

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:

Žolnir, A., 2014. Primerjava dvodimenzijskih programov na primeru računa toka Bolske pri Gomilskem. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Četina, M., somentor Fazarinc, R.): 57 str.

Datum arhiviranja: 16-12-2014

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:

Žolnir, A., 2014. Primerjava dvodimenzijskih programov na primeru računa toka Bolske pri Gomilskem. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Četina, M., co-supervisor Fazarinc, R.): 57 pp.

Archiving Date: 16-12-2014

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
HIDROTEHNIČNA SMER

Kandidat:

ALJAŽ ŽOLNIR

**PRIMERJAVA DVODIMENZIJSKIH PROGRAMOV NA
PRIMERU RAČUNA TOKA BOLSKE PRI GOMILSKEM**

Diplomska naloga št.: 3404/HS

**COMPARISON OF TWO DIMENSIONAL COMPUTER
CODES ON THE CASE STUDY OF THE FLOW
COMPUTATION OF THE RIVER BOLSKA NEAR
GOMILSKO**

Graduation thesis No.: 3404/HS

Mentor:

prof. dr. Matjaž Četina

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:

viš. pred. mag. Rok Fazarinc

Ljubljana, 29. 10. 2014

POPRAVKI

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna.«

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **ALJAŽ ŽOLNIR** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
**»PRIMERJAVA DVODIMENZIJSKIH PROGRAMOV NA PRIMERU RAČUNA TOKA
BOLSKE PRI GOMILSKEM«.**

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, junij 2014

Aljaž Žolnir

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 532.5:556.53(497.4)(043.2)
- Avtor:** Aljaž Žolnir
- Mentor:** prof. dr. Matjaž Četina
- Somentor:** viš. pred. mag. Rok Fazarinc
- Somentor:** asist. dr. Mario Krzyk
- Naslov:** Primerjava dvodimenzijskih programov na primeru računa toka Bolske pri Gomilskem
- Tip dokumenta:** Diplomaska naloga – univerzitetni študij
- Obseg in oprema:** 57 str., 41 sl., 4 graf., 7 pril.
- Ključne besede:** PCFLOW2D, MIKE 11, MIKE 21, MIKE Flood, računski model 2D toka vode, primerjava

Izvleček

V diplomski nalogi so z dvodimenzijskimi programi PCFLOW2D, MIKE 21 ter MIKE Flood izvedeni izračuni z različnimi pretoki za reko Bolsko pri Gomilskem. Na začetku sta opisana vodotoka Bolska in Trnavca ter računsko območje, ki je bilo modelirano. Izveden je bil tudi terenski ogled območja, da se je nato lažje določilo različne koeficiente.

V nadaljevanju so opisane teoretične osnove računanja pri uporabljenih programih ter priprava računskega modela za posamezne programe. Na podlagi zahtevnosti vnosa računskega modela ter dobljenih rezultatov so na koncu podane prednosti in slabosti posameznih programov ter analizirane razlike v izračunanih poljih hitrosti in globinah.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 532.5:556.53(497.4)(043.2)

Author: Aljaž Žolnir

Supervisor: Prof. Matjaž Četina, Ph. D.

Co-supervisor: Sen. Lec. Rok Fazarinc, M. Sc.

Co-supervisor: Teach. Assist. Mario Krzyk, Ph. D.

Title: Comparison of two dimensional computer codes on the case study of the flow computation of the river Bolska near Gomilsko

Document type: Graduation thesis – University studies

Scope and tools: 57 p., 41 fig., 4 graph., 7 ann.

Keywords: PCFLOW2D, MIKE 11, MIKE 21, MIKE Flood, two dimensional computer codes, comparison

Abstract

In this diploma thesis, I carried out calculations of various flows for the Bolska river below the town of Gomilsko by two-dimensional programmes PCFLOW 2D, MIKE 21, and MIKE Flood. In the beginning, the Bolska and Trnavca watershed and modelled calculation domain are described. I also performed site surveys of the area in order to define various coefficients more effectively.

Moreover, the background of the calculation of specific programmes and the preparation of the calculation model for individual programme is briefly described. Based on the complexity of the input of the calculation model and the obtained results, I finally set out the advantages and weaknesses of each programme and analysed the differences of calculated velocity fields and water depths.

ZAHVALA

Za pomoč in nasvete pri izdelavi diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Matjažu Četini in somentorjema mag. Roku Fazarincu, viš. pred., ter dr. Mariu Krzyku.

Zahvaljujem se tudi Mihi Zidariču, univ. dipl. inž. grad., za nasvete pri modeliranju s programom MIKE.

Zahvaljujem se mami Andreji in očetu Aleksandru, ki sta mi študij omogočila in me pri njem spodbujala.

Zahvala pa je namenjena tudi mojim prijateljem za moralno podporo in druženje v času študija.

»Ta stran je namenoma prazna.«

VSEBINSKO KAZALO

1	UVOD	1
2	OPIS OBRAVNAVANEGA PROBLEMA Z REALNO GEOMETRIJO	2
2.1	Osnovne značilnosti Bolske	2
2.2	Osnovne značilnosti Trnavce	3
2.3	Hidrološke in hidravlične značilnosti območja	4
2.3.1	Padavine	4
2.3.2	Rečni režim	5
3	OPIS OŽJEGA OBRAVNAVANEGA OBMOČJA	6
3.1	Osnovne značilnosti območja	6
3.2	Osnovne lastnosti struge	7
3.2.1	Bolska.....	7
3.2.2	Trnavca	7
3.3	Prečni objekti.....	8
3.4	Poplavna ogroženost območja.....	11
4	MATEMATIČNO MODELIRANJE	14
4.1	Opis računalniških programov.....	14
4.1.1	PCFLOW2D.....	14
4.1.2	MIKE 11.....	16
4.1.3	MIKE 21.....	18
4.1.4	MIKE Flood.....	19
4.1.5	AutoCAD in Aquaterra	23
4.2	Testni primer s poenostavljeno geometrijo.....	24
4.2.1	Priprava testnega modela	24
4.2.2	Rezultati testnega primera	24
4.3	Priprava matematičnih modelov za realni primer	26
4.3.1	AutoCAD in Aquaterra	26
4.3.2	MIKE 21.....	27

4.3.3	MIKE Flood.....	31
4.3.4	PCFLOW2D.....	35
4.4	Primerjava rezultatov	37
4.4.1	Primerjava rezultatov za poplavni val 18. in 19. 9. 2007.....	38
4.4.2	Primerjava rezultatov za pretok Q(100).....	42
4.4.3	Primerjava rezultatov med različnimi modeli pri konstantnem pretoku Q(100)	46
5	ZAKLJUČEK.....	53
	VIRI.....	55

KAZALO SLIK

Slika 1: Pregledna karta Bolske	2
Slika 2: Pregledna karta Trnavce	4
Slika 3: Obravnavano območje (Geodetski inštitut Slovenije, 4. 4. 2014).	6
Slika 4: Skalna drča na Bolski.....	7
Slika 5: Zajezba na Trnavci.....	8
Slika 6: Most na Bolski v profilu P-B177 (most B1)	8
Slika 7: Most B2.....	9
Slika 8: Most B3.....	9
Slika 9: Most T1	10
Slika 10: Most T4	11
Slika 11: Razredi poplavne nevarnosti (Atlas okolja, 24. 4. 2014).	11
Slika 12: Hidrogram Bolske v Dolenji vasi ter urna intenziteta padavin v Nazarjih (ARSO, 2008: 7).	12
Slika 13: Lokacija suhega zadrževalnika Trnava (Zidarič, 2009: 183).	13
Slika 14: Uporaba čelne povezave (MIKE Flood user manual, 2007).	20
Slika 15: Uporaba bočnih povezav (MIKE Flood user manual, 2007).	21
Slika 16: Uporaba povezave z objektom (MIKE Flood user manual, 2007).	22
Slika 17: Uporaba povezave s kanalizacijskim omrežjem – vtok v kanalizacijo (MIKE Flood user manual, 2007).	22
Slika 18: Uporaba povezave s kanalizacijskim omrežjem – iztok iz kanalizacije (MIKE Flood user manual, 2007).	23
Slika 19: Geometrija testnega primera	24
Slika 20: Globina vode izračunana z MIKE 21	25
Slika 21: Globina vode izračunana z MIKE Flood.....	25
Slika 22: Legenda globin rezultatov za sliki 20 in 21	25
Slika 23: Rečni sistem Bolske in Trnavce v modelu MIKE 11	32
Slika 24: Okno za vnos mostu v MIKE 11	33

Slika 25: Okno za vnos robnih pogojev v modelu MIKE 11 (Q(t) za Trnavco kot zgornji robni pogoj – desno, ter Q(h) za Bolsko kot spodnji robni pogoj – levo).	34
Slika 26: Združena in povezana modela MIKE 11 in MIKE 21 v MIKE Flood.....	35
Slika 27: Detajl definiranja računske mreže v PCFLOW2D	35
Slika 28: Območje dosega stoletnih (Q100) poplav (Atlas okolja, 2. 6. 2014).....	37
Slika 29: Karta poplavnega dogodka dne 18. in 19. 9. 2007 (Atlas okolja, 2. 6. 2014).....	38
Slika 30: Rezultati izračuna globin z MIKE 21 pri hidrogramu poplavnega dogodka dne 18. 9. 2007.....	40
Slika 31: Rezultati izračuna globin z MIKE Flood pri hidrogramu poplavnega dogodka dne 18. 9. 2007.....	41
Slika 32: Rezultati izračuna globin z MIKE Flood pri hidrogramu s konico Q(100).....	42
Slika 33: Rezultati izračuna globin z MIKE 21 pri hidrogramu z maksimalnim pretokom Q(100)	44
Slika 34: Rezultati izračuna globin z MIKE 21 pri konstantnem pretoku Q(100)	45
Slika 35: Hitrostno polje in globine vode izračunane s programom MIKE 21	46
Slika 36: Hitrostno polje izračunano s programom PCFLOW2D	47
Slika 37: Rezultati izračuna globin z MIKE 21 pri konstantnem pretoku Q(100)	48
Slika 38: Rezultati izračuna globin z MIKE Flood pri konstantnem pretoku Q(100).....	49
Slika 39: Rezultat občutljivostne analize s programom MIKE 21	50
Slika 40: Rezultat občutljivostne analize s programom MIKE Flood	51
Slika 41: Rezultat občutljivostne analize s programom PCFLOW2D	52

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Primerjava gladin dobljenih s programom MIKE	26
Grafikon 2: Hidrogram Bolske in Trnavce – Q100	28
Grafikon 3: Hidrogram Bolske in Trnavce – 18. 9. 2007	29
Grafikon 4: Hidrogram iztoka iz izvira na Bolski za Q100	31

1 UVOD

Število ekstremnih padavin se zaradi globalnih podnebnih sprememb veča iz leta v leto. Del teh padavin se infiltrira v zemljino, del pa odteče po prispevni površini kot površinski odtok. Slednji najprej doseže vodotok in nato odteka dalje po strugi navzdol. V odvisnosti od predhodne namočenosti tal, količine in trajanja padavin vodotok dosega različne pretoke in ob večjih pretokih poplavlja. Ker pa gradimo nove objekte tudi na poplavnih območjih, moramo v ta namen izdelati poplavno študijo, iz katere je razvidna poplavna nevarnost območja. V poplavnih študijah je potrebno določiti razrede poplavne in erozijske nevarnosti ter ustrezne ukrepe za preprečitev ali omilitev poplavljanja, ki pa ne smejo poslabšati stanja dolvodno.

Hidravlična analiza je eden glavnih delov izdelave poplavne študije. Naredimo jo lahko na dva načina, s fizičnimi ali z računalniškimi modeli. Ker je izdelava fizičnega modela zamudna in draga, se v praksi čedalje bolj uporabljajo in uveljavljajo matematični modeli. Z razvojem zmogljivejših računalnikov se razvijajo tudi čedalje natančnejši matematični modeli. Najprej so se razvili matematični modeli za račun enodimenzijskega toka, kot na primer HEC-RAS, v zadnjem času pa matematični modeli za dvodimenzijsko računanje toka. V matematičnih modelih je dokaj enostavno prilagajati in spreminjati vhodne podatke in geometrijo. Na drugi strani pa se fizični modeli uporabljajo predvsem pri lokalnih, manjših problemih z zapleteno geometrijo.

