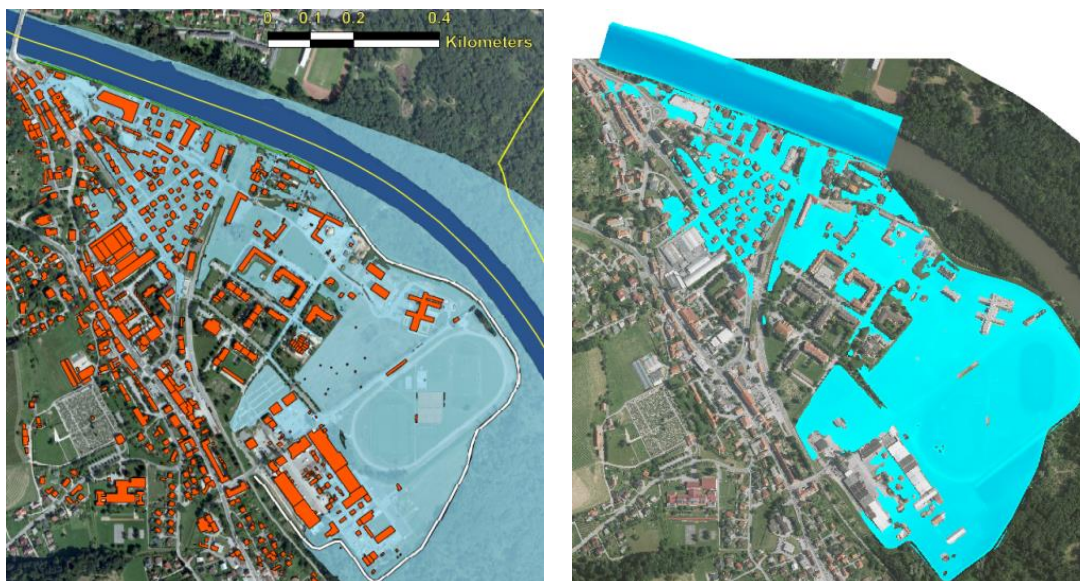
Umerjanje znotraj 2D območij si lahko olajšamo z dodajanjem opazovane lokacije pri merilnem mestu kot linijo v HEC-RAS. Ta program omogoča, da se za izbrano linijo rezultat pokaže kot graf (slika 24) in preglednica izbranih spremenljivk.



Slika 24: Prikaz vodne gladine v prečnem prerezu struge pri Vodometri postaji Gornja Radgona I.

Umerjanje modela za poplavno območje pa je bilo narejeno s primerjanjem maksimalnega obsega poplavnih površin (slika 25). Izbran je bil Manningov koeficient za urbane površine (brez stavb) $n_g=0,04$. Rezultati kažejo dobro ujemanje glede na izračune, narejene v sklopu projekta Dra-Mur-CI. Na sliki 25 je na poplavni karti iz projekta Dra-Mu-CI (levo) vrisano tudi poplavljanje reke Mure

dolvodno od spodnje meje numeričnega modela, medtem, ko je naša karta obsega poplavljanja risana le za poplavljeno območje v naselju.



Slika 25: Poplavna karta iz projekta Dra-Mur-CI(MIKE) levo, na desni karta globin v HEC-RAS.

3.3 Izdelava analiz občutljivosti za različne parametre

V nalogi je bila preverjena občutljivost rezultatov za štiri ločene parametre. Prvotno smo analizirali vpliv velikosti celic, razporeditve mreže ter vpliv načina upoštevanja objektov v modelu. Nato smo določili še vpliv velikosti Manningovega koeficienta za urbano področje (brez stavb). Za osnovni računski korak je bil zaradi razmeroma majhne velikosti celic izbran $\Delta T=0,5$ s, zato je bil čas računanja simulacije od 1 ure do 8 ur, odvisno od velikosti in števila celic.

Preglednica 5: Vhodni parametri za analizo občutljivosti.

Vhodni parametri	Osnovna vrednost	Verzija 2	Verzija 3
Osnovna velikost celic	6 x 6 m	10 x 10 m	20 x 20 m
Razporeditev mreže	natančna, zgoščena ob vseh objektih	preprosta, zgoščena mreža ob luknji v zidu	preprosta
Upoštevanje objektov	nadvišanje višine terena v celicah v DMT	$n_g=1$	/
n_g (urbane površine)	0,04	0,03	0,05

Analiza občutljivosti hidravličnega modela se je izvajala s primerjavo velikosti relativne spremembe izhodnih parametrov. Opazovani izhodni parametri so obseg in volumen poplavljenega območja, povprečna globina in hitrost vode in v zadnji fazi tudi spremembe v porazdelitvi razredov poplavne nevarnosti. Za vsak parameter je bila narejena primerjava spremembe izhodnih parametrov glede na rezultate modela z velikostjo celice 6 x 6 m, računsko mrežo definirano ob hišah, upoštevanjem hiš z zviševanjem terena in Manningovim koeficientom $n_g=0,04$ za urbane površine (preglednica 5).

3.4 Karta poplavne nevarnosti

Naš scenarij predpostavlja izreden dogodek in zato spada v razred zelo majhne poplavne nevarnosti po Pravilniku (Pravilnik, 2007, priloga C). V tem razredu so dogodki, kjer poplava nastane zaradi izrednih naravnih ali od človeka povzročenih dogodkov (npr. izredni meteorološki pojavi, poškodbe, porušitve protipoplavnih objektov ali drugih vodnih objektov). Kljub temu nas zanima, kakšen vpliv imajo različni parametri hidravličnega modela na karte poplavne nevarnosti, saj večanje in manjšanje različnih razredov globin in hitrosti veliko in nazorno pove o vplivu posameznega parametra.

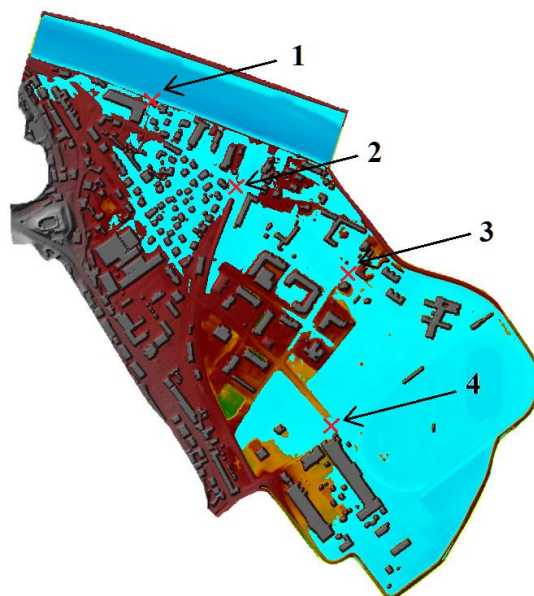
Pri določitvi karte poplavne nevarnosti je torej celotno površino poplavljenega območja treba razdeliti na tri razrede glede na kriterij globine pri Q100. In sicer na prvi razred, kjer so globine manjše od 0,5 m, drugi razred, kjer globine merijo od 0,5 m do 1,5 m, ter na tretji razred, kjer so globine večje od 1,5 m. Glede na drug kriterij pa pri Q100 določimo območja, kjer je hitrost vode večja od 1 m²/s. Znotraj teh območij pa območja, kjer je zmnožek globine in hitrosti vode manjši od 0,5 m²/s oziroma med 0,5 m²/s in 1,5 m²/s, ter kjer je večji od 1,5 m²/s.

4 PRIKAZ IN ANALIZA REZULTATOV

V nalogi je bilo analiziranih več različnih parametrov, ki lahko vplivajo na rezultate hidravličnega modela. Prikaz in del analize rezultatov je bil izdelan s pomočjo orodja RASMapper, v katerem je možno na enostaven način primerjati rezultate točkovno in linijsko. Omogoča tudi izvoz izračunanih rezultatov v rastrskem grid formatu za nadaljnjo analizo v programu ArcMAP. Ta format definira geografski prostor kot skupek kvadratov enakih velikosti celic. Vsak kvadrat predstavlja eno vrednost (npr. globino, hitrost itd.) v okviru območja, ki ga zavzema. Rezultati obsega poplav, števila omočenih celic, maksimalnih hitrosti, globin ipd., ki so izračunani v HEC-RAS-u, so torej izvoženi in analizirani v rastrskem formatu. Velikost rastrske celice rezultatov je enaka velikosti rastrske celice digitalnega modela terena (DMT), v našem primeru je to 0,1 x 0,1 m. Tako so rezultati podani neodvisno od računske mreže, ki je sestavljena iz poligonov različnih velikosti.

Analiza bo izvedena na dva načina; prvi način je z enostavno metodo ugotoviti občutljivost za vsak posamezni parameter glede na rezultate maksimalnih globin, hitrosti in njunega zmnožka. Kot je bilo razloženo v poglavju 3.3, je bila narejena primerjava spremembe izhodnih parametrov glede na referenčni model z velikostjo celice 6 x 6 m, računsko mrežo zgoščeno ob hišah, upoštevanjem hiš z nadviševanjem terena v ustreznih celicah DMT in Manningovim koeficientom $n_g = 0,04$ za urbane površine.

Analiza občutljivosti je narejena samo za maksimalne vrednosti hitrosti in globin, saj bi težko primerjali vse parametre glede na časovno odvisnost ob tako velikem številu analiziranih parametrov. Toda ti podatki ne zajemajo informacij o širjenju poplavnega vala. Iz tega razloga je za splošen vtis o zamiku potovanja poplavnega vala med modeli narejena primerjava globin in hitrosti vseh modelov na štirih izbranih lokacijah (slika 26). Iz te analize bo razvidno, kdaj in kje pride do zakasnitve širjenja poplavnega vala pri različnih parametrih. Lokacije so bile izbrane tam, kjer so večje hitrosti vode, saj tam pride do večjih razlik vrednosti.



Slika 26: Lokacije (1, 2, 3 in 4), kjer bo opazovana časovna odvisnost hitrost – čas in globina – čas.

Celotna analiza občutljivosti je narejena samo na poplavnem območju v naselju, v katerega se voda preliva preko porušenega zidu. Ta način analize je najbolj primeren, saj tako izničimo vpliv dogajanja v strugi reke, kjer je volumen vode veliko večji kot na poplavnih območjih.

Za lažjo interpretacijo rezultatov bomo vsaki verziji modela dali številno oznako primera, kot je razvidno iz preglednic 6 in 7. Referenčni primer ima številko 10. S kljukico je označeno, na kakšen način so upoštevani objekti v izbranem modelu ali s povišano hrapavostjo ($n_g=1$) ali z nadvišanjem terena na ustreznih lokacijah.

Preglednica 6: Oznake verzij modela - Preprosta mreža.

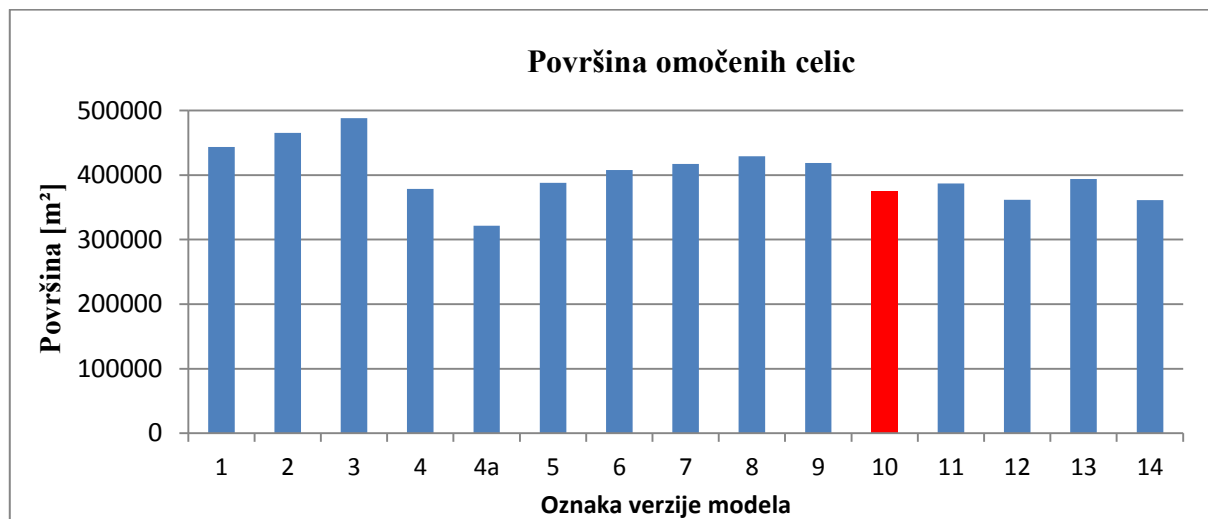
Oznaka verzije modela	Osnovna velikost celice	Upoštevanje objektov		Manningov koeficient n_g za urbane površine	Število računskih celic
		$n_g=1$	Zvišanje DMT		
1	6 x 6 m	✓		0,04	22905
2	10 x 10 m	✓		0,04	8627
3	20 x 20 m	✓		0,04	2152
4	6 x 6 m		✓	0,04	22905
4a	6 x 6 m		✓	0,04	22903
5	10 x 10 m		✓	0,04	8627
6	20 x 20 m		✓	0,04	2152

Preglednica 7: Oznake verzij modela - Natančna, zgoščena mreža ob objektih.

Oznaka verzije modela	Osnovna velikost celice	Upoštevanje objektov		Manningov koeficient n_g za urbane površine	Število računskih celic
		$n_g=1$	Zvišanje DMT		
7	6 x 6 m	✓		0,04	35828
8	10 x 10 m	✓		0,04	25532
9	20 x 20 m	✓		0,04	12222
10	6 x 6 m		✓	0,04	35828
11	10 x 10 m		✓	0,04	25553
12	20 x 20 m		✓	0,04	12222
13	6 x 6 m		✓	0,03	35828
14	6 x 6 m		✓	0,05	35828

Verzija 4a je bila narejena z namenom, da se določi, kakšen vpliv ima razporejenost mreže tik ob odprtini v protipoplavnem zidu. Od verzije 4 se razlikuje samo v tem, da ene računske celice nima razpolovljene, tako da objekt, ki se nahaja tik ob luknji, ni zajet v svoji celici (bolj natančen opis sledi v poglavju 4.1.2).

Površine poplav so bile primerjane glede na rezultate maksimalnih globin. Na spodnjem grafu (slika 27) in v razpredelnici 8 vidimo rezultate različnih verzij modela glede na obseg poplavljenih površin.