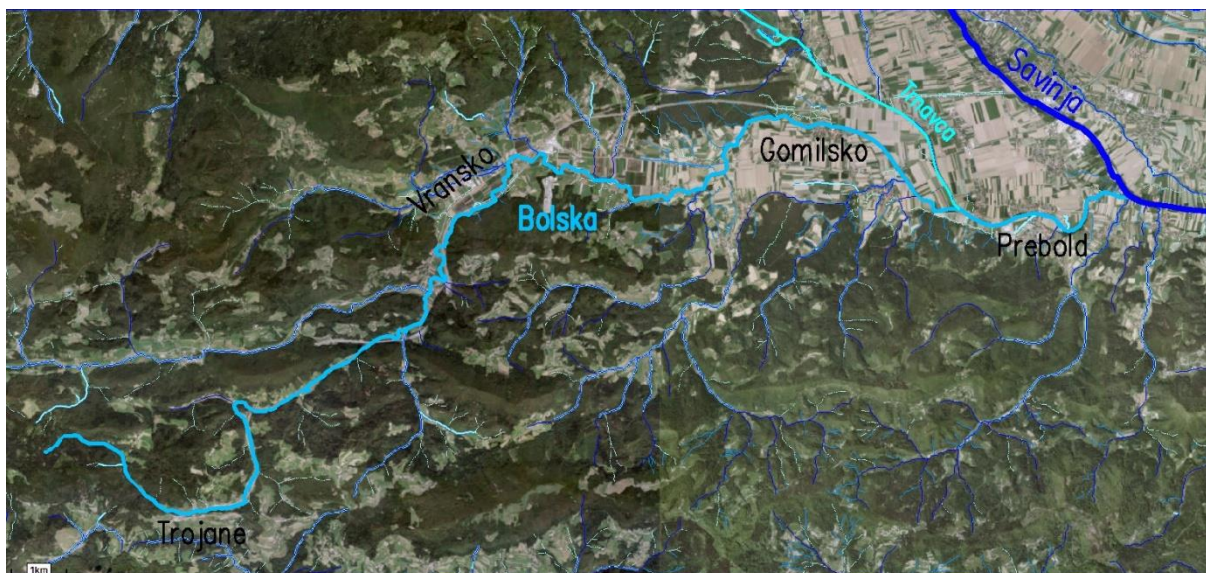
Namen izdelave diplomske naloge je spoznati postopke priprave matematičnih modelov dveh programov, PCFLOW2D ter MIKE. V prvem delu diplomske naloge je opisano območje matematičnega modela. V osrednjem delu so na kratko predstavljene enačbe, načini računanja programov in primerjava rezultatov izračunov testnega primera z enostavno geometrijo. Nato sledi priprava podatkov za primer realne geometrije za posamezni program. Na koncu so na podlagi primerjave dobljenih rezultatov podane še prednosti in slabosti posameznih modelov.

2 OPIS OBRAVNAVANEGA PROBLEMA Z REALNO GEOMETRIJO

2.1 Osnovne značilnosti Bolske

Reka Bolska je glavni odvodnik iz obsežnega območja iz večinoma hribovitega kraškega sveta, ki leži med Celjem in Ljubljano. Izvira severovzhodno od Trojan na nadmorski višini 815 m na pobočju med hriboma Reznarca in Javorje. Nato teče mimo Trojan po Črnem grabnu, mimo Vranskega in Gomilskega ter skozi Prebold, kjer se nato kot desni pritok izlije v reko Savinjo.

Dolžina Bolske od izvira do izliva znaša 33 km, pri tem se spusti za okoli 550 m. Povprečni padec nivelete dna tako znaša okoli 17 ‰. V zgornjem delu vodotoka od izvira do Ločice pri Vranskem je povprečen padec nivelete dna med 20 in 35 ‰, na spodnjem, bolj ravninskem delu od Ločice pri Vranskem do sotočja s Savinjo pa se povprečen padec giblje med 4 in 6 ‰. Vodotok ima tako v zgornjem delu bolj hudourniški, v spodnjem pa nižinski značaj. Porečje Bolske obsega 197 km².



Slika 1: Pregledna karta Bolske

V spodnjem delu teče Bolska ob kmetijskih in stanovanjskih površinah, zaradi česar je prišlo do sistematičnega reguliranja Bolske in njenih pritokov. V samih naseljih in v območju republiških cest in avtocest so se ureditve vodotokov izvajale za zmožnost pretoka visokih voda s povratno dobo 100 let. Kmetijske in ostale površine so se varovale pred visokimi

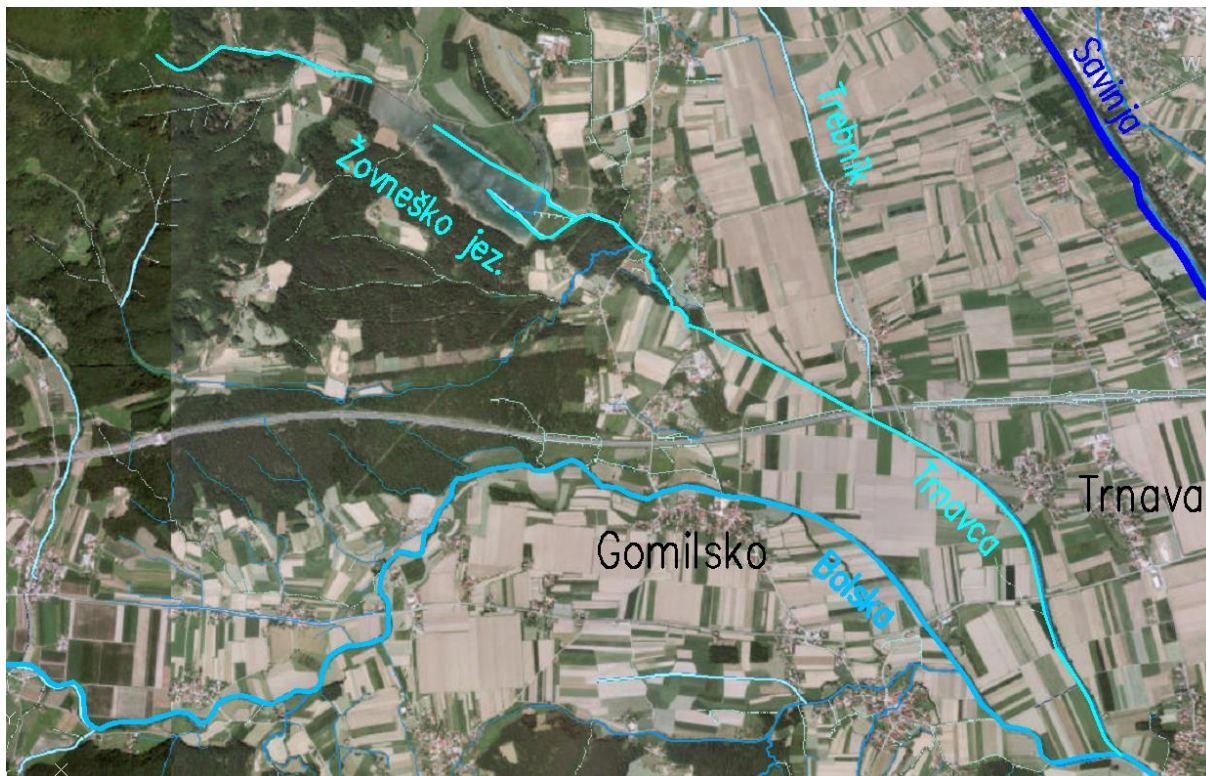
vodami, ki nastopijo vsakih 10–15 let. To je lepo vidno na obravnavanem območju, kjer Bolska najprej poplavi kmetijske površine, avtocesta in regionalna cesta pa ostaneta nepoplavljeni.

2.2 Osnovne značilnosti Trnavce

Eden izmed desnih pritokov Bolske je tudi vodotok Trnavca, ki izvira na pobočju Grmade na nadmorski višini okoli 435 m. Trnavco so po dobrem kilometru toka nato zajezili in tako ustvarili umetno Žovneško jezero. Nastalo je leta 1978, glavni namen izgradnje pa je bilo namakanje kmetijskih površin. Jezero je v povprečju globoko 7 m in obsega 49 hektarjev površine. Ob strugi Trnavce je za namen namakanja kmetijskih površin postavljenih tudi več črpališč.

Od jezera do Šmatevža teče Trnavca po naravno vijugasti strugi. Pod Šmatevžem pa je struga Trnavce regulirana. Tik za avtocesto se vanjo izlije vodotok Trebnik, v katerega se izliva Braslovško jezero.

Povprečen padec v zgornjem toku znaša od 7 do 9 ‰, v spodnjem delu okoli 5‰, njena dolžina pa je 24,7 km. Porečje Trnavce obsega 24,7 km².



Slika 2: Pregledna karta Trnavce

2.3 Hidrološke in hidravlične značilnosti območja

2.3.1 Padavine

Povprečna letna višina korigiranih padavin na prispevnem območju reke Bolske je med 1300 do 1400 mm v vzhodnem delu ter od 1600 do 1800 mm v zahodnem delu. Med letoma 1956 in 1972 je bila največja količina padavin zabeležena na merilni postaji Jeronim, in sicer 1800 mm. Povprečno število dni s padavinami prav tako narašča od vzhoda proti zahodu. Največ padavin v poletnem času je julija in avgusta, v jesenskem pa novembra.

Poplave se pojavljajo predvsem v jesenskem obdobju, ko je zaradi nižje temperature manjša evapotranspiracija in zmanjšana potreba rastlin po vodi, padavine pa so dolgotrajneše. S podrobnejšo analizo hidroloških podatkov in terenskih raziskav je bilo ugotovljeno, da se poplave v dolini Bolske lahko pojavijo vsak mesec v letu. Najpogostejše so v januarju in novembru, manj pa junija, septembra in oktobra.

2.3.2 Rečni režim

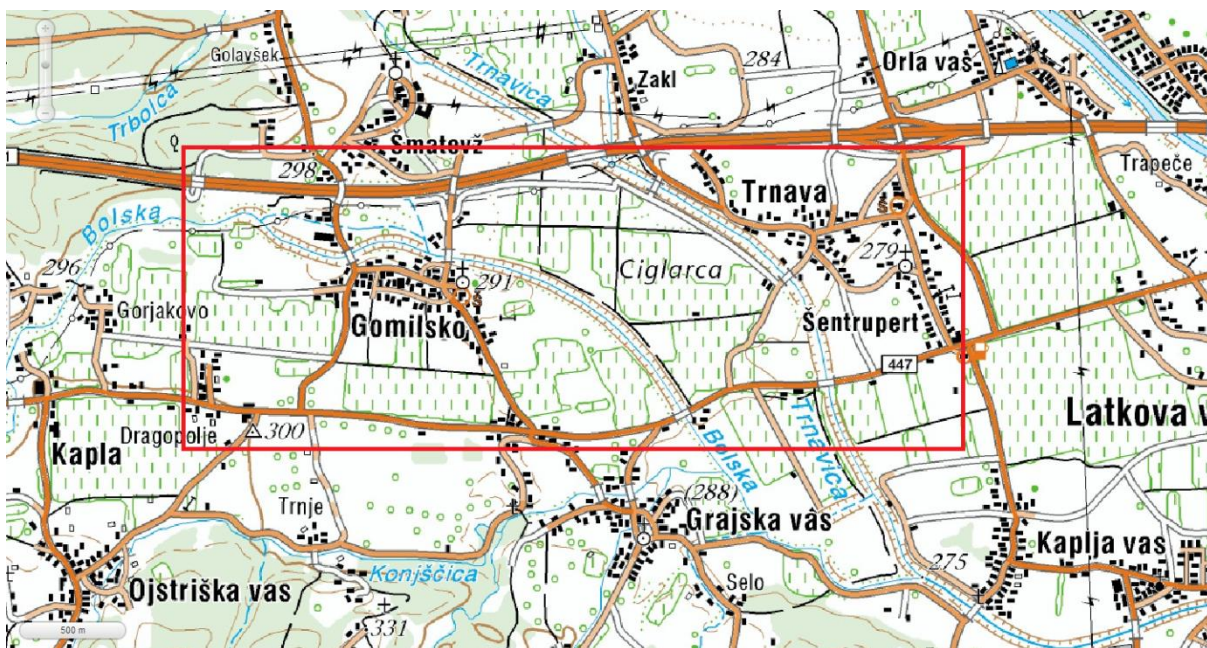
Za Bolsko je značilen dežno-snežni režim. Osnovne značilnosti tega režima so primarni viški v aprilu ter sekundarni višek v novembru. Primarni nižek nastopi poleti, po navadi avgusta. Sekundarni nižek pa pozimi, ki pa je kratkotrajen in je večji od poletnega. Ker gre pri Bolski za kontinentalno varianto dežno-snežnega režima, so sekundarni viški manj izraziti, se pa doba najnižje poletne vode zavleče v september.

3 OPIS OŽJEGA OBRAVNAVANEGA OBMOČJA

3.1 Osnovne značilnosti območja

Obravnvano območje leži južno od avtoceste Celje–Vransko ter severno od regionalne ceste R2-447, odsek Šentrupert–Ločica. Na vzhodni strani območja sta naselji Šentrupert in Trnava, na zahodni strani pa naselje Gomilsko.

Bolska priteče vzdolž avtoceste iz zahodne smeri, obide po severni strani naselje Gomilsko ter se v blagem desnem zavojju usmeri proti jugovzhodu. Trnavca priteče iz smeri severozahoda izpod avtocestnega mostu, v rahlem desnem zavojju obide naselji Trnava in Šentrupert po zahodni strani ter nato prav tako zapusti območje v smeri jugovzhoda.



Slika 3: Obravnvano območje (Geodetski inštitut Slovenije, 4. 4. 2014).

Ker je regionalna cesta Šentrupert–Ločica izvedena v nasipu, ustvarja zaježbo za vodo, ki se razlije na poplavno območje. Zato so v cestnem nasipu narejeni trije večji prepusti, ki pa so premajhni, da bi lahko odvajali vso vodo. Lokacije prepustov so razvidne na pregledni situaciji v prilogi A.

3.2 Osnovne lastnosti struge

3.2.1 Bolska

Struga Bolske je v povprečju na območju široka okoli 20 metrov in je v celotnem delu regulirana. Ob terenskem ogledu smo ugotovili, da ima več talnih pragov ter skalnih drč, ki preprečujejo erozijo dna. Opazili smo tudi, da je odsek slabo vzdrževan, saj je struga zelo zaraščena, na mostnih opornikih pa je plavje. Na nekaterih delih je uničeno hidrotehnično varovanje brežin ter dna struge.



Slika 4: Skalna drča na Bolski

3.2.2 Trnavca

Prečni prerez Trnavce je sestavljen. Spodnji del prereza je širok približno 4 metre, zgornji pa okoli 18 metrov. Tudi Trnavca je bila ob terenskem ogledu na nekaterih delih zelo zaraščena. Dolvodno od mostu pri avtocesti se je zaradi zaraščenosti in plavja ustvarila zaježba, ki je zaprla celoten spodnji del sestavljenega profila.



Slika 5: Zajezba na Trnavci

3.3 Prečni objekti

Na obravnavanem odseku Bolske so trije mostovi. Prvi most je v profilu P-B177 (most B1), kjer Bolsko prečka regionalna cesta R2-447 Šentrupert–Ločica. Most je armiranobetonski z vmesno podporo v sredini struge. Kot lahko vidimo na sliki 6, je to zelo neugodno, saj se na mostnem uporniku nabira plavje, ki znatno zmanjša prevodnost, še posebej v času visokih voda, kjer je sprotno odstranjevanje plavja nemogoče. Pod mostom lahko opazimo tudi poškodovano zavarovanje brežin. Dolžina mostnega opornika vzdolž struge je 10,5 m.



Slika 6: Most na Bolski v profilu P-B177 (most B1)

Drugi most je v profilu P-B219 (most B2), tretji pa v P-B235 (most B3). Čez oba vodi cesta v naselje Gomilsko. Oba sta armiranobetonska z dvema podporama, po eno na vsaki strani struge, kar je nekoliko bolj ugodno za pretok. Na stebrih ni znakov nabiranja plavja. Dolžina mostnega opornika mostu B2 je 6 m, mostu B3 pa 8,5 m. Oba sta v slabšem stanju. Na mostu B2 je uničeno varovanje struge, na mostu B3 pa je poškodovan zgornji armiranobetonski del.



Slika 7: Most B2



Slika 8: Most B3

Na obravnavanem odseku Bolske so v profilih P-B173, P-B176, P-B206, P-B231 ter P-B243 skalne drče in v profilih P-B194, P-B205, P-B214, P-B234 in P-B258 skalne pragove. Prag v profilu P-B214 je delno podrt. V profilu P-B248 pa je še skalno zavarovanje zaradi prečkanja plinovoda.

Na vodotoku Trnavca so prav tako trije mostovi ter ena brv. Prvi most na Trnavci je v profilu P-T29 (most T1), kjer Trnavco prečka regionalna cesta R2-447. Ta most je bil obnovljen leta 2011. Je armiranobetonski, brez podpor, širine vzdolž struge približno 9,5 m. Pod mostom je tudi skalni prag.



Slika 9: Most T1

V profilu P-T44 je nato manjši armiranobetonski most širine 4,4 m, z dvema podporama. Gorvodno od mostu T2 je železna brv (most T3) v profilu P-T52, z dvema vmesnima armiranobetonskima podporama dolgima 1,8 m.

V profilu P-T64 je še en armiranobetonski most širine vzdolž struge 5 m, ki je bil postavljen ob izgradnji avtoceste. Most je brez vmesnih podpor.



Slika 10: Most T4

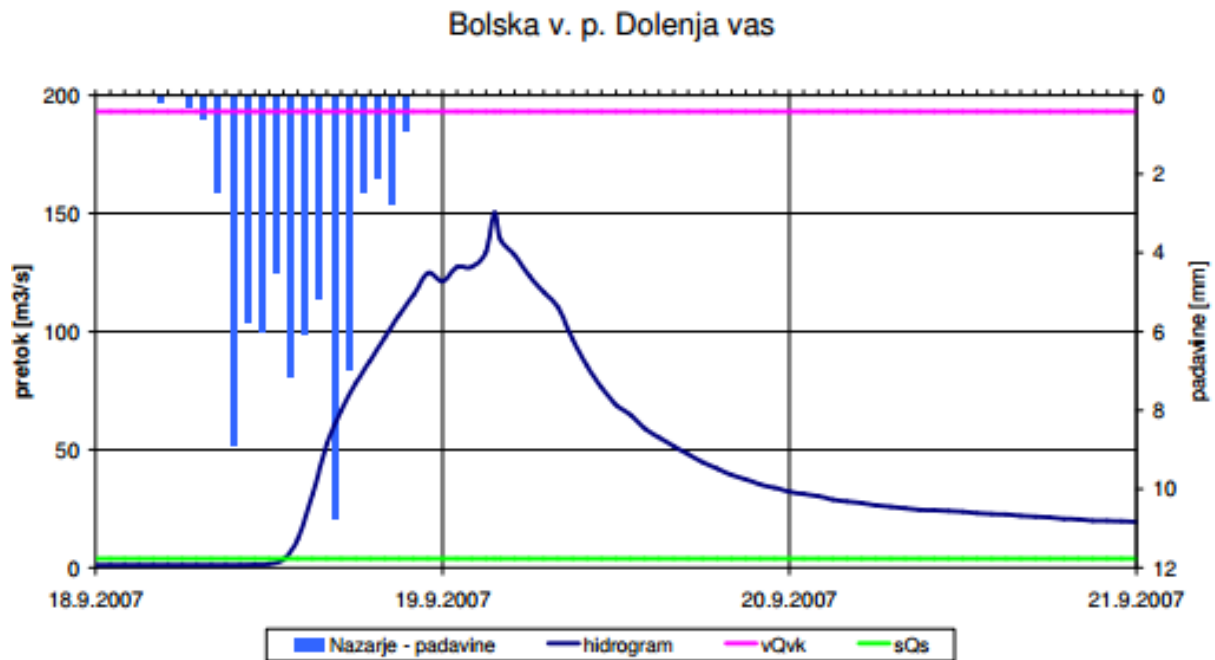
3.4 Poplavna ogroženost območja

Območje, ki ga obravnavamo, je poplavno zelo ogroženo, saj velik del območja ob in med strugama spada v razred srednje poplavne nevarnosti (označen z oranžno barvo), nekateri deli pa celo v razred velike poplavne nevarnosti (označen z rdečo barvo).

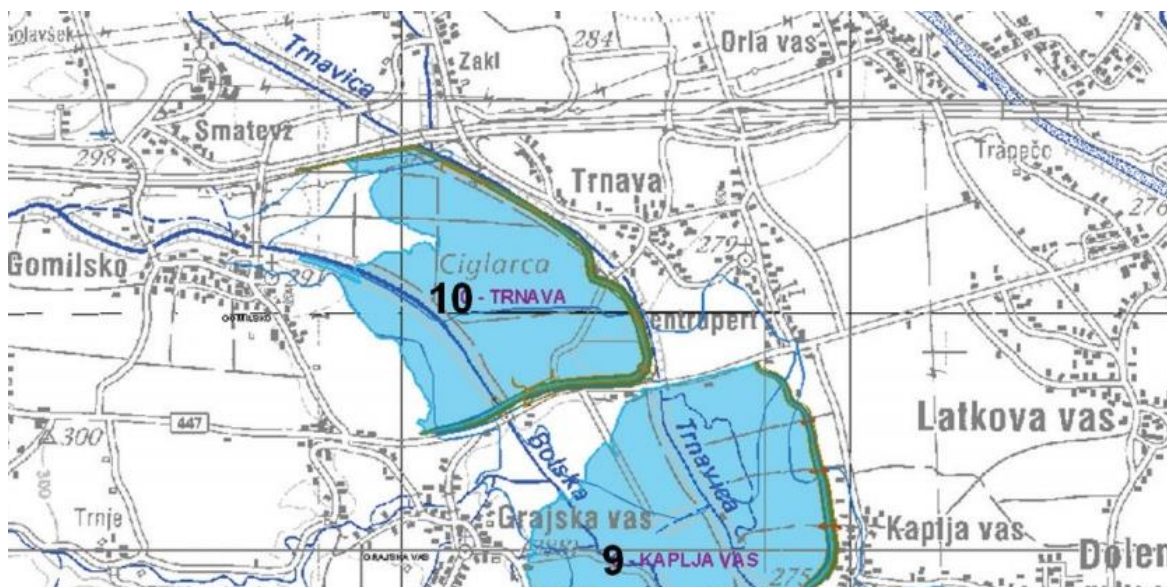


Slika 11: Razredi poplavne nevarnosti (Atlas okolja, 24. 4. 2014).

Eden zadnjih večjih poplavnih dogodkov se je zgodil 18. 9. 2007. Takrat so močne in izdatne padavine zajele območje severozahodne in severne Slovenije, ki so povzročile hiter porast rek in hudournikov. Bolska je na merilni postaji v Dolenji vasi dosegla največji pretok 150 m³/s, kar je pretok s povratno dobo 20–25 let. V večini so bile poplavljene kmetijske površine ter bližnje hiše. Na tej vodomerni postaji znaša pretok s stoletno povratno dobo 243 m³/s.



Slika 12: Hidrogram Bolske v Dolenji vasi ter urna intenziteta padavin v Nazarjih (ARSO, 2008: 7).



Slika 13: Lokacija suhega zadrževalnika Trnava (Zidarič, 2009: 183).

Na obravnavanem območju je predviden suhi zadrževalnik Trnava s prostornino 2.580.000 m³, ki bi skupaj s še 9 drugimi zadrževalniki tvoril sistem zaščite Spodnje Savinjske doline pred poplavami.

Že sedaj pa bi lahko rekli, da cestni nasip tvori nekakšen zadrževalnik, saj se velik del pretoka, ki bi sicer odtekel dalje po Bolski in Trnavci, zadrži na območju bodočega zadrževalnika. Iz slike 13 lahko vidimo, da bo nasip ob Trnavci varoval naselji Trnavo in Šentrupert pred visokimi vodami Bolske.