Slika 27: Omočene površine za vse izračunane verzije pri maksimalnih globinah, referenčni model (10) je rdeče barve.

Rezultati, ki so prikazani na zgornji sliki in v spodnji preglednici bodo podrobno analizirani glede na vsak posamezen vpliv, ki je bil upoštevan. Vidimo lahko, da je maksimalna razlika med narejenimi verzijami modela glede na referenčen primer 10 okoli 30 %. Največji obsegi so izračunani pri upoštevanju objektov s povišanim n_g .

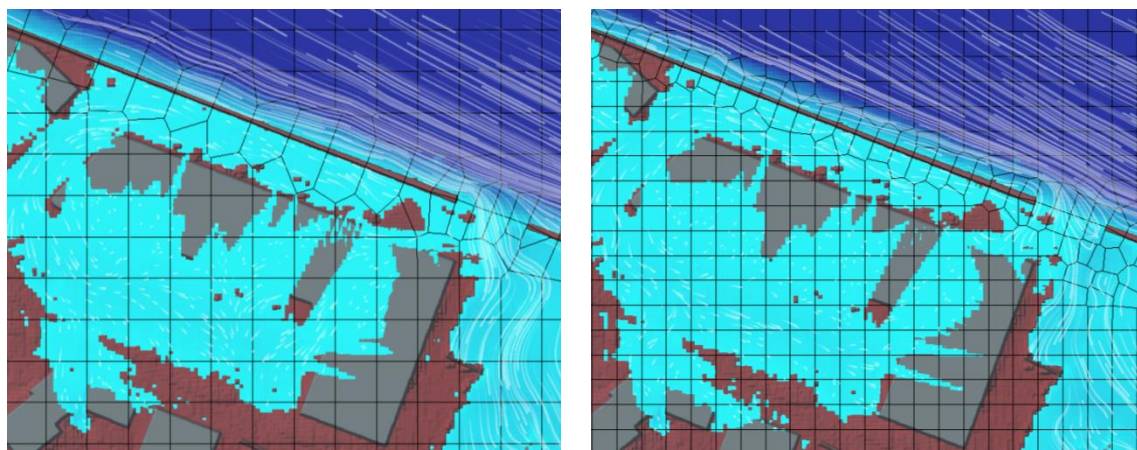
Preglednica 8: Primerjava različnosti obsega poplav glede na referenčen model.

Vrsta računske mreže in način upoštevanja objektov	Preprosta mreža		Zgoščena mreža ob objektih	
	$n_g=1$	zvišanje DMT	$n_g=1$	zvišanje DMT
Maksimalna velikost celice				
20 x 20 m	30,5%	+9,1%	+12,0%	-3,3%
10 x 10 m	24,5%	+3,7%	+14,8%	+3,4%
6 x 6 m	18,6%	+1,2%	+11,6%	0,0%
Maksimalna sprememba glede na velikost računskih celic	11,9%	7,9%	3,2%	3,4%

4.1 Vpliv velikosti računske mreže na rezultate

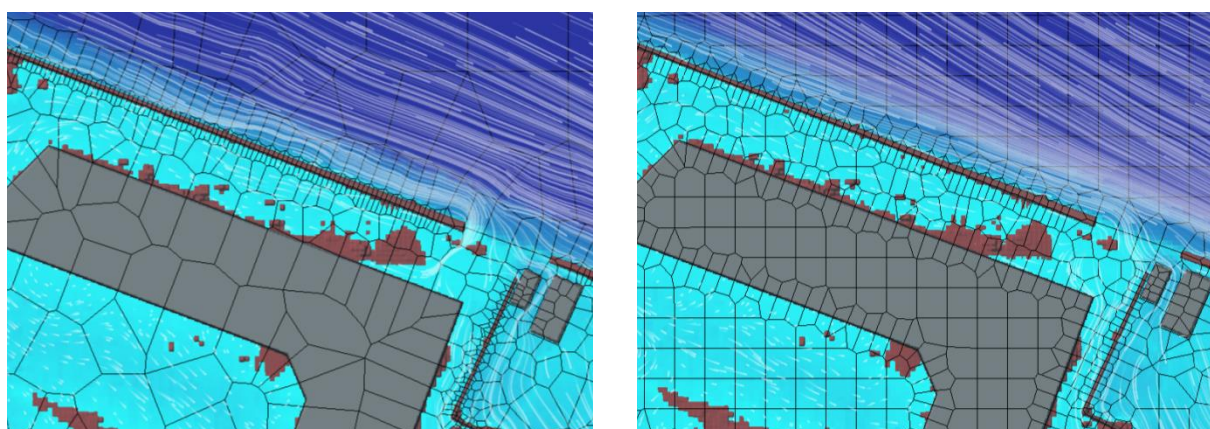
Prva naloga je bila ugotoviti, kako velik vpliv ima velikost računskih celic na rezultate. Zato so bili narejeni različni modeli z osnovnimi velikostmi celic 6 x 6 m, 10 x 10 m in 20 x 20 m. Zaradi načina upoštevanja topografije v HEC-RAS 5.0 se detajlne informacije o višinskih točkah ne izgubijo in je vpliv velikosti računskih celic manjši kot pri drugih modelih, pri kateri ena celica vsebuje samo informacijo o povprečni višini terena znotraj te celice.

Pri modelih s preprosto računsko mrežo je povprečna velikost celice dejansko blizu oznaki za velikost celice, ki jo uporabljamo, le nekoliko je zmanjšana zaradi presekanih celic vzdolž protipoplavnega nasipa (slika 28).



Slika 28: Preprosta računska mreža z velikostjo celic 20x20 m na levi in velikostjo 6x6m na desni (HEC-RAS).

Pri kreiranju natančne mreže okoli objektov pa imajo ustvarjene celice bistveno manjšo povprečno površino celice, saj ob zgoščevanju celic ob objektih nastanejo celice, ki so manjših dimenzij. To je edini preprost način, da v HEC-RAS-u ustvarimo celice, katerih stranice potekajo vzdolž mej manjših objektov, kot je na primer protipoplavni zid (slika 29). Zato so za ugotavljanje vpliva velikosti računskih celic bolj primerni modeli s preprosto mrežo.



Slika 29: Razlika med natančnimi, zgoščenimi računskimi mrežama z osnovno velikostjo celice 20 x20 m (levo) in desno 6 x 6 m (HEC-RAS).

4.1.1 Vpliv velikosti računске mreže na obseg poplave

Sprememba obsega poplavljenosti glede na velikost računске mreže je torej najbolj opazna pri preprostih mrežah, saj je dejanska velikost celic po celotnem območju enaka (slika 28).

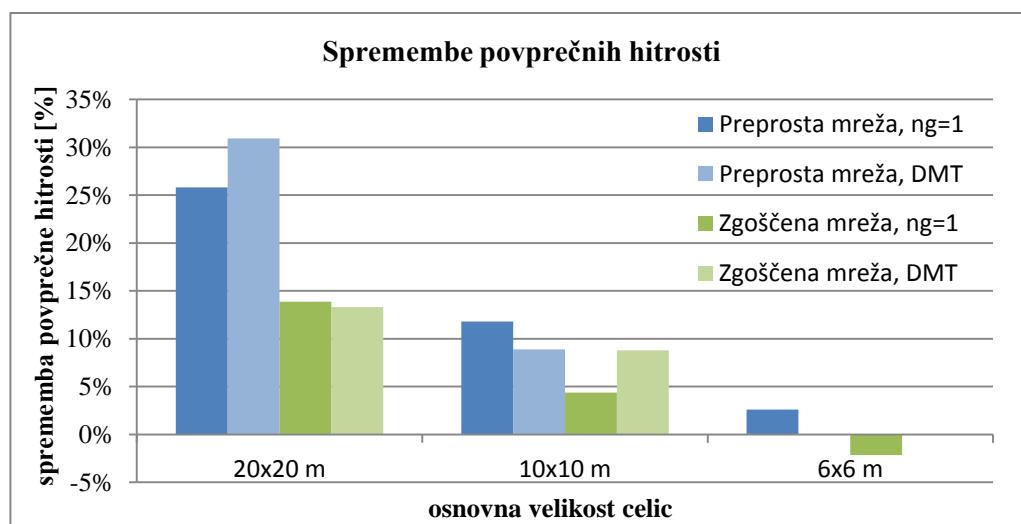
Preglednica 9: Sprememba obsega poplav glede na referenčni model z velikostjo celice 6x6m.

Velikost celice	Sprememba obsega
20 x 20 m	30,5 %
10 x 10 m	24,5 %
6 x 6 m	18,6 %
Maksimalna sprememba obsega	11,9 %

Iz preglednice 9 lahko vidimo, da je obseg poplav največji pri največjih celicah, to je pri velikosti 20 x 20 m in se z manjšanjem velikosti celic manjša. Maksimalna razlika obsega poplav med modeli z enakim načinom upoštevanja objektov in oblike celic meri 11,9 %. Do tako velike razlike pride pri modelih, ki imajo preprosto mrežo in objekte upoštevajo z uporabo hrapavosti $n_g=1$. Pri natančnih mrežah in načinu upoštevanja objektov z zvišanjem terena pa se razlike obsega poplav zaradi velikosti celic zmanjšajo, kot je razvidno iz preglednice 8.

4.1.2 Vpliv velikosti računske mreže na hitrost poplavne vode

Iz spodnjega diagrama vidimo, da so največje povprečne hitrosti izračunane pri verzijah z največjimi celicami. Iz podobnih raziskav, narejenih na hidravličnih 2D modelih, z uporabo poenostavljenih enačb za globinsko povprečne enačbe (diffusion wave) za modeliranje poplavnega toka po urbanih območjih (Yu, Lane, 2006a) opazimo, da se rezultati ujemajo, saj kažejo na to, da pride do hitrejšega napredovanja poplavnega vala pri večjih velikostih celic in tudi do večjega obsega poplav.



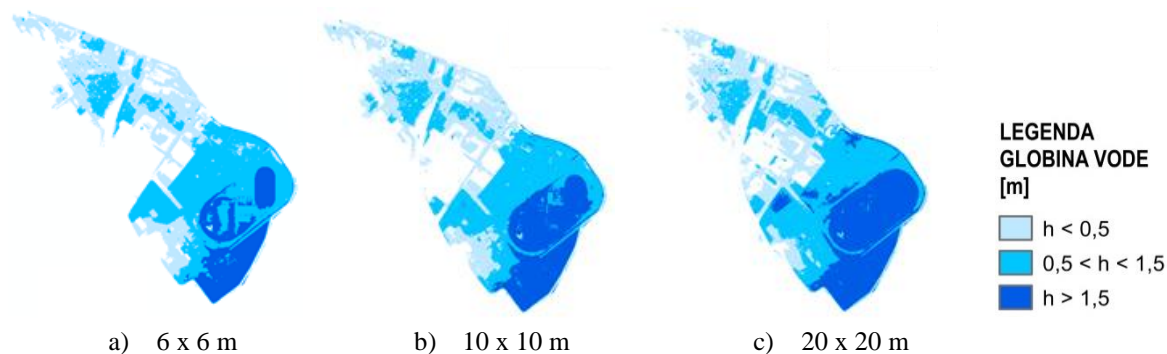
Slika 30: Spremembe povprečnih hitrosti glede na referenčni model.

Razlogov za take rezultate je več. Prvi je dejstvo, da so hitrosti izračunane na podlagi predhodno izračunanih podatkov o lastnosti podmreže v vsaki celici (hidravlični radij, naklon ...) tako, da so dobljene na osnovi povprečnih lastnosti celice, torej je vpliv ovir v celicah manjši. Zaradi posploševanja topografskih lastnosti se spremeni tudi smer toka, kar nadalje vpliva tudi na močenje in sušenje celic. Drugi razlog pa je vpliv močenja celic, ki upočasni pretok, vendar je ocena hitrosti odvisna od velikosti celice. In ker pri velikih računskih celicah pride do manjših razlik v hitrostih in gladinah vode in je možnost napake zaradi poenostavitev večja, pride do hitrejšega potovanja poplavnega vala (Yu, Lane, 2006a).

Maksimalna sprememba hitrosti glede na referenčni primer pri celicah z velikostjo 20 x 20 m znaša 30,9 %, pri velikosti 10 x 10 m je 11,8 %, pri najmanjših celicah pa je razlika manjša od 2,6 %. Tudi razpršenost rezultatov povprečnih hitrosti se manjša z velikostjo celic, kot vidimo iz slike 30. Iz tega lahko sklepamo, da so rezultati hitrosti bolj natančni pri verzijah modela z manjšimi računskimi celicami, kjer so izračunane manjše hitrosti.

4.1.3 Vpliv velikosti računske mreže na razrede poplavne nevarnosti

Pri analizi vpliva velikosti celic na razrede poplavne nevarnosti bomo primerjali modele s preprosto mrežo in upoštevanjem objektov z Manningovim koeficientom $n_g=1$, to so modeli z oznakami 1,2 in 3.



Slika 31: Primerjava sprememb površine posameznega razreda iz karte poplavne nevarnosti glede na kriterij globin in osnovno velikost računskih celic v verziji modela.

S primerjavo deležev posameznega razreda poplavne nevarnosti eliminiramo vpliv spremembe absolutnega obsega poplavljanja, zato smo opazovali le spremembo relativnih deležev posameznih razredov. Z večanjem velikosti celic se več razred z globinami nad 1,5 m na račun drugih dveh razredov. Sprememba je do 12,3 %, kar predstavlja že opazno razliko v karti poplavnih nevarnosti glede na kriterij globine (slika 31). To opozarja, da računske celice ne smejo biti prevelike.

Preglednica 10: Primerjava kart poplavne nevarnosti glede na kriterij globine pri verzijah z oznakami 1,2 in 3.

Osnovna velikost celice	Kriterij globine			Maksimalna sprememba
	6x6 m	10x10 m	20x20 m	
Skupna poplavljenost površina [ha]				
d < 0,5 m	15,5	15,7	14,8	
0,5m < d < 1,5 m	21,0	19,6	19,5	
d > 1,5 m	7,8	11,2	14,6	
Skupna površina [ha]	44,36	46,56	48,82	
Delež posameznega razreda znotraj poplavljenega območja [%]				
d < 0,5 m	35,0 %	33,8 %	30,3 %	-4,7 %
0,5m < d < 1,5 m	47,4 %	42,2 %	39,9 %	-7,5 %
d > 1,5 m	17,6 %	24,1 %	29,9 %	+12,3 %
Skupna površina	100,0 %	100,0 %	100,0 %	

Območje kjer pride do največjih sprememb, je najbolj oddaljeno od odprtine, kjer doteka poplavni val. Kakor smo videli v prejšnjem poglavju pride pri modelih z velikostjo celic 20 x 20 m, do veliko večjih povprečnih hitrosti (do 30,9 %) in zato poplavni val potuje z večjo hitrostjo in doseže bolj oddaljena območja hitreje, kjer zato pride do večjih globin v končnem času simulacije.

Drugi kriterij karte poplavnih nevarnosti se upošteva le na območju, kjer je hitrost večja od 1 m/s. V našem modelu ta pogoj izpolnjuje manj kot 1 % poplavljenega območja, zato so rezultati zelo

občutljivi, ker že majhna sprememba hitrosti spremeni delež območja, ki je sicer glede na celotno poplavljenno območje zelo majhno. Tretjega razreda nevarnosti, kjer je globina \times hitrost večja od 1,5 m²/s in hitrost večja od 1 m/s v večini analiziranih primerov sploh ne obstaja, oziroma je območje zelo majhno (maksimalno 21 m²). Zaradi navedenih razlogov primerjava vplivov različnih parametrov glede na drugi kriterij ni bila narejena, saj je območje premajhno, kot je to razvidno iz slike 32.



Slika 32: Območje, kjer je hitrost vodnega toka večja od 1 m/s pri verziji 3 (velikost celice 6 x 6 m).

4.2 Vpliv upoštevanja stanovanjskih objektov s povišanim Manningovim koeficientom ali z višinami objektov na rezultate modeliranja

V 2D hidravličnih modelih je zajem objektov običajno možen na 3 načine, in sicer s povišanim Manningovim koeficientom n_g , z zviševanjem terena v DMT ali z izločanjem računskih celic na lokaciji objektov. Program HEC-RAS omogoča prvi dve opciji, tretje pa ne, ker mora biti računsko 2D območje brez lukenj. Ena izmed prednosti programa je v tem, da upošteva vertikalne stene v DMT ter na tak način upošteva tudi trenje, ki ga ima tok ob stenah vertikalnih objektov.

Pri poplavih na naseljenih površinah običajno lahko pride tudi do poplavljanja notranjosti objektov čez odprtine v stavbah. Tako, da bi s stališča volumna lahko bila verzija modela s povišanim n_g morda bolj primerna. Vendar pa potek tokovnic vzdolž urbanih območij bolj natančno opišejo modeli, ki upoštevajo zunanje stene objektov kot neprehodne ovire, kar v HEC-RAS-u modeliramo z nadvišanjem terena v DMT. Na ta način so namreč jasno definirana območja, kje voda lahko teče in kje ne.

4.2.1 Vpliv upoštevanja stanovanjskih objektov s povišanim Manningovim koeficientom ali z višinami objektov na obseg poplave

Pri upoštevanju objektov s povišanim Manningovim koeficientom n_g torej pride do višjih obsegov poplav, saj so območja stavb omočena, medtem ko pri modelih z zvišano višino terena v DMT ostanejo suha. Za določanje vpliva na obseg poplavljenosti smo izračunali, kakšen delež poplavljenega območja predstavljajo poplavljene hiše v modelu z oznako 7, ki ima enako računsko mrežo (6x6 m) kot referenčni model, le objekti so modelirani s povečano hrapavostjo $n_g=1$.

Izkazalo se je, da delež obsega poplav, ki se nanaša na tloris objektov, predstavlja 8,0% celotnega poplavljenega območja pri modelu 7. Glede na to, da je bila razlika obsega poplav med verzijo 7 in referenčnim primerom 11,6 % (preglednica 11) pomeni, da se je obseg tudi izven območja hiš povečal za 2,7 % glede na referenčno verzijo. Če upoštevamo količino in lokacijo objektov v izdelanih modelih, lahko vidimo, da pri modelih z večjimi celicami odstotek hiš predstavlja še manjši delež celotnega obsega poplav in torej povečanje obsega poplav ni odvisno samo od deleža objektov v modelu.

Preglednica 11: Primerjava deleža spremembe obsega poplav glede na odstotek, ki ga zasedejo tlorisi objektov glede na referenčno verzijo, ki ima velikost celic 6 x 6 m in upošteva objekte v DMT.

	Verzija 10 (DMT)	Verzija 7 ($n_g=1$)	Sprememba glede na referenčno verzijo 10 [%]
Celoten obseg poplav [ha]	37,4	41,7	+11.6 %
Obseg poplav na lokaciji hiš [ha]	0	3,3	/
Obseg poplav brez upoštevanja hiš [ha]	37,4	38,4	+2.7 %

Kot smo videli v poglavju o vplivu velikosti celic prihaja do največjih razlik med modeli pri največji velikosti celic (20x20 m). Zato smo v preglednici 12 naredili primerjavo obsega modelov s to velikostjo. Opazimo, da je pri preprosti mreži razlika med načinoma upoštevanja objektov izražena kot maksimalna sprememba med obsegom poplav, 21,4 %. Časovni potek naraščanja obsega poplav za ta dva primera je priložena v prilogi E.

Preglednica 12: Primerjava deleža spremembe obsega poplav za verziji modela z velikostjo celic 20 x 20 m glede na referenčni primer, ki ima velikost celice 6 x 6 m in upošteva objekte v DMT.

Način upoštevanja objektov	Preprosta mreža
$n_g=1$	30,5 %
DMT	9,1 %
razlika	-21,4 %

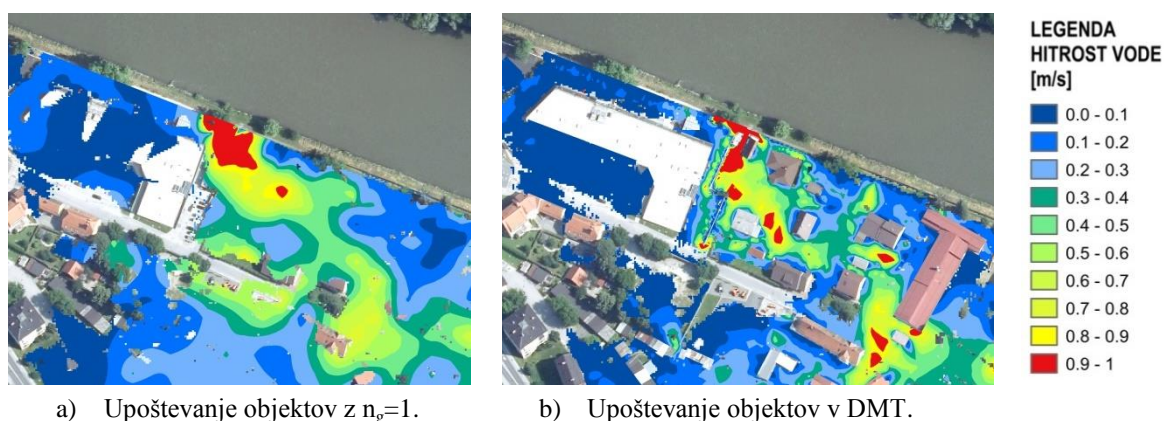
4.2.2 Vpliv upoštevanja stanovanjskih objektov s povišanim Manningovim koeficientom ali z višinami objektov na hitrost poplavnne vode

Rezultati povprečnih hitrosti so zelo odvisni od velikosti računskih celic, tako da ni možno narediti povezave med načinom upoštevanja objektov in povprečno hitrostjo. Vendar pa si lahko iz primerjave slik hitrostnih polj ogledamo, kako se spremeni potek hitrosti pri dotoku skozi luknjo v zidu. Hitrosti so tam namreč najvišje in so zato razlike najbolj opazne v tem območju.

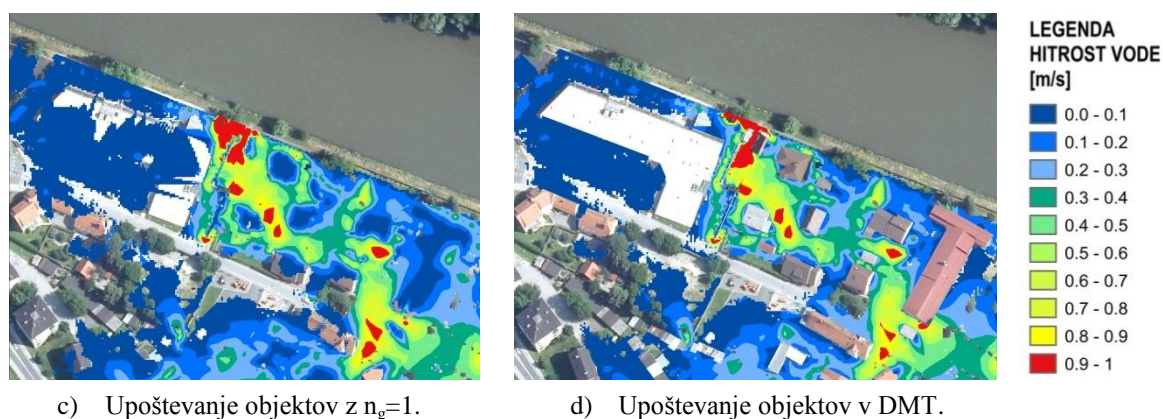
Preglednica 13: Odstopanje povprečne hitrosti pri posamezni varianti upoštevanja objektov glede na referenčni primer z velikostjo celice 6 x 6 m, zgoščeno mrežo in z upoštevanjem objektov v DMT.

velikost celice	Preprosta mreža		Zgoščena mreža ob objektih	
	$n_g=1$	DMT	$n_g=1$	DMT
20 x 20 m	25.8 %	30.9 %	13.9 %	13.3 %
10 x 10 m	11.8 %	8.9 %	4.4 %	8.8 %
6 x 6 m	2.6 %	0.0 %	-2.1 %	0.0%

Iz grafičnih rezultatov vidimo, da pri večjih računskih celicah, 20 x 20 m (slika 33 levo), pride do večjih sprememb poteka hitrosti na poplavnih površinah v okolici objektov. Ko so objekti definirani z velikim Manningovim koeficientom $n_g=1$ je potek hitrosti bolj enakomerno razporejen pri večjih računskih celicah. Pri modelih z zvišanim terenom v DMT pa se potek hitrosti pričakovano spremeni, saj lahko vodni tok teče le med objekti. Iz spodnje slike vidimo, da je območje večjih hitrosti bolj natančno izračunano, ko objekte upoštevamo z zvišanjem terena v DMT (slika 33).



Slika 33: Primerjava rezultatov maksimalnih hitrosti pri modelih z velikostjo računske celice 20 x 20 m. Levo je model št. 9, na desni pa model št. 12.

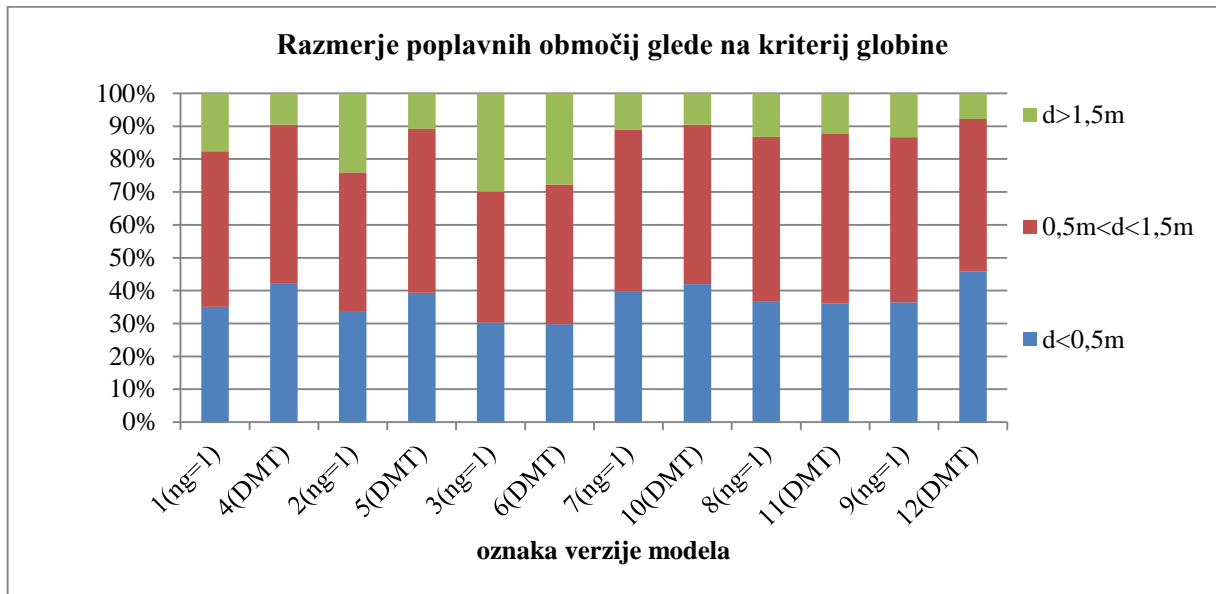


Slika 34: Primerjava rezultatov maksimalnih hitrosti pri modelih z velikostjo računske celice 6 x 6 m. Levo je model št. 1, desno pa model št. 4.

Kot je razvidno iz slike 34, je pri modelih z manjšo računsko celico vpliv načina upoštevanja objektov manj opazen, saj se tudi pri modelih, ki upoštevajo objekte z $n_g=1$, razpored hitrosti približa rezultatom modela, ki upošteva višino hiš. Lokacije maksimalnih hitrosti so torej pri modelih z manjšimi celicami dovolj natančno opisane tudi, če objekte upoštevamo samo z Manningovim koeficientom $n_g=1$.

4.2.3 Vpliv upoštevanja stanovanjskih objektov s povišanim Manningovim koeficientom ali z višinami objektov na razrede poplavne nevarnosti

V spodnjem grafikonu si verzije modela sledijo tako, da prvi model upošteva objekte z $n_g=1$, model ki mu sledi, pa ima enako računsko mrežo, le objekti so upoštevani v DMT.

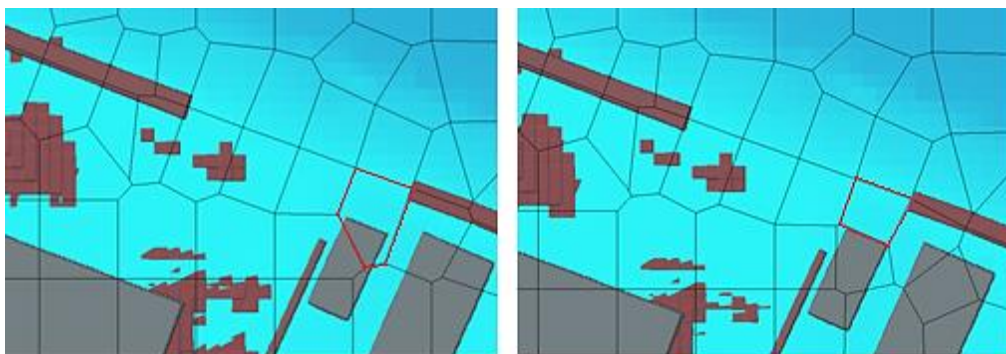


Slika 35: Razmerje poplavnih območij glede na kriterij globine pri posameznih variantah modela.