4 MATEMATIČNO MODELIRANJE

4.1 Opis računalniških programov

4.1.1 PCFLOW2D

PCFLOW2D je računalniški program, ki je bil razvit na Katedri za mehaniko tekočin na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani. Omogoča računanje toka vode v dveh dimenzijah, in sicer v x in y smeri. Tako je možno s programom simulirati širjenje poplavnih valov, drobirskih tokov ter tudi transport lebdečih plavin v rekah, jezerih in morju.

Predpostavke, upoštevane pri izračunu:

- Upoštevati je možno nestalni tok.
- Tok je dvodimenzionalen, hitrosti u in v so povprečne po globini.
- Porazdelitev tlakov je hidrostatična.
- Napetosti zaradi trenja ob dno izrazimo z Manningovo empirično enačbo.
- Napetosti zaradi vetra na gladini so zanemarjene.
- Pri modeliranju globinsko povprečnih turbulentnih napetosti je možno upoštevati k- ϵ model ali preprostejši model konstantne turbulentne viskoznosti.

4.1.1.1 Osnovne enačbe

Ob upoštevanju navedenih predpostavk so kontinuitetna in dinamični enačbi v modelu upoštevane v naslednji obliki:

- Kontinuitetna enačba:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad 1$$

- Dinamična enačba v x smeri:

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial h}{\partial x} - gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - ghn^2 \frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hv_{ef} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv_{ef} \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad 2$$

- Dinamična enačba v y smeri:

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial h}{\partial y} - gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - ghn^2 \frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hv_{ef} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv_{ef} \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad 3$$

Kjer je:

h – globina vode

u in v – komponenti hitrosti v x in y smeri

z_b – kota dna

n – Manningov koeficient hrapavosti

g – gravitacijski pospešek

t – čas

Kinematični koeficient efektivne viskoznosti ν_{ef} je lahko konstanten ali pa določen s pomočjo globinsko povprečne verzije k - ε modela turbulence:

$$\nu_{ef} = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad 4$$

$$\frac{\partial(hk)}{\partial t} + \frac{(huk)}{\partial x} + \frac{\partial(hvk)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\nu_{ef}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\nu_{ef}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + hG - c_D h\varepsilon + hP_{kv} \quad 5$$

$$\frac{\partial(h\varepsilon)}{\partial t} + \frac{(hu\varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(hv\varepsilon)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\nu_{ef}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\nu_{ef}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + c_1 \frac{\varepsilon}{k} hG - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k} h + hP_{\varepsilon v} \quad 6$$

Kjer je:

k – turbulentna kinetična energija na enoto mase

ε – stopnja disipacije turbulentne kinetične energije

G – produkcija k zaradi horizontalnih gradientov hitrosti

P_{kv} in $P_{\varepsilon v}$ – izvorna člena zaradi trenja ob dno

$c_D, c_\mu, c_1, c_2, \sigma_k$ in σ_ε – univerzalne konstante v modelu turbulence

4.1.1.2 Princip računanja

Sistem parcialnih diferencialnih enačb (1, 2, 3, 4, 5 in 6) rešujemo numerično z metodo končnih volumnov Patankarja in Spaldinga (Patankar, 1980). Osnovne značilnosti te metode so premaknjena numerična mreža, hibridna shema (kombinacija centralnodiferenčne in sheme gorvodnih razlik) in iteracijsko popravljjanje polja globin, dokler globine in hitrosti ne zadovoljijo kontinuitetne in dinamičnih enačb. Kot kriterij konvergence se upošteva, da je vsota napak v vseh točkah mreže zaradi neizpoljenosti kontinuitetne in dinamičnih enačb manjša od neke predpisane vrednosti (po navadi pol do enega odstotka celotnega pretoka skozi področje).

Sistem enačb 1, 2, 3, 5 in 6 je eliptičnega tipa, zato potrebujemo robne pogoje na vseh robovih računskega področja.

4.1.2 MIKE 11

Računalniški program MIKE je razvil danski hidravlični inštitut DHI (Danish Hydraulic Institute-DHI, 2007). Sodi med najcelovitejše in najbolj preizkušene modele. Ima obsežen sklop orodij, ki so med seboj kompatibilna. Od vseh smo pri diplomski nalogi uporabili MIKE 11, MIKE 21 in MIKE Flood. Postopki, ki so skupni vsem programskim orodjem, pa se odvijajo znotraj sklopa MIKE ZERO.

Program MIKE 11 je namenjen računanju enodimenzionalnega toka vode, premeščanja plavin ter širjenja polutantov v vodotokih. Z njim lahko enostavno in hitro izračunamo vpliv poplavnih valov, načrtujemo protipoplavne ukrepe, napovedujemo poplave v realnem času, optimiziramo delovanje zadrževalnikov, analiziramo porušitev pregrad in podobno.

Uporabljamo ga lahko predvsem za večje rečne sisteme, saj lahko medsebojno povežemo veliko število vodotokov na večjem območju. Možno pa je dodajati tudi različne hidrotehnične objekte, kot so na primer prelivni, mostovi, prepusti in črpalke.

4.1.2.1 MIKE 11 osnovne enačbe

MIKE 11 uporablja za izračun 1D toka Saint-Venantovi enačbi:

- Kontinuitetna:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

- Dinamična:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{S}\right)}{\partial x} + gS \frac{\partial h}{\partial x} = gS(I_0 - I)$$

Kjer je:

Q – pretok

S – hidravlični prerez

q – prečni pretok

h – globina

g – gravitacijski pospešek

I_0 – naklon dna

I – naklon gladine

t – čas

Parcialne diferencialne enačbe se rešujejo s pomočjo Abbottove zamaknjene centralno implicitne sheme končnih razlik.

4.1.3 MIKE 21

Z MIKE 21 je možno simulirati 2D tok v rekah, jezerih, razlivanje rek na poplavna področja, porušitvene valove itd. V program lahko vnesemo tudi najrazličnejše vplive, kot recimo vpliv vetra na tok v jezerih in morju, vpliv Coriolisovih sil, izhlapevanje, zračni tlak itd.

4.1.3.1 MIKE 21 osnovne enačbe

Program računa s pomočjo naslednjih enačb:

- Kontinuitetna enačba v x in y smeri:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t}$$

- Dinamična enačba v x smeri:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_q - f(V)V_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0$$

- Dinamična enačba v y smeri:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_p - f(V)V_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0$$

Kjer je:

$h(x, y, t)$ – globina vode

$d(x, y, t)$ – časovno spremenljiva globina vode

$\zeta(x, y, t)$ – kota dna

$\rho, q(x, y, t)$ – gostota toka v x in y smeri

$C(x, y)$ – Chezyjev koeficient hrapavosti

g – gravitacijski pospešek

$f(V)$ – strižne napetosti na površini zaradi vetra

$V, V_x, V_y(x, y, t)$ – hitrost vetra in komponente hitrosti v x in y smeri

$\Omega(x, y)$ – Coriolisov koeficient

$\rho_a(x, y, t)$ – zračni tlak

ρ_w – gostota vode

x, y – prostorske koordinate

t – čas

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ – komponente efektivnih strižnih napetosti

4.1.3.2 Princip računanja

Sistem parcialnih diferencialnih enačb se rešuje s premaknjeno (»staggered«) shemo končnih razlik. Poleg tega pa sta v program vdelana še Double Sweep Algorithm in Alternate Direction Implicite technique, ki skrbita za natančne, zanesljive in hitre izračune. Kot rezultat dobimo globinsko povprečno hitrost in globino vode v središču vsake celice modela.

4.1.4 MIKE Flood

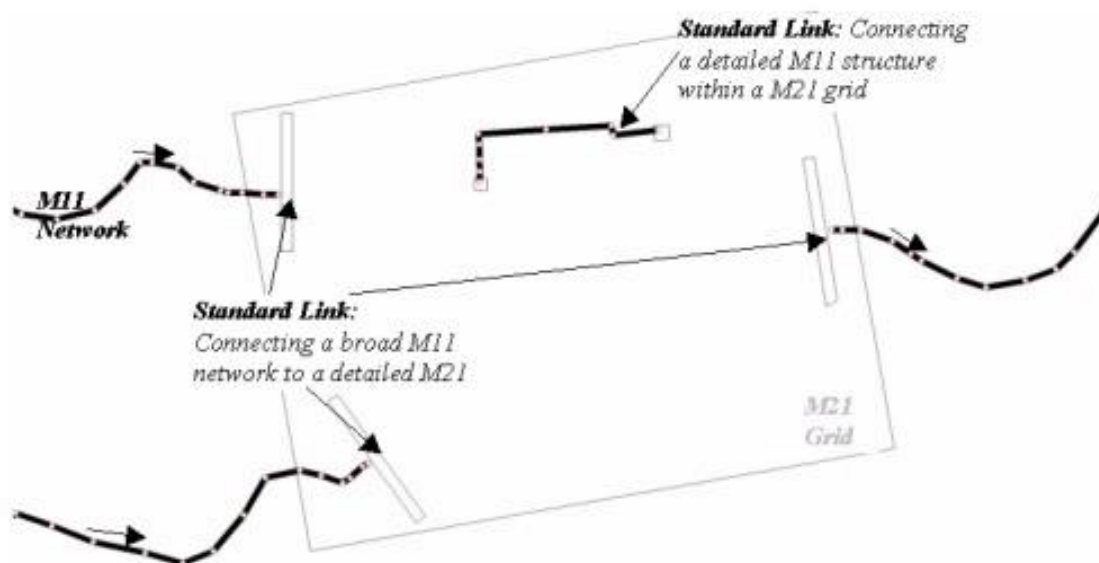
V programu MIKE Flood sta združena dva sklopa, MIKE 11 in MIKE 21. Program MIKE Flood tako združuje dobre lastnosti obeh. S programom MIKE 11 lahko obravnavamo obsežnejša območja, saj je računanje enodimenzionalnega toka hitrejše in enostavnejše. S tem tudi bolje opišemo tok vode v strugah, saj lahko natančneje opišemo njeno geometrijo. MIKE 11 tudi učinkovito ponazarja vpliv mostov in drugih objektov v strugah ter dobro prenaša spremembo režima tokov. Z njim je tudi lažji vnos robnih pogojev v računsko območje. Za natančno obravnavo tokov na poplavnih področjih pa poskrbi program MIKE 21. Z možnostjo vgnезdenih ter fleksibilnih 2D mrež je možna natančnejša 2D obravnava območij. Za delovanje programa MIKE Flood moramo imeti delujoča modela MIKE 11 in MIKE 21.

4.1.4.1 Princip računanja MIKE Flood

Ko imamo pripravljena modela MIKE 11 ter MIKE 21, ju lahko združimo s pomočjo programa MIKE Flood. Narediti moramo »couple file«, s katerim skupaj povežemo 1D in 2D model. Pri tem imamo na voljo 5 različnih povezav:

- Čelno povezavo (Standard Link)

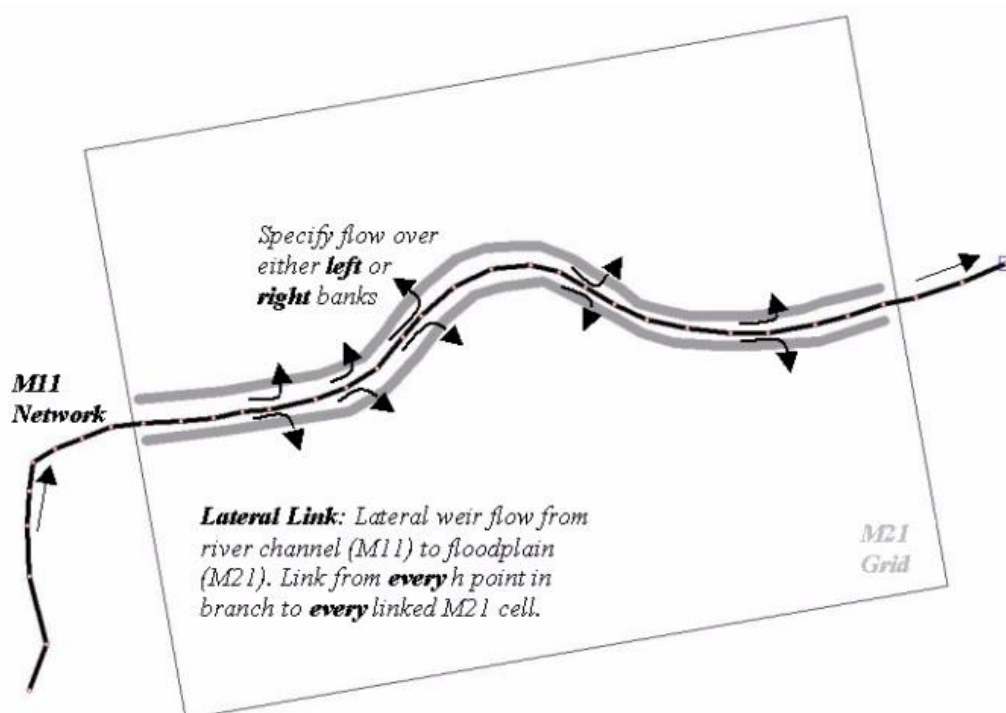
S čelno povezavo povežemo strugo iz MIKE 11 z eno ali več celicami iz modela MIKE 21. To povezavo uporabljamo na mestih, kjer nas zanima podrobno 2D dogajanje znotraj večjih enodimenzionalnih mrež rek, ter tam, kjer želimo v dvodimenzionalni model vnesti bolj podrobno enodimenzionalno povezavo (npr. jarek).



Slika 14: Uporaba čelne povezave (MIKE Flood user manual, 2007).

- Bočno povezavo (Lateral Link)

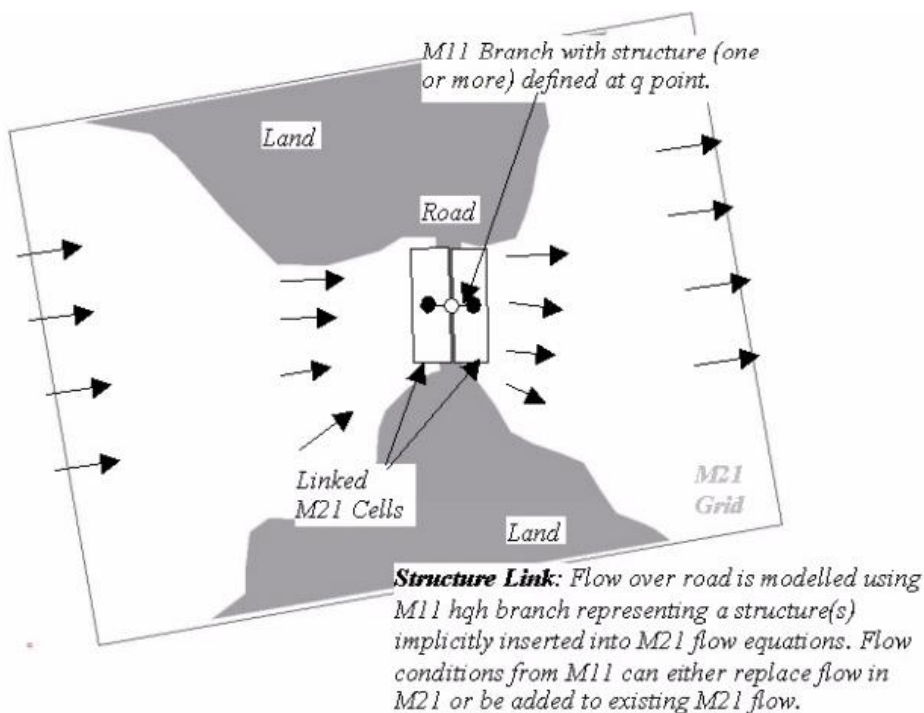
Z bočno povezavo definiramo, kje se voda iz vodotoka preliva v 2D model in obratno. Lahko določimo, da vodotok komunicira na celotnem območju, po katerem teče, ali pa le na določenih mestih. Ta povezava se uporablja za simuliranje preliivanja vode iz vodotoka na poplavne površine.



Slika 15: Uporaba bočnih povezav (MIKE Flood user manual, 2007).

- Povezavo z objektom (Structure Link)

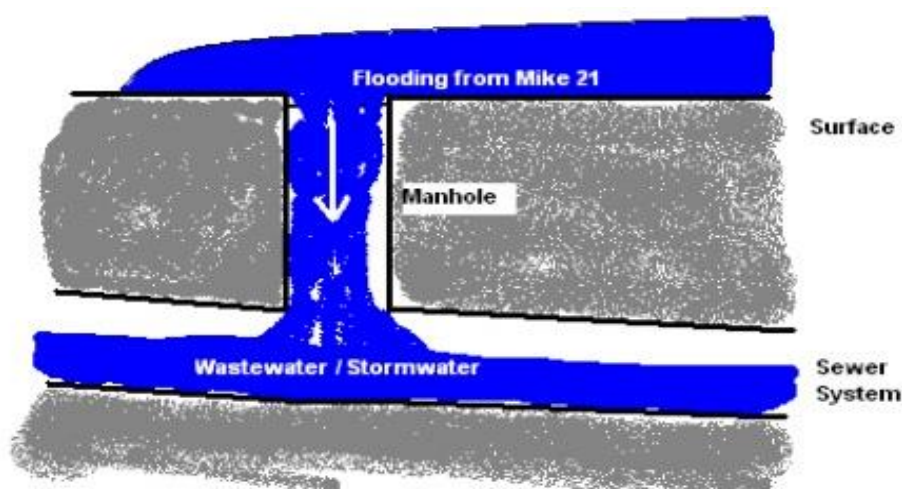
Kadar želimo v modelu MIKE 21 vključiti enodimenzionalen objekt, kot na primer most ali prepust iz modela MIKE 11, uporabimo to povezavo. Povezava sestoji iz treh točk struge v modelu MIKE 11. Podati moramo prečni prerez gorvodno od objekta, na mestu objekta ter dolvodno od objekta. Ta pa se nato poveže z enačbami toka v modelu MIKE 21.



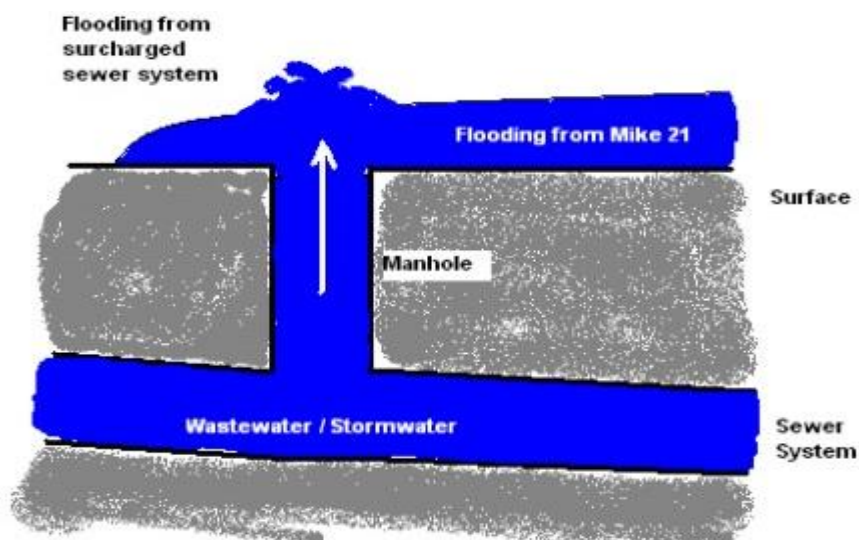
Slika 16: Uporaba povezave z objektom (MIKE Flood user manual, 2007).

- Povezavo s kanalizacijskim omrežjem (Urban Link)

Kadar imamo na območju kanalizacijo, ki je v poplavnem območju, lahko z »Urban Link« povezavo simuliramo vtok ali iztok iz kanalizacijskih jaškov.



Slika 17: Uporaba povezave s kanalizacijskim omrežjem – vtok v kanalizacijo (MIKE Flood user manual, 2007).



Slika 18: Uporaba povezave s kanalizacijskim omrežjem – iztok iz kanalizacije (MIKE Flood user manual, 2007).

- Povezave brez pretoka (Zero Flow Link)

S to povezavo lahko določimo celice, kjer ni pretoka v x ali/in y smeri. Tako lahko simuliramo protipoplavne nasipe in ceste na poplavnih območjih. Alternativa uporabi te povezave je uporaba »suhih« celic. Celici določimo »land value«, s tem pa povemo programu, da te celice niso nikoli potopljene.

4.1.5 AutoCAD in Aquaterra

Pri pripravi matematičnih modelov smo si pomagali še s programom AutoCAD ter programom Aquaterra, ki deluje na osnovi programa AutoCAD. AutoCAD je najpogosteje uporabljen program za projektiranje in konstruiranje pri nas in po svetu. Z njim je možno risati in urejati risbe v vseh treh dimenzijah. V diplomski nalogi smo ga uporabili za pripravo geometrijskih podatkov ter prikaz rezultatov.

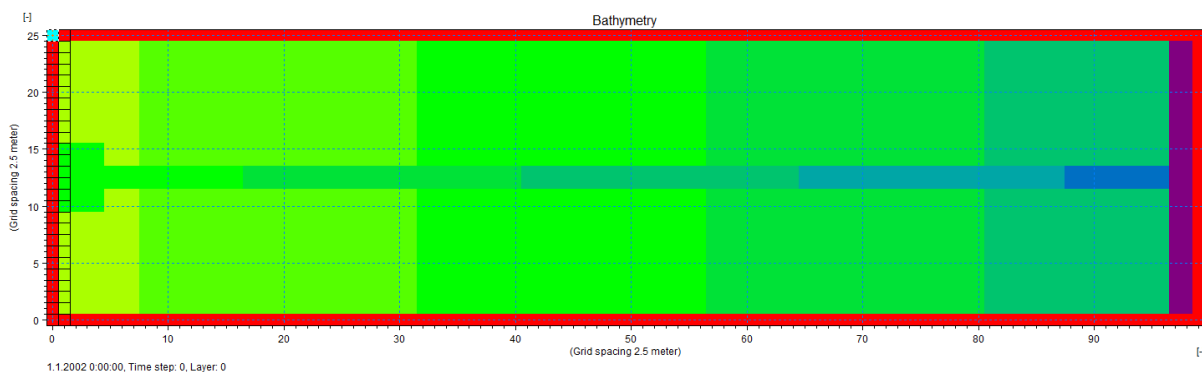
Program Aquaterra je eden od programov razvitih s strani podjetja CGS Plus, Inovativne informacijske in okoljske tehnologije (Vidmar, Petkovšek). Namenjen je načrtovanju regulacij

in ureditev vodotokov. Program sestavlja več modulov, kot so Situacija osi, Vzдолžni profil, Prečni profil ter vmesniki za HEC-RAS, MIKE 11 in MIKE 21.

4.2 Testni primer s poenostavljeno geometrijo

4.2.1 Priprava testnega modela

Da bi lažje določili razlike med programoma MIKE 21 in MIKE Flood, smo na začetku izdelali model s poenostavljeno geometrijo, ki jo lahko vidimo na spodnji sliki 19. Celice so kvadratne s stranico 2,5 m. Model je sestavljen iz 100 x 26 celic. Na sredini modela je 5 m široka ter 1 m globoka struga s padcem 1 %. Na koncu modela se voda prosto preliva preko roba v 5 m širok kanal, v katerem so ponori. Na začetku modela imamo 6 izvirov, iz katerih izvira 20 m³/s v smeri proti koncu modela. Pri modelu MIKE 11 smo kot zgornji robni pogoj uporabili konstantni pretok 20 m³/s, za spodnji robni pogoj pa določili višino, pridobljeno kot rezultat s programom MIKE 21. Koeficient hrapavosti je bil v obeh primerih enak, in sicer $n = 0,03125$ (1/32) sm^{-1/3} in to tako v strugi kot na poplavnih področjih.