Vidimo lahko, da se pri modelih, kjer so objekti upoštevani z DMT, delež površin v razredu največjih globin (nad 1,5 m) vedno zmanjša v primerjavi z modeli, ki upoštevajo objekte z $n_g=1$. Sprememba deleža v območju, kjer je globina nad 1,5 m, se zmanjša od 13,2 % do 1,1 %.

4.3 Vpliv oblike mreže na rezultate

Vpliv razporejenosti mreže ima največji vpliv tik ob prelivanju vode skozi porušen zid, saj so tam največje hitrosti. Zato smo vzdolž 18 metrske povezave znotraj 2D območja definirali celice tako, da so v vseh modelih štiri celice vzdolž luknje. Torej je širina celic tik ob prelivu približno 4,5 m. Tako velikost smo izbrali predvsem na podlagi zagotavljanja stabilnosti računa nestalnega toka.



Slika 36: Na levi strani je računsko mrežo modela pri katerem celica ob prelivu vsebuje dvignjen teren objekta (model št. 4a), na desni strani je računsko celica ob hiši razdeljena na dva dela (model št. 4).

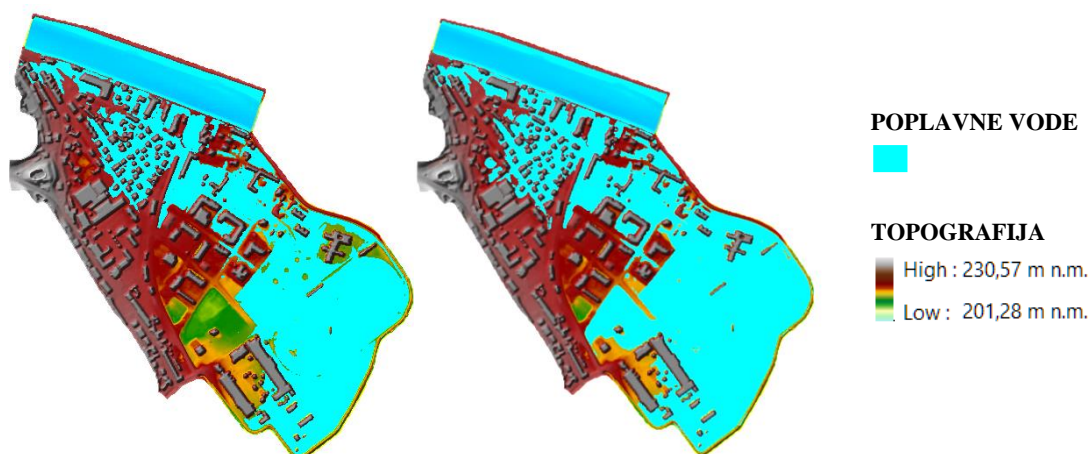
Ko smo postavljali model, smo videli, da pride do velikih sprememb v rezultatih, če ena izmed teh celic ob protipoplavnem zidu vsebuje del dvignjene kote terena zaradi upoštevanja hiše v svojem območju. Obseg poplav je v tem primeru bistveno manjši predvsem v najbolj oddaljenem delu poplavnega območja (slika 36). Zmanjša se tudi povprečna globina, in sicer za 17,1 cm, kar

predstavlja 23 % zmanjšanja povprečne gladine, volumen na poplavnem območju pa se zmanjša za neverjetnih 35 %. To je logično, saj geometrija hiše "duši" dotok skozi odprtino, čeprav je dejansko odmaknjena od betonskega zidu.

Zaradi velikih razlik v rezultatih smo v vseh verzijah modelirali računsko mrežo tik ob luknji v protipoplavnem zidu, na način, kot je prikazan na desni strani slike 36, to je z dodajanjem celice za območje stavbe.

4.3.1 Vpliv oblike mreže na obseg poplave

Kot smo že opisali, je razporejenost mreže povezana tudi s povprečno velikostjo celic in je zato težje ugotoviti vpliv tega parametra neodvisno od velikosti celic. Sprememba zaradi oblike mreže je torej najbolj očitna, če primerjamo verziji 4 in 4a, saj tako eliminiramo vpliv velikosti celic. Obseg poplav se poveča za 15,1 % v primeru 4, torej če je objekt ob porušenem protipoplavnem zidu v svoji računski celici in ne moti dejanskega opisa razmer na profilu porušenega betonskega zidu.



Slika 37: Razlika med maksimalno omočenostjo modela, če spremenimo velikost ene celice pri prelivu skozi porušeni protipoplavni zid: desno verzija 4a, levo verzija 4.

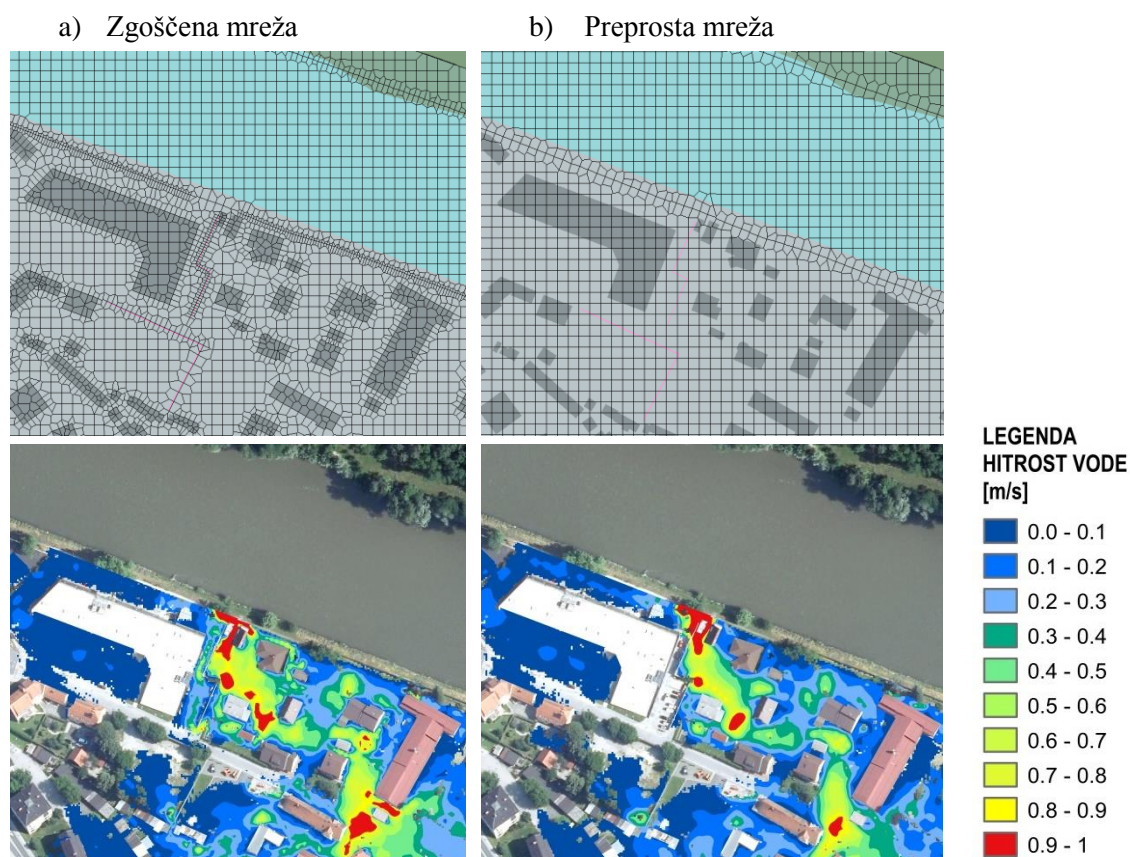
Na sliki 37 lahko opazimo razliko poplavljenosti med obravnavanima verzijama modela na skrajnem ravninskem delu, kjer je na levi sliki nepoplavljen teren obarvano zeleno, pri desni strani pa je ta del urbanega območja poplavljen (modra barva).

4.3.2 Vpliv oblike mreže na hitrost poplavne vode

Pri primerjavi verzij 4 in 4a vidimo, da je tudi povprečna hitrost manjša za 9,8 %, če objekt ob protipoplavnem zidu ni zajet v svoji računski celici. Območje, kjer je hitrost vodnega toka večja od 1m/s, pa se v istem primeru zmanjša za 44,2 %, ker je stavba ravno na lokaciji, okoli katere so sicer dejanske največje hitrosti.

Vpliv zgoščene računске mreže na razpored hitrosti:

Glede razporeda hitrosti pride do manjših razlik med rezultati za preprosto in natančno računsko mrežo pri modelih z velikostjo računskih celic 6 x 6 m. Iz slike 38 vidimo, da se pri modelih z natančno mrežo povečajo območja, kjer je maksimalna hitrost večja od 0,4 m/s. Modeli z večjimi računskimi celicami niso bili primerjani, ker je tam vpliv velikosti celic prevelik.



Slika 38: Primerjava rezultatov maksimalnih hitrosti pri modelih z velikostjo računske celice 6 x 6 m in z upoštevanjem objektov v DMT. Levo je model št. 10 (natančna mreža), na desni model št. 4 (preprosta mreža).

4.3.3 Vpliv oblike mreže na razrede poplavne nevarnosti

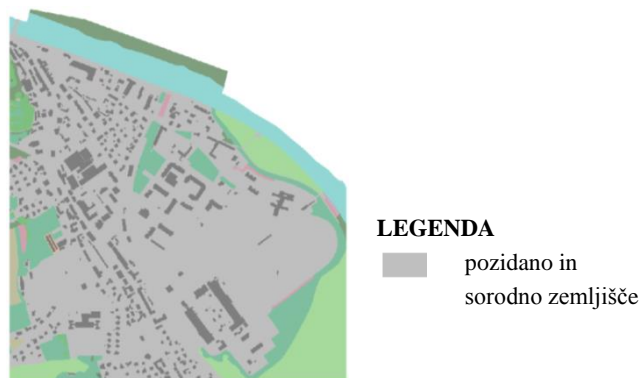
Iz preglednice 14 vidimo, da pride do velike razlike na območju, kjer so globine večje od 1,5 m. Do takega rezultata pride, ker so hitrosti in povprečne gladine v primeru 4a manjše in se zato bistveno zmanjša tudi območje večjih globin.

Preglednica 14: Sprememba razredov poplavnih nevarnosti za 1. kriterij karte poplavnih nevarnosti pri verzijah modela 4 in 4a.

	Primer 4	Primer 4a	razlika
Razred globine	[ha]	[ha]	
d < 0,5 m	15,9	16,9	+6.1 %
0,5 m < d < 1,5 m	18,3	13,9	-24.2 %
d > 1,5 m	3,6	1,4	-62.1 %
Celotna površina	37,9	32,2	-15.1 %

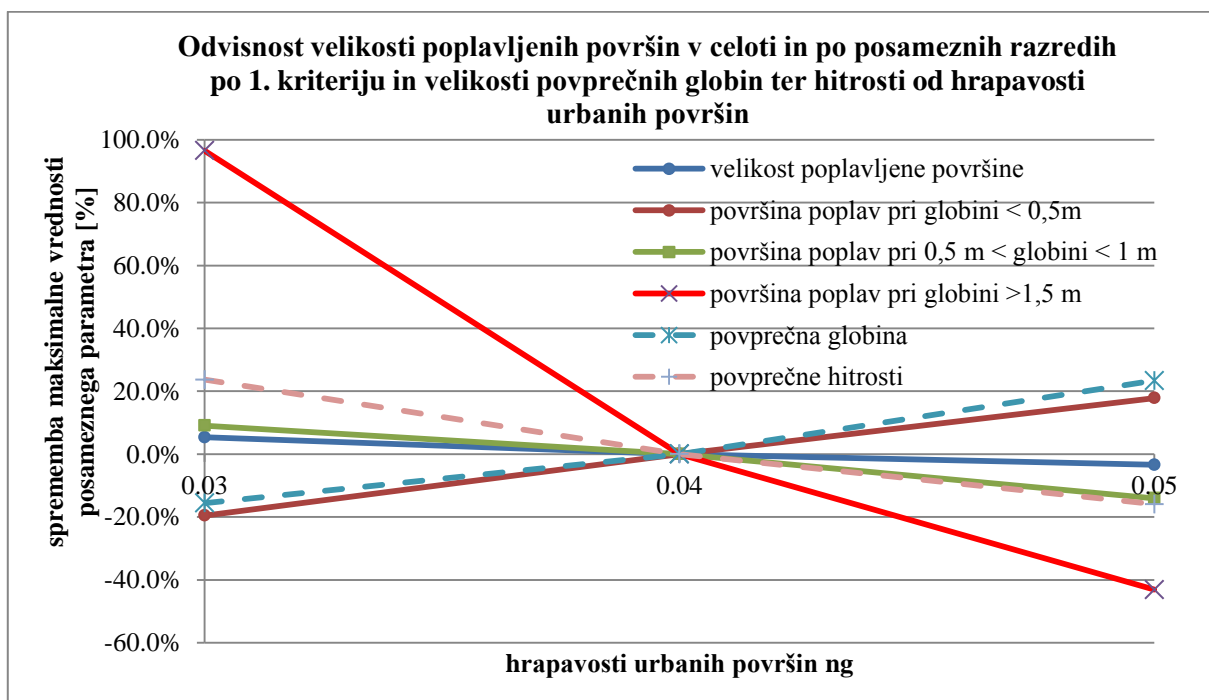
4.4 Vpliv Manningovega koeficienta n_g na celotnem območju urbanih površin (objekti izvzeti) na obseg, globine, hitrosti ter razrede poplavne nevarnosti

Iz Manningove semiempirične enačbe, ki podaja odvisnost med pretokom, hitrostjo in globino vode, vidimo, da se pri enakem pretoku in pretočnem prerezu z manjšanjem hidravlične hrapavosti povečuje hitrost vode in posledično zmanjšuje njena globina. Na območjih poplavnih površin je ta enačba tudi upoštevana, torej je pričakovano, da bo pri zmanjšanju Manningovega koeficienta n_g prišlo do večjih hitrosti in manjših globin, pri zmanjševanju pa ravno obratno.