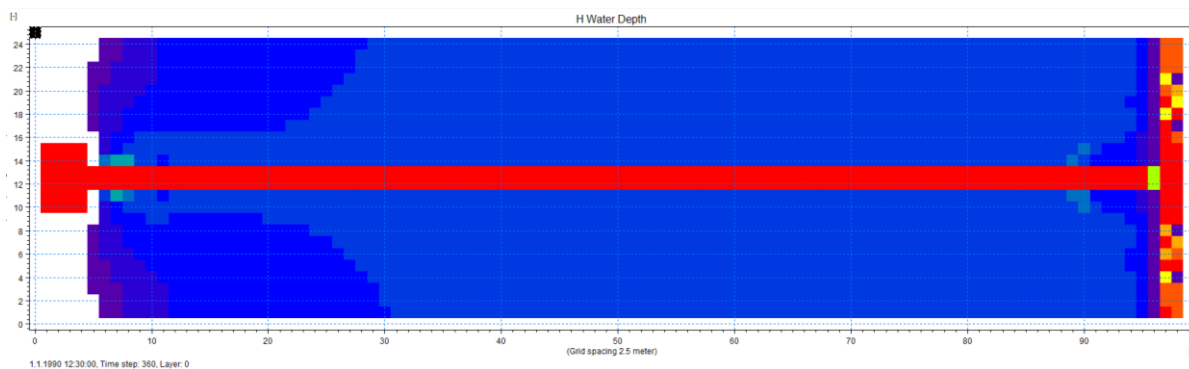


Slika 19: Geometrija testnega primera

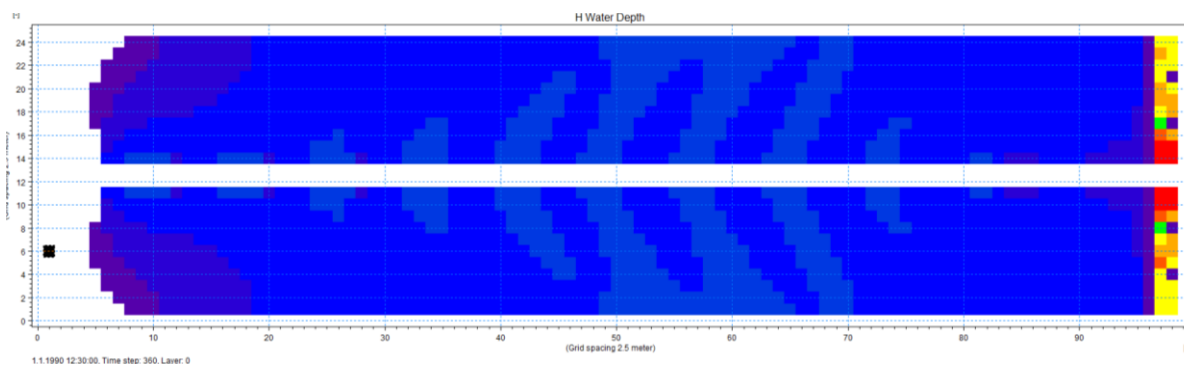
4.2.2 Rezultati testnega primera

Iz dobljenih rezultatov lahko vidimo, da pri istem pretoku in geometrijskih podatkih dobimo pri računanju s programom MIKE Flood nekoliko nižje gladine vode na poplavnih območjih. S programom MIKE 21 smo dobili v večjem delu poplavnega področja globine nekje od 15 do 17 cm, s programom MIKE Flood pa manj nekje od 13 do 15 cm. V rezultatih gladin pri MIKE Flood lahko opazimo, da so sredinske celice navidezno prazne, to pa zaradi tega, ker po teh

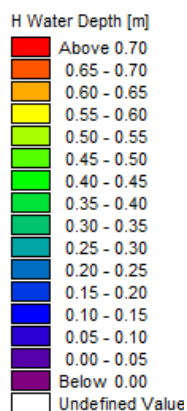
celicah poteka struga, ki se računa s programom MIKE 11. Za rezultate gladin v strugi moramo tako pogledati rezultate, dobljene s tem programom. Primerjava gladin v in ob strugi je zaradi boljše preglednosti prikazana v grafu.



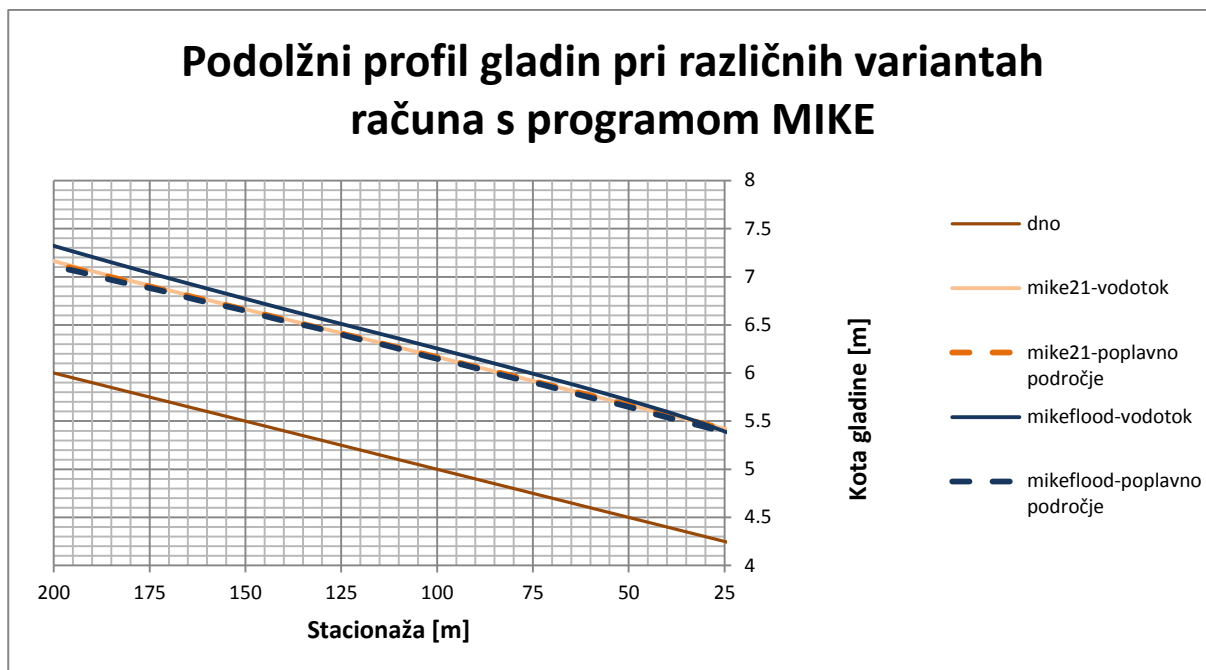
Slika 20: Globina vode izračunana z MIKE 21



Slika 21: Globina vode izračunana z MIKE Flood



Slika 22: Legenda globin rezultatov za sliki 20 in 21



Grafikon 1: Primerjava gladin dobljenih s programom MIKE

Iz grafa lahko razberemo, da je gladina v strugi ter na poplavnem področju pri MIKE 21 dokaj podobna. Pri modelu MIKE Flood pa je gladina na poplavnem področju na začetku modela za nekje 10 cm nižja kot v sami strugi, proti koncu modela pa se ta razlika zmanjša. To je posledica tega, da MIKE Flood računa prelivanje preko roba struge v modelu MIKE Flood kot preliv. Tako mora biti dosežena neka določena razlika globin, da se začne prelivati iz struge na poplavno področje.

Za primerjalno gladino na poplavnem območju smo vzeli gladino, ki je za 5 celic oziroma 12,5 m oddaljena od struge.

4.3 Priprava matematičnih modelov za realni primer

4.3.1 AutoCAD in Aquaterra

Geometrijske podatke za območje Gomilskega smo poleg digitalnega modela reliefa dobili še kot geodetski posnetek območja s posnetimi profili na Bolski in Trnavci ter z izrisanimi prečnimi prerezi. S pomočjo programa AutoCAD in geodetskega posnetka smo lahko določili osi obeh vodotokov. Ko smo uredili točke prečnih prerezov in s programom Aquaterra prebrali višine v posameznih prerezih, smo lahko določili še mesta prelivanja na levem in

desnem robu na posameznem prerezu. Nato smo s pomočjo vmesnika za MIKE 11 izvozili datoteke, v katerih so bile definirane osi vodotokov ter prečnih prerezov. S tem smo na zelo enostaven in dokaj hiter ter točen način definirali prečne profile in potek struge za MIKE 11.

S pomočjo programa AutoCAD smo pripravili tudi matriko višin za računanje s PCFLOW2D. Za osnovo smo uporabili matriko, določeno s programom MIKE 21, ki smo jo nato prestavili v koordinatno izhodišče ter zavrteli za 90° v levo. Zaradi velikega števila točk je bil proces kar zamuden.

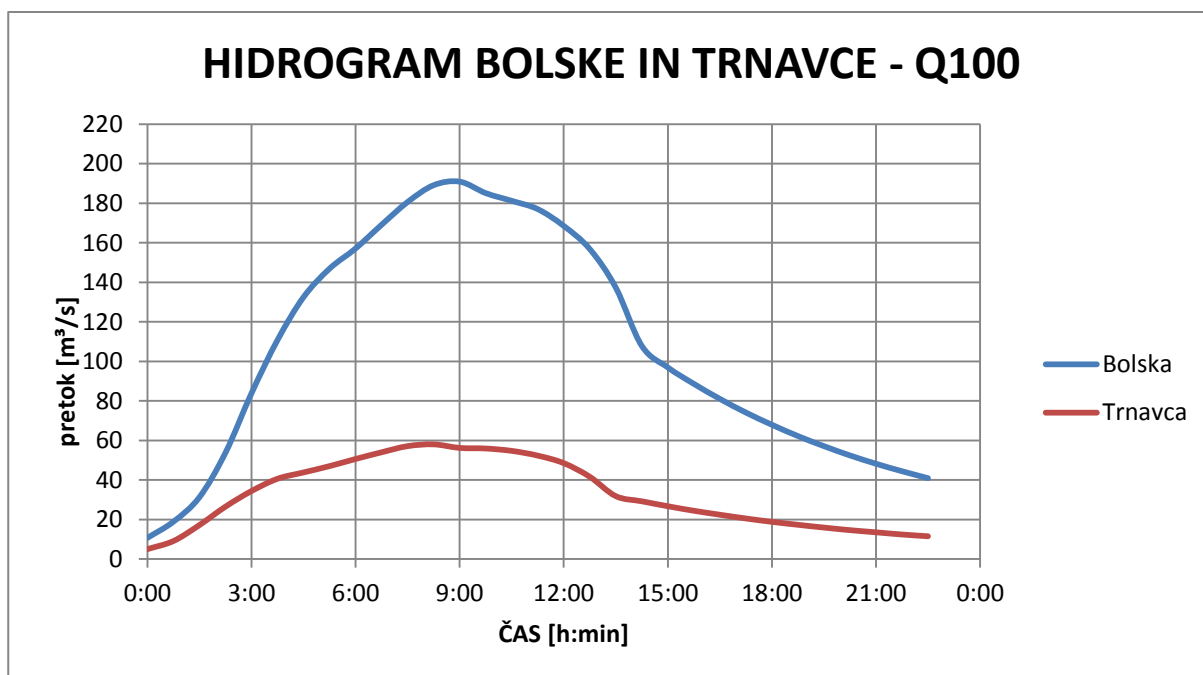
S temi podatki smo lahko začeli pripravljati vse potrebno za izračun s programi MIKE in PCFLOW2D.

4.3.2 MIKE 21

Priprava matematičnega modela za MIKE 21 je razdeljena na dva dela, na osnovne ter hidrodinamične parametre. V osnovnih parametrih določimo geometrijo in način hidravličnega izračuna, začetek in konec simulacije ter časovni korak računa, robne pogoje ter lokacijo izvirov in ponorov na modelu.

Geometrija modela je določena na podlagi LIDAR posnetka območja, ki so ga posredovali na Ministrstvu za kmetijstvo in okolje. Posnetek LIDAR je že bil obdelan v kvadratno mrežo točk z razdaljo 1 m med točkami, ki smo ga vnesli v program MIKE ZERO – Bathymetries. Določili smo le še lokacijo ter velikost računske mreže. Slednjo smo določili na podlagi velikosti modela ter širine struge Bolske ter Trnavce. Odločili smo se za mrežo s celicami velikimi 5 x 5 m, saj smo lahko s to velikostjo dokaj natančno opisali obe strugi ter hkrati dobili še obvladljivo število celic za izračun. Območje smo razdelili na 777 celic v smeri vzhod–zahod in 285 celic v smeri sever–jug. S pomočjo interpolacije je nato program vsaki celici določil višino. Ker je bil posnetek terena obdelan tako, da so izločili vse motnje na terenu, vegetacijo in stavbe, smo s pomočjo ortofoto posnetka dvignili celice mreže na mestih objektov. Na koncu smo v spodnjem desnem kotu območja še poglobili pas v širini 25 m ter tako ustvarili nekakšen bazen, ki je omogočil nemoteno odtekanje vode iz modela.