Slika 39: Območja, v katerih smo spremenili n_g za urbana območja, ki ne vključujejo objektov.

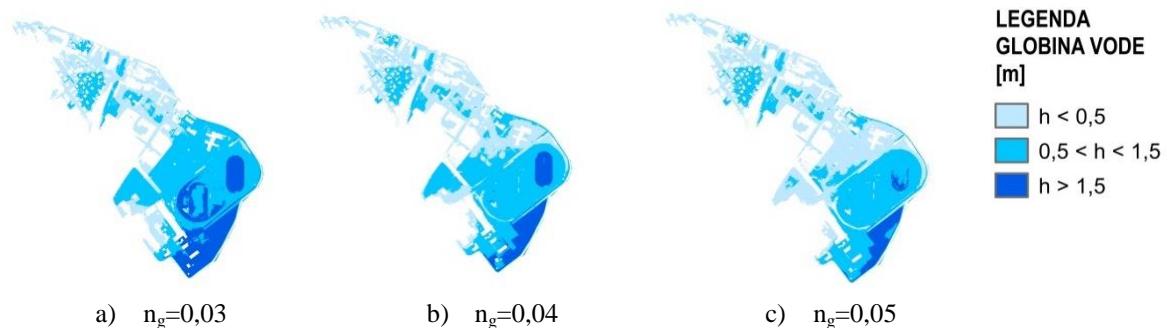
Za analiziranje vpliva Manningovega koeficienta n_g na urbanih površinah smo ustvarili dva dodatna modela, ki imata oznaki 13 in 14 in velikost celic 6 x 6 m. Na območju urbanih površin, ki ne zajemajo območij stavb (slika 39), je bila osnovna vrednosti $n_g=0,04$ spremenjena na $n_g=0,03$ oziroma na $n_g=0,05$. Območja direktno pod stavbami pa so upoštevana z zviševanjem terena v celicah v DMT.



Slika 40: Odvisnost velikosti poplavljenih površin v celoti in po posameznih razredih po 1. kriteriju Pravilnika ter povprečnih globin in hitrosti od hrapavosti urbanih površin.

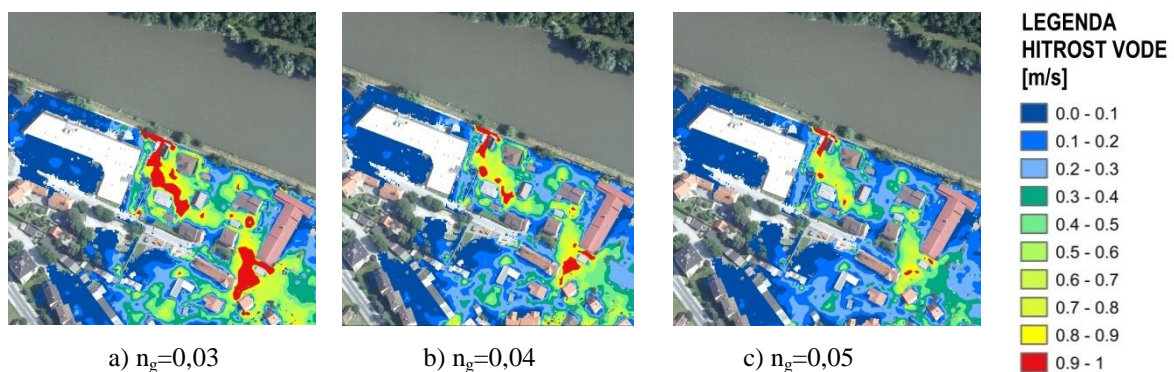
V diagramu (slika 40) je zajet vpliv spremembe Manningovega koeficienta n_g na velikosti poplavljenih površin v celoti in po posameznih razredih po 1. kriteriju in na velikosti povprečnih globin ter hitrosti.

Vpliv na obseg poplav je izmed preverjenih parametrov najmanjši pri spreminjanju koeficienta hrapavosti. Obseg se pri modelu z vrednostjo Manningovega koeficienta $n_g=0,03$ poveča za 5,4 %, pri $n_g=0,05$ pa zmanjša za 3,4 % glede na referenčen model, ki upošteva Manningov koeficient $n_g=0,04$. Pričakovano se tudi povprečna hitrost vodnega toka poveča za 23,7% pri modelu z $n_g=0,03$ in zmanjša za 15,9 % pri modelu z $n_g=0,05$. Do največjih sprememb pride v obsegu območij z največjimi globlinami (nad 1,5 m), kar vidimo na sliki 41. Pri modelu z manjšo hidravlično hrapavostjo ($n_g=0,03$) se to območje poveča za 96,6 % glede na referenčni primer. Pri večji hidravlični hrapavosti ($n_g=0,05$) pa se območje, kjer je globina večja od 1,5 m, zmanjša za 43,1 %.



Slika 41: Primerjava razredov poplavne nevarnosti po 1. kriteriju Pravilnika za različno hrapavost urbanih površin.

Iz slike 42 je razvidno, da se hitrostno polje s povečanjem hidravlične hrapavosti opazno spremeni. Dotok vode v model je namreč omejen skozi 15-metrsko luknjo v protipoplavnem zidu, zaradi česar pride do velikih hitrosti le v okolici dotoka ter na drugih manjših območjih. Zato območje, kjer so hitrosti večje od 1 m/s, vedno predstavlja manj kot 1% celotnega poplavljenega območja.



Slika 42: Primerjava polja hitrosti, kot podatek za 2. kriterij, za različno hrapavost urbanih površin.

Pri hidravlični hrapavosti urbanih površin $n_g=0,03$ je območje, kjer so hitrosti vodnega toka večje od 1 m/s, veliko 0,71 % celotnega poplavljenega območja. S povečanjem hidravlične hrapavosti iz $n_g=0,04$ na $n_g=0,05$ pa delež površin s hitrostmi vodnega toka nad 1 m/s predstavlja le 0,07 % območja.

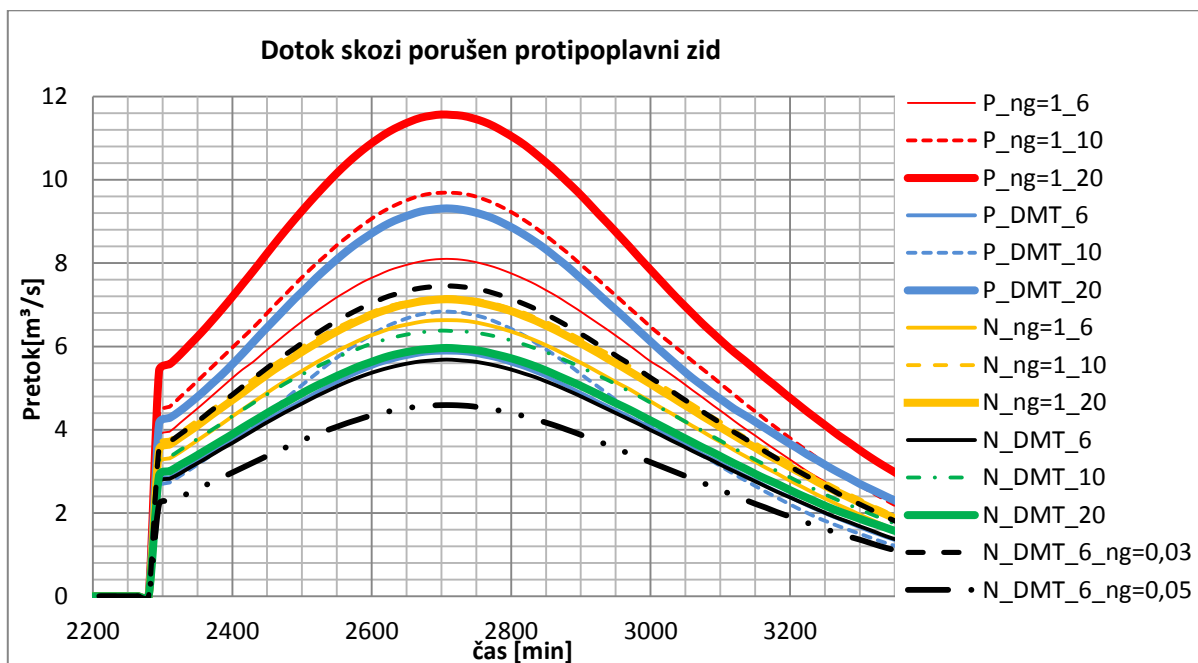
4.5 Vpliv parametrov na širjenje poplavljanja znotraj urbanega območja

Zaradi velikega števila modelov smo se odločili opazovati potovanje vala pri štirih točkah znotraj 2D območja, kjer bomo analizirali zamik prihoda konice poplavnega vala. Za boljšo predstavbo smo grafe različnih modelov razporedili po barvah in debelinah črt. Debelejše črte predstavljajo večje računске celice, verzije ki upoštevajo objekte z Manningovim koeficientom $n_g=1$, so rdeče in oranžne barve, verzije, ki upoštevajo objekte z zvišanim terenom v DMT pa so modre in zelene barve (glej preglednico 15). Referenčna verzija z velikostjo celice 6 x 6 m in z upoštevanjem objektov z zvišanjem terena je predstavljena s polno črno črto. Verziji 13 in 14, to sta modela s spremenjenim n_g za urbane površine brez objektov, sta označeni s črno debelo črtkano črto.

Preglednica 15: Legenda za verzije modelov.

Maksimalna velikost celice	Vrsta računске mreže in način upoštevanja objektov	Preprosta mreža		Zgoščena mreža ob objektih	
		$n_g=1$	zvišanje DMT	$n_g=1$	zvišanje DMT
20 x 20 m					
10 x 10 m					
6 x 6 m					

Globine in hitrosti so sicer zelo odvisne od detajlov v topografiji, tako da jim ne bomo dajali preveč poudarka, zanima nas predvsem, kako različni parametri delujejo na zamik potovanja poplavnega vala. Vidimo, da so razlike v količini dotoka na poplavno območje izjemno velike, pretok pri verziji z velikostjo celice 20x20 m in z upoštevanjem objektov z Manningovim koeficientom je skoraj trikrat večji od modela 14, ki ima povišano hrapavost za urbana območja (slika 43).



Slika 43: Hidrogram dotoka skozi porušen protipoplavni zid.

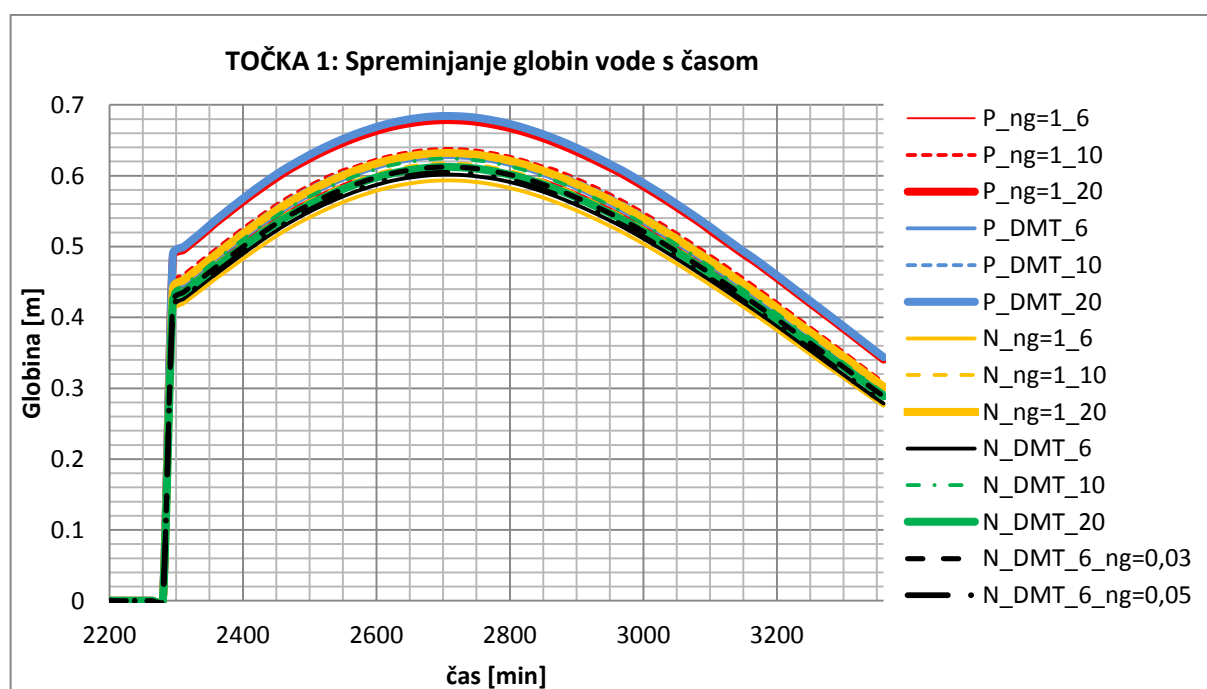
Razlogi za takšne razlike so opisani pri analizi vpliva velikosti celic, pri večjih celicah se namreč izračunajo večje hitrosti, gladine pri vtoku pa so le malenkost višje. Zato je pričakovano, da pride pri modelih z večjimi celicami do večjega pretoka. Opazimo tudi, da so pretoki največji pri upoštevanju objektov s povišanjem Manningovega koeficienta in s preprosto računsko mrežo (preglednica 16). Globina vode za protipoplavnim zidom je ob trenutku simulirane porušitve zidu visoka le okoli 30 cm in z večanjem dotoka Mura naraste do maksimalno 70cm. Glede na to, da luknja v zidu meri 15 m, lahko hitro izračunamo povprečno hitrost in preverimo, če graf na sliki 43 drži. Če je največji pretok ob porušitvi zidu velik okoli 5,6 m³/s, to pomeni, da so povprečne hitrosti v tistem trenutku manjše od 1,3 m/s, kar se sklada z rezultati hitrostnega polja.

Preglednica 16: Izračun volumna pri treh verzijah modela.

Verzija modela	Povprečna globina [m]	Obseg [ha]	Volumen[m ³]
P_n_g=1_20	1,09	46,88	512679
Referenčni primer N_DMT_6	0,73	35,17	255119
N_DMT_6_n_g=0,05	0,61	33,88	205819

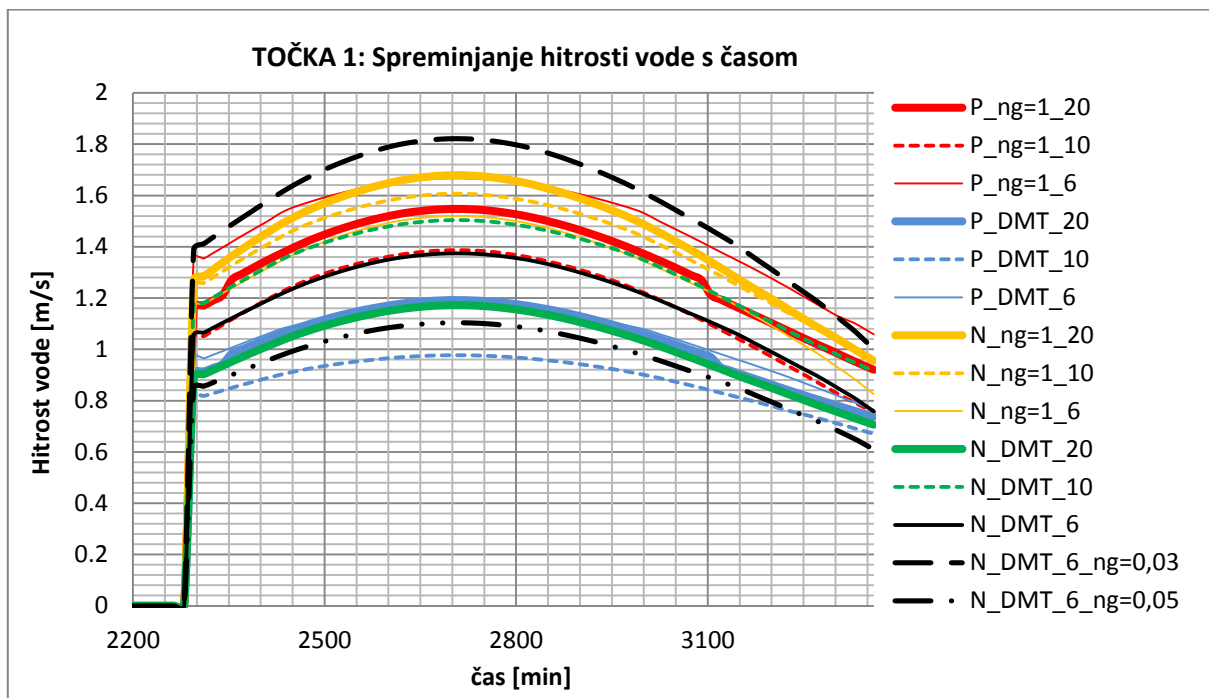
Volumen vode (preglednica 16), ki se razlije na poplavnem območju, je tudi do enkrat večji pri modelu z velikostjo celice 20 x 20 m in z upoštevanjem objektov z n_g=1. Konfiguracija terena je namreč taka, da voda zaradi naklona terena odteka proti notranjosti Gornje Radgone. Torej voda le priteče na poplavno območje, izteči pa ne more, ker je okoli mesta Gornje Radgone urejen protipoplavni zid in se voda nabira v nižje ležečih predelih.

Najprej si bomo ogledali potek globlin in hitrosti v točki 1, ki je 1,5 m oddaljena od luknje v zidu. Do porušitve dela protipoplavnega zidu pride po 2280 minutah po začetku simulacije, oziroma ob 14. uri 7. 4. 2013, maksimalne hitrosti in globine pa so dosežene okoli 21. ure oziroma po 2700 minutah, ker takrat hidrogram dotoka doseže svoj maksimum.



Slika 44: Spreminjanje globlin s časom v točki 1.

Iz grafov je jasno razvidno, da so najvišje globine izračunane pri modelih z večjimi računskimi celicami (20 x 20 m), ne glede na to na kakšen način so zajeti objekti. Iz slike 44 vidimo, da je največja razlika globine med različnimi verzijami modelov manjša od 10 cm, kar predstavlja približno 15 % razliko.



Slika 45: Spreminjanje hitrosti s časom v točki 1.

Pri primerjavi hitrosti v točki 1 (slika 45) vidimo, da so izračunane maksimalne hitrosti tudi večje pri večjih celicah. Edina izjema je verzija modela 13, ki upošteva zmanjšano hrapavost urbanih površin $n_g=0,03$, kar je pričakovan rezultat, saj pri manjših Manningovih koeficientih pride do večjih hitrosti.

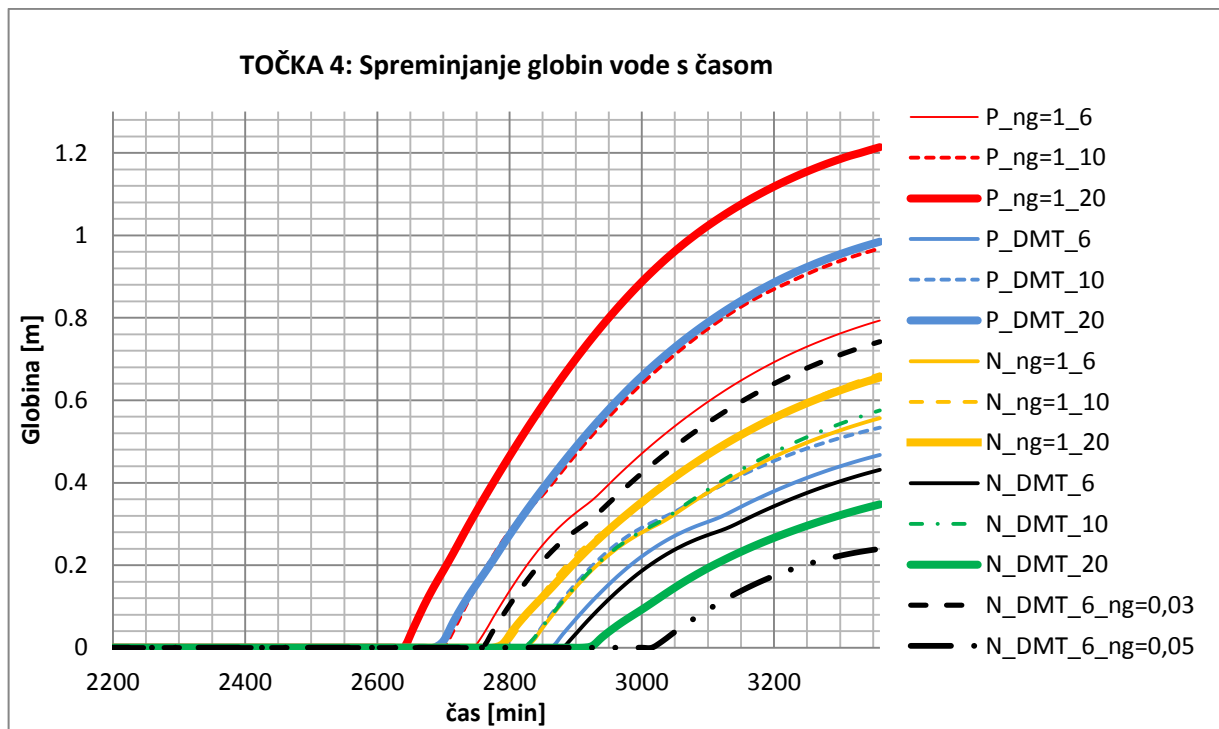
Grafi odvisnosti globin in hitrosti od časa za točko 2 in 3 so podani v prilogi D. Iz njih je razvidno, da se z oddaljevanjem od vira poplav, zamik potovanja poplavnega vala med različnimi variantami modela večja. Točka 2 je locirana približno 310 m zračne razdalje južno-vzhodno od luknje v zidu. Maksimalni časovni zamik je že 1 uro 15 minut. Najhitrejše potovanje vala se izračuna z modeli, ki imajo velike računске celice in z upoštevanjem stavb z zvišano hidravlično hrapavostjo, zaradi razlogov, ki smo jih že razložili. Najpočasnejša verzija pa je po pričakovanjih model z zvišano hrapavostjo urbanih površin, saj zvišanje Manningovega koeficienta n_g vpliva direktno na hitrost odtekanja vodnega toka.

Točka 3 leži 350 m zračne razdalje stran od točke 2, na območju kjer ni več goste poselitve, ampak teren rahlo pada in zato pride do povečanih hitrosti vode. Od te točke naprej je padec tako majhen, da se voda začne nabirati, hkrati pa tudi nima kam odtehati. Zamiki v potovanju časa ostanejo skoraj enaki kot pri točki 2, le razlika med verzijo z $n_g=0,05$ za urbane površine se poveča na 1,5 ure.

Območje kjer leži točka 4, je na oddaljenem ravninskem, depresijskem delu poplavljenega območja, ograjenega z nasipom, da Mura ne more poplavljeti, zato voda nima kam odteči. To lahko vidimo s

primerjanjem grafa hitrosti z grafom globin. Hitrosti namreč kmalu dosežejo svoj maksimum in nato padejo razmeroma hitro, globine pa samo naraščajo, saj voda nima kam odteči (slika 46).

Časovna razlika med modeli je velika, saj je trajanje dogodka od porušitve zidu do konca simulacije 18 ur (ko visoke vode Mure odtečejo in ni več dotoka skozi odprtino). Do začetka poplavljanja v najbolj oddaljenih točkah pride v razmaku tudi več kot 6 ur.

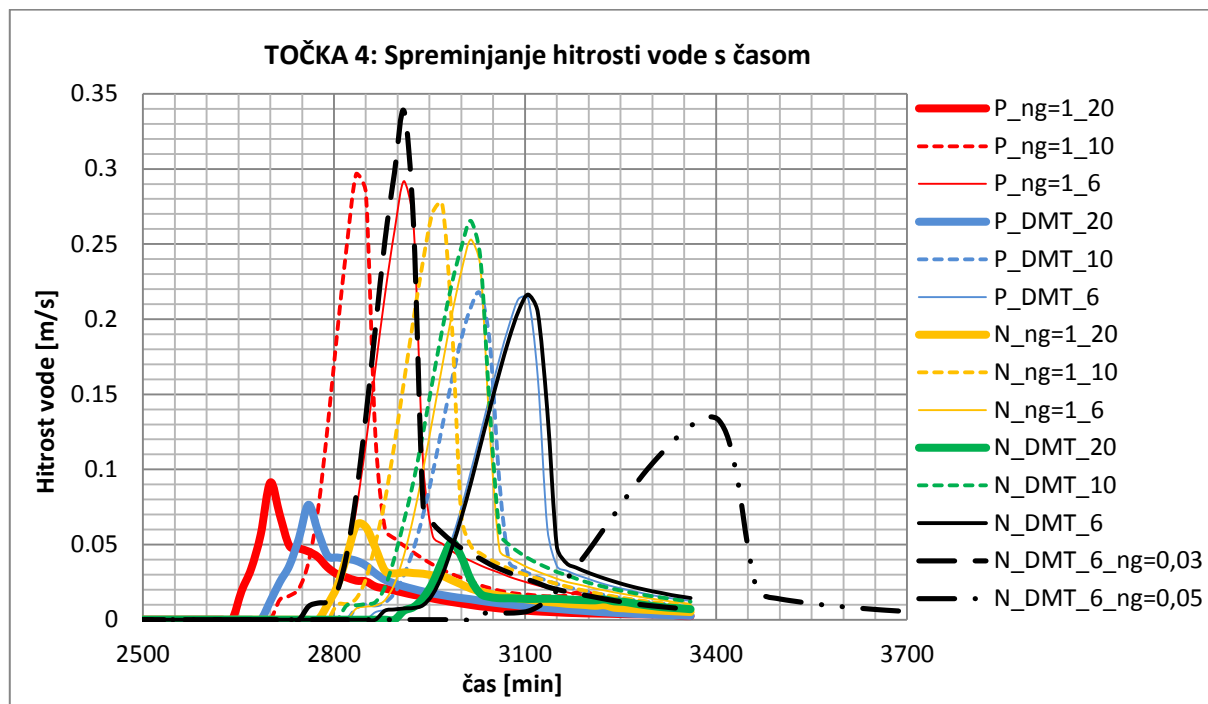


Slika 46: Spreminjanje globin s časom v točki 4.

Poplavni val najhitreje doseže točko 4 pri modelu s preprosto mrežo, velikostjo računskih celic 20 x 20 m ter z upoštevanjem objektov z Manningovim koeficientom $n_g=1$. Naraščanje obsega poplav za to verzijo modela si lahko pogledamo v prilogi E, kjer je narejena primerjava z verzijo, ki upošteva objekte z nadvišanjem v DMT. Maksimalne hitrosti so pri tem modelu manjše od 0,1 m/s, kar se zgodi pri vseh modelih z največjimi računskimi celicami v točki 4. Pri modelih z manjšimi računskimi celicami pa maksimalne hitrosti v točki 4 dosežejo velikosti okoli 0,3 m/s (slika 47).

Če primerjamo grafe modelov s preprosto mrežo (rdeča in modra barva) z modeli z natančno mrežo, vidimo, da je zamik prihoda poplavnega vala zmanjšan na približno dve uri. Eden izmed razlogov takega rezultata je dejstvo, da je število računskih celic pri natančnih mrežah večje kot pri preprostih, kar pomeni, da so napake izračunanih hitrosti manjše.

Ob primerjavi razlike med načinom upoštevanja objektov (primerjamo grafe rdeča-modra in rumena zelena) pa opazimo, da poplavni val v verzijah, ki upoštevajo objekte z hrapavostjo $n_g=1$, doseže točko 4 eno do dve uri prej kakor v modelih z zvišano višino objektov v DMT.



Slika 47: Spreminjanje lokalne hitrosti s časom v točki 4.

Vpliv spremembe Manningovega koeficienta n_g za urbane površine na dinamiko potovanja poplavnega vala je opisan ločeno od drugih rezultatov, saj so tukaj pričakovane večje razlike med modeli, ker ima hidravlična hrapavost velik vpliv na spremembo hitrosti toka in s tem na zamik poplavnega vala. V prejšnjem poglavju je bilo ugotovljeno, da se ob zmanjšanju hidravlične hrapavosti urbanih površin povprečna hitrost poveča, zato doteka večja količina vode in pride do večjega obsega poplav. Zato je možno sklepati, da bo poplavni val dosegel točko 4 najprej pri modelu z nižano hrapavostjo ($n_g=0,03$). V točki 1 pri luknji v protipoplavnem zidu ni opaznih sprememb pri globinah, razlika je samo 1 cm, medtem ko je sprememba v hitrostih razmeroma velika (glej preglednico 17).