Glede na čas trajanja poplavnih valov smo nato določili začetni in končni čas simulacije. Izračun smo izvedli za dva poplavna vala, in sicer za poplavni val, ki bi nastal pri stoletnem pretoku, ter za poplavni val, ki se je zgodil 18. 9. 2007. Podatke za stoletni pretok smo pridobili od podjetja IZVO-R in so prikazani v grafikonu 2.

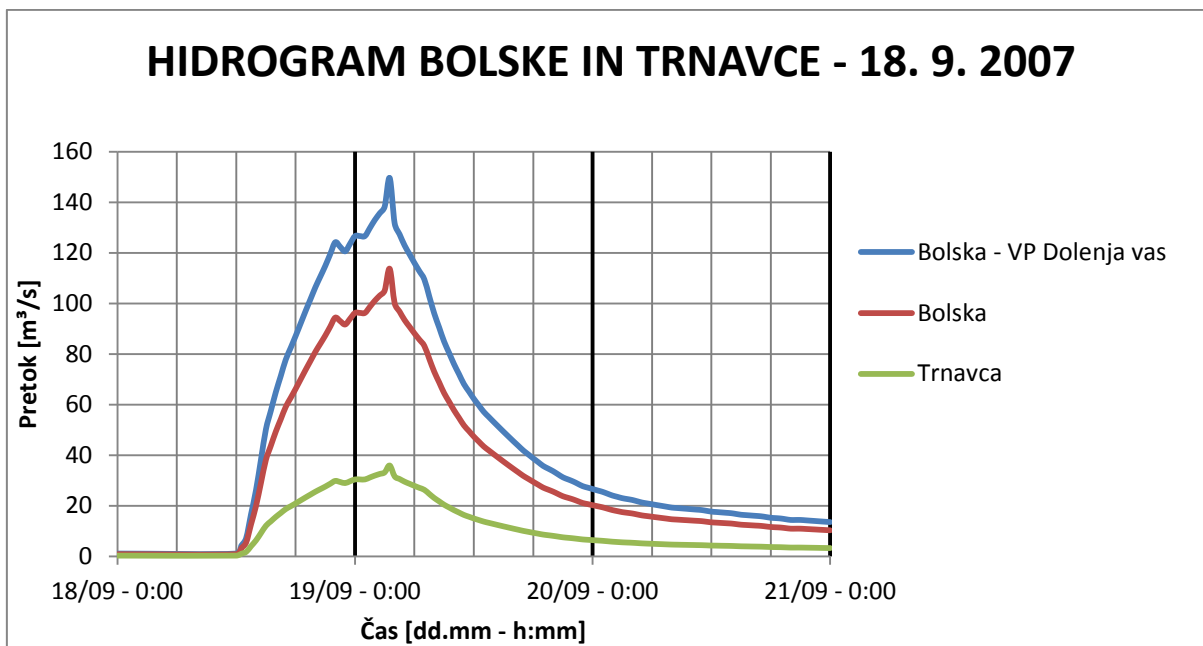


Grafikon 2: Hidrogram Bolske in Trnavce – Q100

Podatki o pretoku za Bolsko od vodotoka Kučnice dolvodno, za Trnavco pa od avtocestnega mostu navzdol.

Za začetni čas računa smo izbrali 18. 9. 2007 0:00, glede na hidrogram pa smo nato določili še končni čas računa, in sicer 19. 9. 2007 00:00. Osnovni hidrogram smo na začetku in koncu še ekstrapolirali in s tem omogočili začetno stabilizacijo modela. Časovni korak računanja smo določili s poskušanjem in po priporočilih, to je 0,2 s.

Podatke za poplavni val iz leta 2007 smo pridobili na Agenciji Republike Slovenije za okolje, in sicer za vodomerno postajo Dolenja vas. Glede na ta poplavni val smo za začetni čas izbrali enako vrednost kot pri poplavnem valu za Q100, za končno pa 21. 9. 2007 0:00. Ponovno smo izbrali isto vrednost za časovni korak, in sicer 0,2 s.



Grafikon 3: Hidrogram Bolske in Trnavce – 18. 9. 2007

Vse robne celice modela smo dvignili na nadmorsko višino 320 m ter tako ogradi model, da smo preprečili odtekanje vode iz modela. Območje je odprto le med celicami 776,1 in 776,5 spodaj desno, kjer je iztok iz bazena.

V model priteka voda preko izvirov, ki se določijo v posameznih celicah mreže. Ker je stoletni pretok Bolske nekaj čez $190 \text{ m}^3/\text{s}$, širina ene celice pa samo 5 m, je potrebno celoten pretok razporediti na več celic. Glede na širino celice 5 m, maksimalno hitrost vode nekje 2 m/s in povprečno višino vode nekje 1 m smo celoten pretok porazdelili na 19 celic za Bolsko ter 6 celic za Trnavco.

Pri Bolski smo celice zaradi večjega števila razdelili prečno na os vodotoka, in sicer v dve vrsti z razmikom dveh celic med izvirova. S tem smo v gornjem delu območja naredili napako, saj se voda že na začetku nahaja izven struge, vendar se nato zaradi oblike samega terena vsa vrne nazaj v strugo vodotoka ter se tako po nekaj sto metrih napaka izniči.

Izvire na Trnavci smo porazdelili v strugo vodotoka na razdalji 5 celic oziroma na oddaljenosti 25 m med izvirova. S postavitvijo izvirov izven struge se voda zaradi geometrije ne bi vrnila v strugo. Postavitev posameznih izvirov je prikazana v pregledni karti modela MIKE.

Sledila je nastavitev hidrodinamičnih parametrov računa. V tem delu računa je možno nastaviti začetne gladine vode, tip in vrednost robnih pogojev, pretoke vode na izviri in ponorih, viskoznost, hrapavost območja, vpliv vetra in objekte na območju.

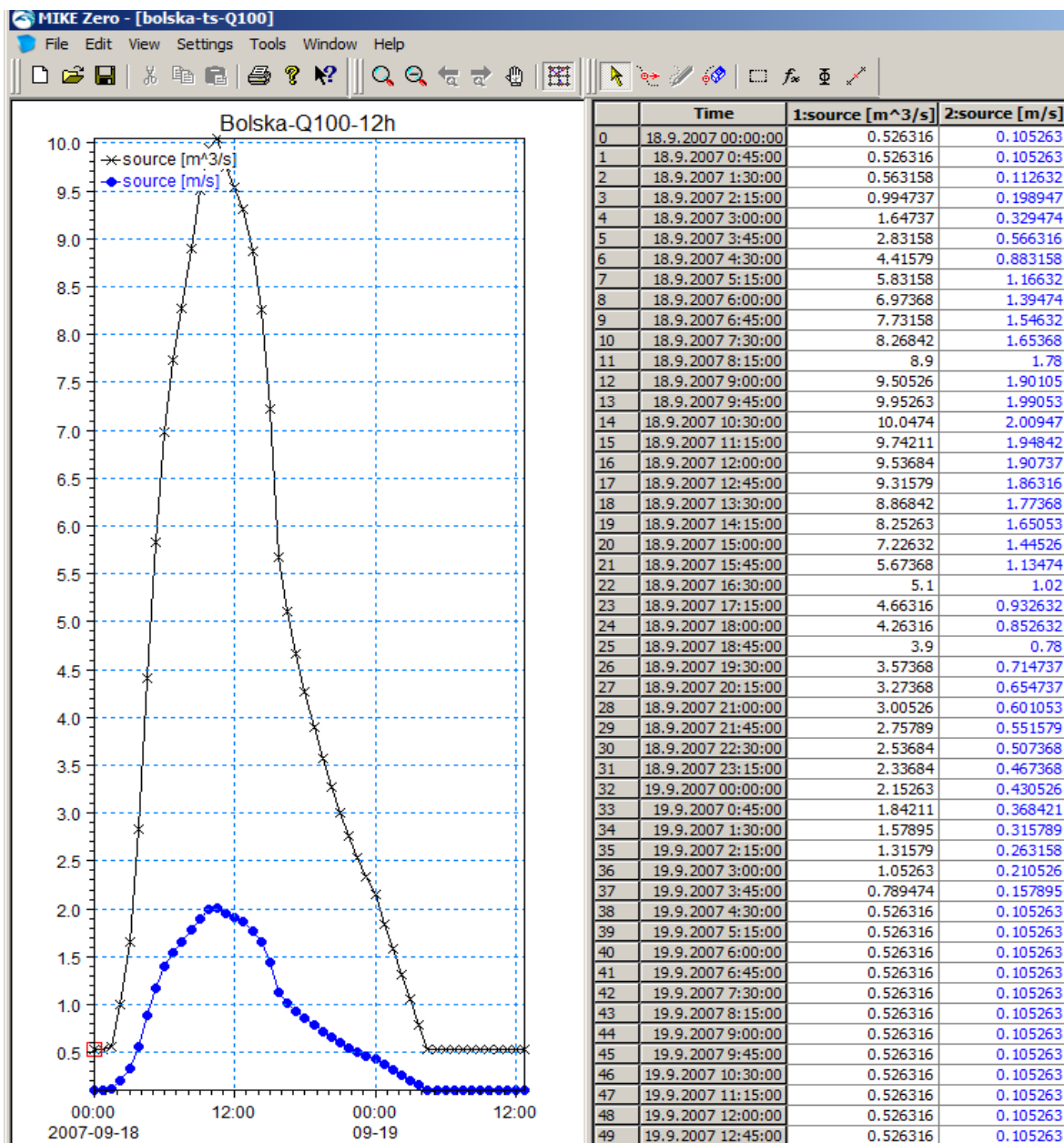
Kot spodnji robni pogoj smo določili gladino vode na iztoku iz bazena. Gladina vode mora biti takšna, da omogoča nemoteno odtekanje vode iz poplavljenega območja, zato smo jo nastavili na višino 275,9 m na območju iztoka iz bazena.

Za izvire ter ponore lahko izberemo konstantno vrednost pretoka, lahko pa pretok določimo na podlagi hidrograma. V ta namen moramo ustvariti posebno časovno datoteko pretokov in hitrosti ter smer iztoka iz izvira za posamezni primer, ki ga želimo simulirati. Na grafikonu 4 je prikazan dejanski uporabljen hidrogram iztoka iz izvirov na Bolski, s pripadajočo hitrostjo za stoletni pretok. Vidimo lahko, da je maksimalni pretok nekaj čez $10 \text{ m}^3/\text{s}$, kar nam v kombinaciji devetnajstih izvirov da skupni stoletni pretok Bolske, ki znaša $190,9 \text{ m}^3/\text{s}$.

Na enak način smo pripravili tudi pretoke ter hitrosti za Trnavco, le da smo tu celoten stoletni pretok razdelili na 6 izvirov.

Za pretok, ki so ga izmerili na vodomerni postaji Dolenja vas, pa smo za začetek celoten pretok razdelili na 25 delov ter ga nato razdelili v razmerju 19 : 6 na izvire Bolske in Trnavce (grafikon 3).

Za začetek smo na podlagi terenskega ogleda izbrali Manningov koeficient hrapavosti $0,035 \text{ sm}^{-1/3}$ tako za obe strugi kot tudi za poplavna področja.