Preglednica 17: Sprememba maksimalnih hitrosti v točki 1 pri luknji v zidu za različne hrapavosti urbanih površin glede na referenčni primer.

n_g urbanih površin	$n_g=0,03$	$n_g=0,04$	$n_g=0,05$
Max hitrost v točki 1 [m/s]	1,85	1,39	1,12
Sprememba hitrosti [%]	+33,1 %	0 %	-19,4 %

V točki 4 pride do pričakovanih rezultatov, saj so hitrosti največje pri modelu z manjšo hrapavostjo površin ($n_g=0,03$), kakor tudi pri vseh ostalih točkah. Najmanjše hitrosti v točki 4 pa so pri modelu z večjo hrapavostjo ($n_g=0,05$). Zamik prihoda poplavnega vala je med modelom s povečano hrapavostjo $n_g=0,05$ in med referenčnim modelom enak 2 uri 30 minut. Pri modelu z nižano hrapavostjo ($n_g=0,03$) pa doseže poplavni val točko 4 že 2 uri pred referenčnim primerom.

Kot je pokazano v raziskavi upoštevanja podmrežne topografije (Yu, Lane, 2006b), je občutljivost modela na Manningov koeficient urbanih površin večja pri modelih, ki upoštevajo detajle topografije pod računsko celico, kakor pri modelih, katerih celice vsebujejo samo en podatek o povprečni višini. V našem primeru s spremembo n_g za 25% vidimo, da pride do velikih zamikov potovalnega časa.

Razlog za tak rezultat verjetno leži v topografiji izbranega območja in načina, kako se hitrosti in globine spreminjajo vzdolž poplavne ravnice.

V zgoraj omenjeni raziskavi je predlagano, da v primeru, ko širjenje poplavnega vala ni omejeno na ozek del ob strugi (kar velja tudi za naš primer), čas prihoda vala umerimo tudi s pomočjo velikosti celic. Kot smo namreč ugotovili iz zgornjih grafov, je čas potovanja poplavnega vala zelo odvisen od velikosti računskih celic. V njihovi raziskavi se je izkazalo, da imajo rezultati modela s celico 8 x 8 m večjo natančnost kot model z velikostjo celice 4 x 4 m, ker je poplavni val v tem primeru potoval nekoliko hitreje kot pri modelu z najmanjšo celico. Takšne rezultate so dobili, ker njihovi modeli niso bili dovolj občutljivi za koeficient hrapavosti n_g , da bi z njim lahko spremenili potek potovanja konice poplavnega vala. V našem primeru pa je občutljivost na hrapavost urbanih površin dovolj velika, da s tem parametrom bistveno spremenimo časovno potovanje poplavnega vala po ravnici. Torej je v primerih, ko časovnega širjenja potovanja vala ni možno umeriti s spremembo Manningovega koeficienta, za opis hitrostnega polja lahko bolj primerna uporaba večje računske celice.

4.6 Skupne ugotovitve

V predhodnih poglavjih so bile prikazane ugotovitve analize vplivu štirih različnih parametrov na rezultate hidravličnega modela. Ovrednoten je bil vpliv velikosti računskih celic, vpliv oblike računske mreže, vpliv načina upoštevanja objektov ter vpliv spremenjene hrapavosti na urbanih površinah.

Cilj diplomskega dela je bil preveriti naslednje trditve:

- Izbira velikosti računskih celic znotraj 2D območja pomembno vpliva na rezultate hidravličnega modela.
- Način upoštevanja objektov bistveno vpliva na hitrosti vodnega toka.

Vsi rezultati so narejeni s primerjavo različnih verzij upoštevanih parametrov glede na referenčni primer, ki ima zgoščeno mrežo z osnovno velikostjo celice 6 x 6 m ter z upoštevanjem objektov z zviševanjem terena v DMT ter Manningovim koeficientom $n_g=0,04$ za urbane površine. To verzijo smo izbrali, ker pri njej pride do manjšega obsega poplavljanja kot pri večini verzij in ker sklepamo, da ta verzija modela najbolj natančno opisuje razmere v realnosti.

Velikost računskih celic ima v našem modelu izredno velik vpliv na rezultate modela. Primerjali smo modele s preprosto računsko mrežo in z upoštevanjem objektov s hrapavostjo $n_g=1$, ker tam pride do največjih razlik. Obseg poplav je pri večjih celicah (20 x 20 m) za 11,9 % večji kot pri celicah z velikostjo 6 x 6 m, povprečna hitrost se poveča za 30,9 %, obseg območja, kjer je globina večja od 1,5 m, pa se v primerjavi z verzijo modela z majhnimi računskimi celicami (6 x 6 m) poveča za 12,3 %. Potovanje vala do najbolj oddaljenega dela poplavljenega območja se skrajša zaradi večjih hitrosti za približno 2 uri glede na verzijo modela z najmanjšo velikostjo celic.

Prva hipoteza je bila torej potrjena, saj ima velikost celic največji vpliv na rezultate hidravličnega modela. Razlog za tako veliko zvišanje povprečnih hitrosti pri večjih celicah lahko razložimo na dva načina. Vpliv objektov je pri večjih računskih celicah manjši, saj blokada toka s stavbo predstavlja manjši del celice in manj vpliva na smer in velikost hitrostnega toka. Drugi razlog pa je vpliv močenja

celic, ki upočasni pretok, vendar je ocena hitrosti odvisna od velikosti celice. In ker pri velikih računskih celicah pride do manjših razlik v hitrostih in gladinah vode in je možnost napake zaradi poenostavitve večja, pride do hitrejšega potovanja poplavnega vala. Potovanje vala je namreč dosti bolj kompleksno pri manjši velikosti celic in je zato čas potovanja daljši. Torej je za točno umerjanje modela treba ob koeficientu hrapavosti upoštevati tudi velikost računске celice, saj je nemogoče napovedati pravi obseg poplav, če je potovanje vala zamaknjeno.

Za ugotavljanje vpliva oblike celic okoli objektov smo naredili dve vrsti mrež – natančne mreže, ki so zgoščene v okolici objektov in zidov, ter preproste mreže, ki imajo enakomerno razporejene celice, ki so večinoma pravokotne oblike. Število celic v natančni mreži je veliko večje kot v preprosti mreži z enako osnovno velikostjo mreže in je zato težko ločiti med vplivoma velikosti celice in načinom razporejenosti celic. Edina očitna razlika v rezultatih je pri razporeditvi hitrostnega toka ob objektih. Opazi se, da pri natančnih zgoščenih mrežah pride do nekoliko drugačne razporeditve in večjih hitrosti, vendar pri povprečnih hitrostih ta razlika ne pride do izraza. Zato smo naredili poseben primer, kjer je število celic enako, le pozicijo ene izmed celic tik ob luknji smo spremenili tako, da vsebuje del objekta znotraj celice. Vpliv oblike računске mreže je namreč največji na lokaciji, kjer so večje hitrosti, to je tik ob luknji v protipoplavnem zidu. V primeru, da je objekt vsebovan v celici tik ob dotoku, se obseg zmanjša za 15,1 %, povprečna hitrost za 9,8 %, območja kjer so globine večje od 1,5 m, pa se zmanjšajo za 62 %.

V nalogi sta predstavljena dva načina upoštevanja objektov – s povečano hidravlično hrapavostjo in z zvišanjem terena v ustreznih celicah v DMT. Pri upoštevanju objektov s povišanim Manningovim koeficientom n_g pride do višjih obsegov poplav, saj so območja stavb omočena, medtem ko pri modelih z zvišano višino terena v DMT ostanejo suha. Vendar je iz analize razvidno, da se obseg poplav poveča za več, kot je površina tlorisov poplavljenih objektov (+2.7 % glede na referenčni primer pri verziji 7). Maksimalno povečanje obsega med načinoma upoštevanja objektov je 21,4 % pri verziji z največjimi računskimi celicami in s preprosto mrežo. Iz rezultatov analize vidimo, da so modeli, ki uporabijo hrapavosti $n_g=1$ za upoštevanje objektov bolj občutljivi na velikost in razporeditev računskih celic kakor modeli, ki upoštevajo objekte z nadvišanjem terena v DMT.

Glede poteka hitrostnega toka je upoštevanje objektov z zvišanjem v DMT očitno boljše izbira, saj na lokaciji stavb ni toka in so hitrosti okoli stavb bolj natančno izračunane. Ko so objekti definirani z Manningovim koeficientom $n_g=1$ je potek hitrosti bolj enakomerno razporejen pri večjih računskih celicah, saj ne pride do zmanjšanja hitrosti pri vsakem objektu. Pri modelih z manjšo računsko celico pa je vpliv načina upoštevanja objektov manj opazen, saj se tudi pri modelih, ki upoštevajo objekte z $n_g=1$, razpored hitrosti približa rezultatom modela, ki upošteva dejansko višino hiš. Vidimo lahko, da se pri modelih, kjer so objekti upoštevani z DMT, delež površin v razredu največjih globin (nad 1,5 m) vedno zmanjša v primerjavi z modeli, ki upoštevajo objekte z $n_g=1$. Poplavni val v modelih, ki upoštevajo objekte z hrapavostjo $n_g=1$, doseže točko 4 eno do dve uri prej kakor v modelih z zvišano višino objektov v DMT, kar je posledica višjih povprečnih hitrosti.

Če torej strnemo ugotovitve glede načina upoštevanja objektov, lahko rečemo, da pri upoštevanju objektov z $n_g=1$ pride do večjih obsegov poplav, bolj posplošenih hitrostnih polj pri velikih računskih celicah, večjih povprečnih globin v večini primerov in posledično hitrejšega potovanja poplavnega

vala. Upoštevanje objektov z zvišanjem terena v DMT izboljša natančnost rezultatov v primeru večjih računskih celic, pri zgoščeni mreži z majhnimi računskimi celicami pa so razlike v obsegu in povprečnih hitrostih zanemarljive. Potovanje poplavnega vala je hitrejše pri upoštevanju objektov z $n_g=1$, saj objekti niso modelirani kot neprepustne ovire.

Preverjen je bil tudi vpliv spremembe hrapavosti poplavnih urbanih površin. Občutljivost modela na hidravlično hrapavost smo preverili tako, da smo spremenili hrapavost površine v referenčnem modelu ($n_g=0,04$) za ± 25 %, torej smo naredili še dva dodatna modela s hidravlično hrapavostjo $n_g=0,03$ oziroma $n_g=0,05$. Povečana hrapavost poplavnih površin zmanjša hitrost vodnega toka za 15,9 %, zaradi česar narastejo globine za 23,4 % in se zmanjša obseg poplav za 3,4 %. S povečanjem hrapavosti se delež območij po 1. kriteriju Pravilnika v prvem razredu z globinami vode, manjšimi od 0,5 m, zviša za 17,8 % na račun ostalih dveh območij, kjer je globina nad 0,5 m. Po Pravilniku je po 2. Kriteriju treba obravnavati še delež površin s hitrostmi vode nad 1 m/s. Odstotek teh območij pa pade iz 0,11 % pri $n_g=0,04$, na 0,07 % pri $n_g=0,05$, zato jih nismo podrobno analizirali.

Zmanjšanje hrapavosti poplavnih površin pa, ravno obratno, poveča hitrosti vodnega toka za 23,7 %, zaradi česar upadajo globine za 15,6 % in se poveča obseg poplav za 5,4 %. Delež območij po 1. kriteriju Pravilnika z globinami pod 0,5 m se z zmanjšanjem hrapavosti zmanjša za 19,6 % in se zato delež območja, kjer so gladine med 0,5 m in 1,5 m, poveča za 9,1 %, območje kjer so gladine nad 1,5 m, pa je skoraj še enkrat večje, saj se poveča za 96,6 % glede na referenčni primer ($n_g=0,04$). Po 2. kriteriju Pravilnika je treba obravnavati še delež površin s hitrostmi vode nad 1 m/s. Odstotek teh območij je največji pri modelu z zmanjšano hrapavostjo ($n_g=0,03$), in sicer predstavlja 0,77 % celotnega poplavljenega območja, kar pomeni, da je območje velikih hitrosti več kot štirikrat večje kot pri referenčnem modelu ($n_g=0,04$).

Pri spreminjanju deležev površin v posameznih razredih, ima pomembno vlogo topografija poplavnih površin, v obravnavanem primeru pa vplivajo še posebnosti območja poselitve. Zaradi goste poselitve omejenega dotoka in onemogočenega iztoka poplav hitrosti hitro padajo in je zato območje, kjer so hitrosti večje od 1 m/s, vedno manjše od 1 % celotnega obsega poplav.

Povečana hrapavost ugodno vpliva na podaljševanje potovalnega časa, saj je zamik prihoda poplavnega vala med modelom s povišano hrapavostjo $n_g=0,05$ in med referenčnim modelom enak 2 uri 15 minut. Pri modelu z nižano hrapavostjo ($n_g=0,03$) pa doseže poplavni val točko 4 že 2 uri pred referenčnim primerom.

5 ZAKLJUČEK

Prvi korak pri zagotavljanju poplavne varnosti je uspešno modeliranje visokovodnih dogodkov, s katerim se pokaže obseg in stopnja poplavne nevarnosti. Rezultati hidravličnega modela so podani s kartami poplavne nevarnosti, v sklopu katerih določimo razrede nevarnosti na podlagi hitrosti in globin vodnega toka. S pomočjo KPN ugotovimo, kje so območja treh razredov poplavne nevarnosti in na njihovi podlagi lahko lokalna uprava določi rabo prostora in naredi načrt evakuacije v primeru izrednih dogodkov.

Modeliranje urbanih poplavnih območjih je zapleteno, ker je vpliv objektov na potovanje poplavnega toka lahko zelo velik, podatkov za umerjanje visokih vod v naseljih pa običajno ni veliko. Kvalitetni podatki o topografiji terena so na ravninskih poplavnih območjih zelo pomembni, zato smo z uporabo GIS orodij uporabili najnovejše LIDAR posnetke in ustvarili natančen DMT. Na podlagi DMT smo ustvarili 2D hidravlični model v programu HEC-RAS 5.0. Izdelani poplavni scenarij porušitve protipoplavnega zidu je pokazal veliko občutljivost rezultatov modela na velikost računskih celic. Pri večjih celicah je prišlo do večjih obsegov poplavljenosti in hitrosti, zaradi poenostavljenega potovanja poplavnega vala po urbanem območju pa tudi hitrejšega prihoda vala do oddaljenih delov retenzije. Rezultati se skladajo s podobno študijo, narejeno na urbanem območju (Yu, Lane, 2006a)

V nalogi sta bila analizirana tudi dva različna načina upoštevanja objektov, prvi s povečano hidravlično hrapavostjo in drugi z zviševanjem terena v celicah s stavbami v digitalnem modelu terena (DMT). Upoštevanje objektov z nadvišanjem terena v DMT izboljša natančnost rezultatov v primeru večjih računskih celic, predvsem pa je hitrostno polje bolje opisano v okolici objektov. Pri uporabi majhnih računskih celic in zgoščeni mreži pa so razlike v obsegu in povprečnih hitrostih zanemarljive. Potovanje poplavnega vala je hitrejše pri upoštevanju objektov z Manningovim koeficientom $n_g=1$, saj objekti niso modelirani kot neprepustne ovire. Zato pride pri tem načinu upoštevanja objektov tudi do večjih obsegov poplav, bolj posplošenih hitrostnih polj pri velikih računskih celicah in do večjih povprečnih globin v večini analiziranih primerov.

Pomemben vpliv na časovno potovanje poplavnega vala v oddaljenih območjih obravnavanega modela v našem primeru predstavlja tudi sprememba parametra hidravlične hrapavosti na urbanem območju. Pri modelu s povišano hrapavostjo za četrtno na celotnem urbanem območju glede na referenčni primer, pride do časovnega zamika prihoda poplavnega vala več kot 2 uri. Ko pa je hrapavost urbanih površin zmanjšana za četrtno, so izračunane večje hitrosti vodnega polja in zato tudi poplavni val doseže oddaljene predele retenzije veliko prej (2 uri). Iz teh rezultatov vidimo, da je umiritev našega modela v veliki meri odvisna od izbranega Manningovega koeficienta ter od velikosti računske celice.

Zmanjšana hrapavost ponavadi pomeni povečanje hitrosti vodnega toka in v splošnem zmanjšanje gladine pri enakem pretoku. V našem primeru pa je urbano območje omejeno s protipoplavnim nasipom in voda ne mora iztekati, kar pomeni, da se globine v opazovanem času simulacije s časom samo večajo. Tako pride ob zmanjšanju hrapavosti urbanih površin do večjih globin v oddaljenih predelih retenzije, saj je prihod poplavnega vala hitrejši in se zato voda v teh predelih hitreje nabere.

Iz primerjave rezultatov verzij modela z različnimi oblikami mreže lahko sklepamo, da je pomembno, da meje računskih celic potekajo vzdolž protipoplavnih zidov ter objektov v območjih, kjer so večje hitrosti vodnega toka. S tem, ko so objekti v ločenih računskih celicah od ravninskega dela urbanega območja, namreč zagotovimo, da je opis tokovnic okoli objektov bolj točen. To je bistveno tudi pri zasnovi računske mreže območja s protipoplavnim zidom, saj če meje računskih celic ne potekajo točno vzdolž zidu, rezultati niso točni.

Rezultati analize občutljivosti hidravličnega modela glede na vrsto spremembe vhodnih parametrov v splošnem potrjujejo pričakovane spremembe opazovanih hidravličnih količin. Sprememba rezultatov glede na parameter velikosti celic je bila pričakovana, vendar ni bilo pričakovati, da bo imela velikost celic večji vpliv na vrednosti rezultatov, kakor jih ima parameter načina upoštevanja objektov. Presenetljiva je tudi velikost učinka parametrov na časovni zamik pojava vode v najbolj oddaljenem delu retenzije.

Glavne ugotovitve so torej:

- Večje računske celice imajo večje povprečne hitrosti in globine vodnega toka ter posledično večje obsege poplavljanja in hitrejša potovanja poplavne vode do oddaljenih delov retenzije.
- Upoštevanje objektov z nadvišanjem terena v DMT ima velik vpliv na razpored hitrosti pri modelih z veliko računsko celico, pri drugih kombinacijah parametrov pa razlika ni tako očitna.
- Obseg poplav je manjši pri upoštevanju objektov z nadvišanjem DMT, in se zmanjša za več, kot je površina omočenih objektov pri modelih, ki upoštevajo objekte s povišanjem hrapavosti.
- Občutljivost modela na hrapavost urbanih površin je v našem primeru razmeroma velika, pri manjši hrapavosti pride do večjih hitrosti ter globin vodnega toka.
- Vpliv razporejenosti celic je najpomembnejši na lokaciji pritoka vodnega toka, kjer so največje hitrosti, meje celic morajo biti v liniji protipoplavnih zidov ali nasipov.

Torej je izbira dovolj majhne velikosti celice numerične mreže ključna za izračun natančnih razporedov hitrosti ter obsegov poplavljanja. Izbira načina modeliranja objektov pa je odvisna od tega, kako natančen potek tokovnic in hitrosti je treba izračunati. V primeru modeliranja objektov, ki zablokirajo pomemben del pretočnega prereza, je boljši način upoštevanje objektov z nadvišanjem terena v DMT. V primeru, da potrebujemo samo informacijo o obsegu poplav, pa smo na varni strani, če upoštevamo objekte s povišano hidravlično hrapavostjo.

Za nadaljnjo raziskavo vpliva danih parametrov bi bilo zanimivo preveriti, kako lahko s kombinacijo spreminjanja Manningovega koeficienta (na celotnem urbanem območju) pri različnih velikostih računskih celic vplivamo na časovni zamik prihoda visokovodne konice, saj je potek gladin in hitrosti odvisen od dejstva, kako hitro se širi poplavni val in obratno. A ker je količina primerjanih parametrov, obdelanih v tej nalogi, že dovolj obsežna, bo ta analiza prepuščena drugim raziskovalcem.

VIRI

Aronica, G. T., Lanza, L.G. 2005. Drainage efficiency in urban areas: a case study. *Hydrological Processes*, Vol. 19, 5: 1105–1119.

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.5648/epdf> (Pridobljeno 5. 4. 2016).

ARSO. 2015. Slikovna dokumentacija v sklopu projekta BOBER: str 1.

<http://www.arso.gov.si/o%20agenciji/EU%20sofinancira/> (Pridobljeno 25. 5. 2016).

Bat, M., Dolinar, M., Frantar, P., Hrvatina, M., Kobold, M., Kurnik, B., Nadbath, M., Ožura, V., Uhan, J., Ulaga, F. 2008. Vodna bilanca Slovenije 1971–2000. = Water Balance of Slovenia 1971–2000. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor – Agencija Republike Slovenije za okolje: 120 str.

[http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/vodna%20bilanca.html](http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/vodna%20bilanca/vodna_bilanca.html) (Pridobljeno 2. 4. 2016).

Bat, M., et al. 2016. Program hidrološkega monitoringa površinskih voda za obdobje 2016–2020. Ljubljana, ARSO: 18 str.

<http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Program%20hidrolo%C5%A1kega%20monitoringa%20povr%C5%A1inskih%20voda%202016-2020.pdf> (Pridobljeno 2. 4. 2016).

Blažič, Simon. 2005. Poplava na reki Muri avgusta 2005. Občina Beltinci: 43 str.

<http://www.shrani.si/f/3r/Xi/2b3FOJtN/poplava-na-muri-2005.pdf> (Pridobljeno 21. 4. 2016).

Bric, V., Berk, S., Triglav Čekada, M. 2013. Zagotavljanje kakovosti georeferenciranja podatkov aerolaserskega skeniranja za upravljanje voda. *Geodetski vestnik. Letn. 57, št. 2*, str. 271-285.

http://geodetski-vestnik.com/cms/images/57/2/gv57-2_bric.pdf (Pridobljeno 18. 5. 2016).

Brunner, G. W. CEIWR-HEC. 2015. HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual Version 5.0: 130 str.

http://www.hec.usace.army.mil/misc/files/ras/Combined_1D_and_2D_Modeling_with_HEC-RAS.pdf (Pridobljeno 3. 10. 2015).

Brunner, G. W. 2016. HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. US Army of Engineers HEC: 547 str.

<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/downloads.aspx> (Pridobljeno 5. 3. 2016).

Calenda, G., Mancini, C.P., Volpi, E. 2005. Distribution of the extreme peak floods of the Tiber River from the XV century, *Advances in Water Resources*, Vol. 28, 6: 615-625.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2004.09.010> (Pridobljeno 5. 4. 2016).

Čekada, M. T. 2010. Zračno lasersko skeniranje in nepremičninske evidence. *Geodetski vestnik. Letn. 54, št. 2*, str. 181–194.

http://www.geodetski-vestnik.com/54/2/gv54-2_181-194.pdf (Pridobljeno 29. 5. 2016).

Eprojekt d.o.o. 2013. Idejni načrt hidrološke merilne postaje za površinske vode 212 Vir. Načrt št. 280/212. (avgust 2013).

GMS 4.0 Ground Water Modeling System.

http://www.scisoftware.com/products/gms_details/gms_details.html#2D (Pridobljeno 29. 5. 2016).

Grangeo d.o.o. Hidrografske meritve na Savi. 2011.

<http://www.grangeo.si/aktualno.htm> (Pridobljeno 31. 5. 2016).

Halcrow in Vodnogospodarski inštitut 2000. Transboundary Co-operation in Nature Conservation and Wetland Management for the Danube River Basin. Component 1 : Sustainable River Basin Development and Wetland Management in the Lower Mura River. Ljubljana, 2000..

Hartnack, J. N., Enggrob, H. G. in Rungø M. 2008. A multi-grid approach for embedding high resolution topography in a 2d surface water model. DHI Denmark.

<http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/9780203883020.ch14> (Pridobljeno 4. 2. 2016).

IMPACT-Investigation of Extreme Flood Processes & Uncertainty, Risk and Uncertainty (WP5). 2004. Technical Report. str. 38–39.

http://www.impact-project.net/AnnexII_DetailedTechnicalReports/AnnexII_PartD_WP5/WP5_technical_Report_V1_2.pdf (Pridobljeno 10. 4. 2016).

Karvonen T., Hepojoki A., et al. 2000. Development of rescue actions based on dam-break flood analysis (RESCDAM). Appendix 2. The use of physical models in dam break flood analysis. str. 19–43.

http://www.syke.fi/en-US/Research_Development/Research_and_development_projects/Projects/Development_of_rescue_actions_based_on_dambreak_flood_analysis_RESCDAM (Pridobljeno 10. 4. 2016).

Kolbezen, M., Pristov, J. 1998. Površinski vodotoki in vodna bilanca Slovenije. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Hidrometeorološki zavod Slovenije: 98 str.

Mignot, E., Paquier, A., Haider, S. 2006. Modeling floods in a dense urban area using 2D shallow water equations, Journal of Hydrology, Vol. 327, 1–2: 186-199.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.11.026> (Pridobljeno 5 .4. 2016).

Moderc, M. 2013. Analiza občutljivosti hidravličnega modeliranja za hrapavost poplavnih površin. Diplomaska naloga. Ljubljana, (M. Moderc):73 f.

Muller, M., Steinman, F., Novak, G. 2011. Hidravlični modeli za prekomejno usklajevanje protipoplavnih ureditev v G. Radgoni. 22. Mišičev vodarski dan: 185–192.

<http://mvd20.com/LETO2011/R24.pdf> (Pridobljeno 20. 4. 2016).

Pranjić, S. 2008. Hidravlična analiza na podlagi topografije Kopra, izdelane s pomočjo tehnologije Lidar. Diplomaska naloga. Ljubljana, (S. Pranjić): 83 f.

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, Ur. list RS št. 60/2007: 3216.

Projekt Dra-Mu-CI

<http://www.dramurci.eu/> (Pridobljeno 3. 2. 2016).

Rajar, R. 1980. Hidravlika nestalnega toka. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 279 str.

Rak, G. 2006. Uporaba prostorskih podatkov v analizi hidravličnih lastnosti vodotokov. Diplomaska naloga. Ljubljana, (G. Rak): 86 f.

Rak, G. 2013 Hidravlična analiza vpliva rabe prostora na poplavnih območjih na potovanje poplavnih valov. Magistrska naloga. Ljubljana, (G. Rak):130 f.

Rak, G., Slokar, M., Steinman, F. 2014, Slovensko – avstrijsko sodelovanje pri poplavah zaradi porušitve protipoplavnih ukrepov na območju Gornje Radgone in Bad Radkersburga. UJMA, št 28, str. 245–254.

<http://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/2014/245.pdf> (Pridobljeno 5. 11. 2015).

Sklep ARSO o dodelitvi soglasja za sanacijo zidu št. 35405-60/2016-4. 2016. str 6.

<http://www.arso.gov.si/novice/datoteke/035647-sklep.pdf> (Pridobljeno 10. 5. 2016).

Steinman, F. 2010. Hidravlika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 250 str.

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

Tehnično poročilo izdelave: Izvedba laserskega skeniranja Slovenije-Blok 24. 2014. Geodetski inštitut Slovenije: str. 20.

http://gis.arso.gov.si/related/lidar_porocila/b_24_izdelava_izdelkov.pdf (Pridobljeno 22. 2. 2016).

Warner, T. 2014. 17 Ways to Be a Raster Master.

<http://blog.safe.com/2014/07/raster-master/> (Pridobljeno 29. 5. 2016).

Weisgerber, A., Gutierrez-Andres, J., Wilson, G., Marias, F., Karanxha, A., Clarke, R., Millington, R. 2010. Physical-computational modelling comparison in Ireland. International Symposium on hydraulic Physical Modelling and Field Investigation. Kitajska, Nanjing: 192–198.

Yu, D., Lane SN. 2006a. Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion-wave treatment, part 1: mesh resolution effects. V: *Hydrological Processes* 20, 7: 1541–1565.
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.5935/epdf> (Pridobljeno 5 .4. 2016).

Yu, D., Lane SN. 2006b. Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion-wave treatment, part 2: development of a sub-grid-scale treatment. V: *Hydrological Processes* 20, 7: 1567–1583.
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.5936/epdf> (Pridobljeno 5. 4. 2016).

PRILOGE

SEZNAM PRILOG

PRILOGA A

Vrednosti Manningovih koeficientov hrupavosti za naravne struge in poplavne površine.

PRILOGA B:

Izračunani Manningovi koeficienti n_g pri modeliranju ovir v vodnem toku v laboratoriju (Karvononen, Hepojoki, et al., 2000., str. 41).

PRILOGA C:

Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja (UL RS št. 60/07).

PRILOGA D:

Lokalni grafi hitrosti in globin v odvisnosti od časa v točkah 2 in 3.

GRAFIKON D.1:

Spreminjanje globin vode s časom v točki 2.

GRAFIKON D.2:

Spreminjanje hitrosti vode s časom v točki 2.

GRAFIKON D.3:

Spreminjanje globin vode s časom v točki 3.

GRAFIKON D.4:

Spreminjanje hitrosti vode s časom v točki 3.

PRILOGA E:

Primerjava obsega poplavljanja v odvisnosti od časa za verziji z velikostjo celic 20 x 20 m in z različnim načinom upoštevanja objektov.