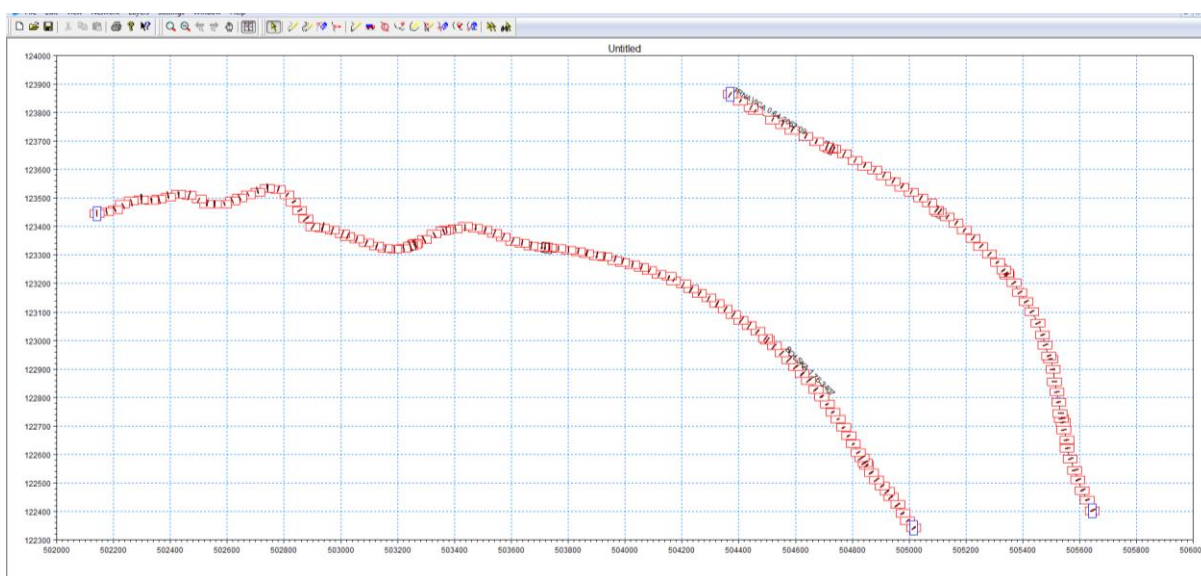
Grafikon 4: Hidrogram iztoka iz izvira na Bolski za Q100

4.3.3 MIKE Flood

Za računanje s programom MIKE Flood potrebujemo delujoča sklopa MIKE 11 in MIKE 21. Ker smo že pripravili izračun za MIKE 21, smo ta sklop le nekoliko popravili ter ga nato uporabili za izračun s programom MIKE Flood. Iz modela je bilo potrebno odstraniti izvire ter prepuste na mestih, kjer so drugače mostovi na Bolski ter Trnavci. Prepusti na mestih mostov so zajeti v modelu MIKE 11. Na mestu, kjer se prekrivata 2D model ter struga, je bilo

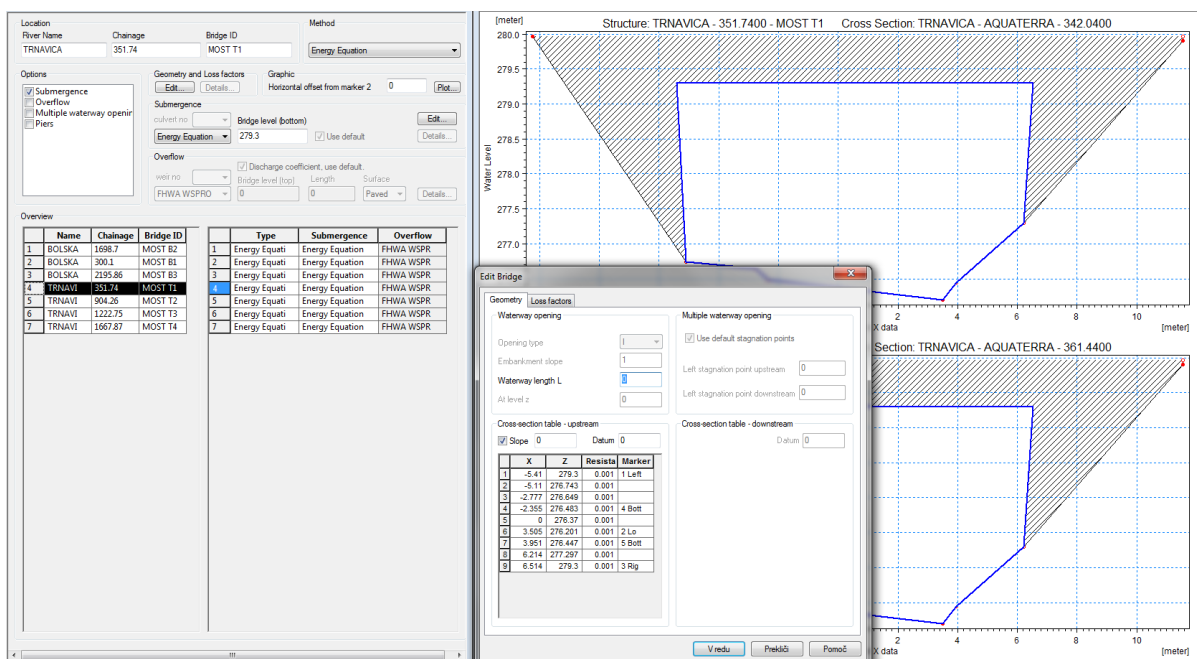
potrebno celice dvigniti, da smo s tem izločili možno nabiranje vode na območju struge v modelu MIKE 11.

Priprava geometrijskega modela za MIKE 11 je bila zahtevnejša. Za izračun smo morali pripraviti štiri datoteke. Najprej je bilo potrebno pripraviti datoteki rečnega sistema in prečnih profilov. Z urejevalnikom prečnih prereзов smo prebrali vnaprej pripravljeno datoteko prečnih prereзов, ki smo jo izvozili s pomočjo programa Aquaterra. Nato smo vse skupaj izvozili ter včitali z urejevalnikom rečnega sistema.



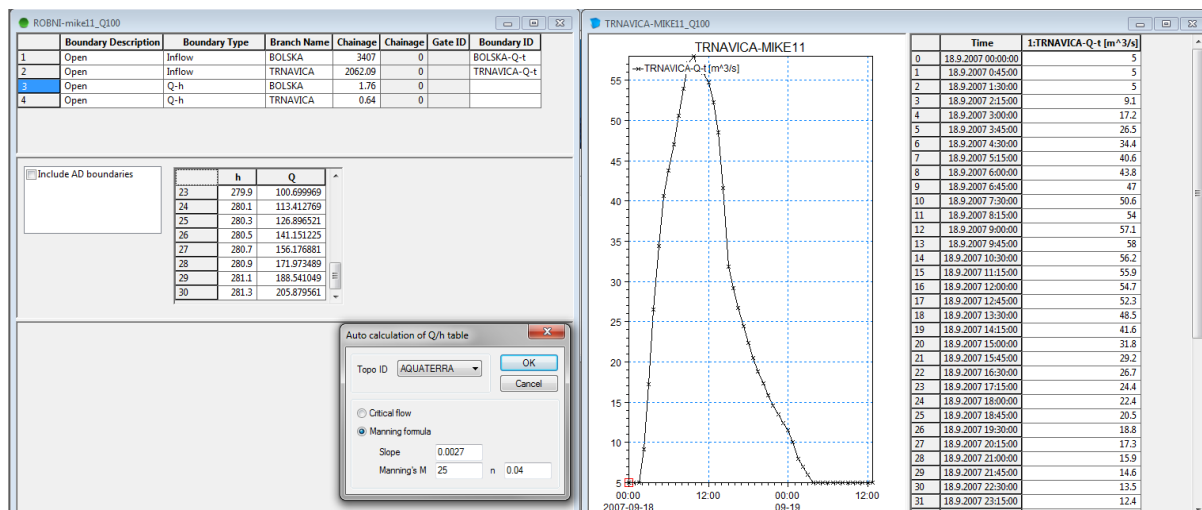
Slika 23: Rečni sistem Bolske in Trnavce v modelu MIKE 11

Ker je bilo na odseku 7 mostov, smo le-te vnesli z urejevalnikom rečnega sistema. Za izračun toka voda pod mostovi smo izbrali kar metodo z energijsko enačbo. Vnesli smo še prerez, dolžino in stacionažo mostu ter spodnji rob mostne plošče. Na sliki 24 lahko vidimo okno za vnos mostu v model MIKE 11. Konkretno gre za most T1 na Trnavci.



Slika 24: Okno za vnos mostu v MIKE 11

Tako sta bili pripravljene prvi dve datoteki za MIKE 11. Zatem je bilo potrebno izdelati še datoteko robnih pogojev. Kot zgornji robni pogoj smo določili pretok v odvisnosti od časa $Q(t)$. Za vsako strugo posebej smo izdelali hidrograme pretokov ter jih nato pozicionirali na gorvodno stran vodotoka. Kot spodnji robni pogoj pa smo podali konzumpcijsko krivuljo oziroma smo določili vrednosti pretokov pri posamezni višini $Q(h)$. Vrednosti posameznih pretokov pri določeni višini je izračunal program sam, podati smo mu morali le Manningov koeficient hrapavosti ter padec vodotoka v spodnjem delu. Na koncu je bilo potrebno pripraviti datoteko, ki zajema še vse druge hidrodinamične vplive. V tej datoteki smo definirali le hrapavost struge z Manningovim koeficientom, saj drugi vplivi niso bili merodajni za naš model. Na podlagi terenskega ogleda smo zaradi zaraščenosti struge določili vrednost $n = 0,05$. Na podlagi dosedanjih izkušenj z uporabo programa smo nato ta koeficient še povečali na $0,06$, saj bi sicer s programom MIKE 11 zaradi dodatne lokalno povečane poraščenosti na brežinah dobili prenizke gladine v sami strugi in posledično tudi na poplavnem področju.

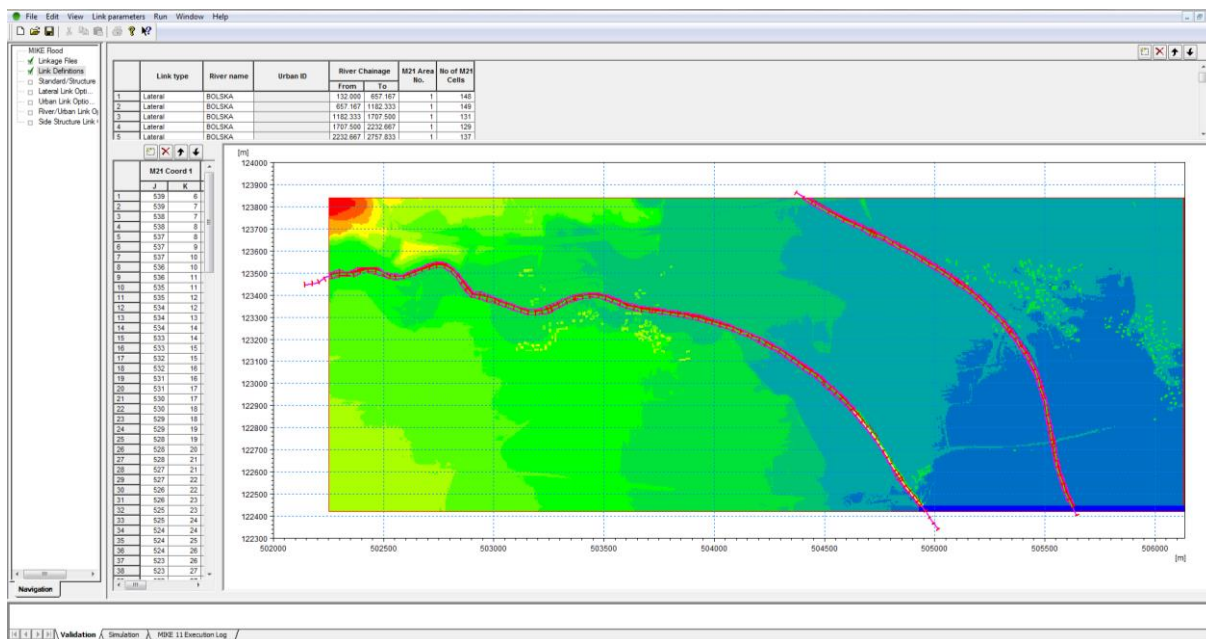


Slika 25: Okno za vnos robnih pogojev v modelu MIKE 11 (Q(t) za Trnavco kot zgornji robni pogoj – desno, ter Q(h) za Bolsko kot spodnji robni pogoj – levo).

Zatem smo v programu MIKE 11 definirali še čas začetka in konca simulacije ter časovni korak. Ker je lahko časovni korak pri 1D modelu nekoliko večji, smo določili časovni korak 1 sekundo. Potrebno je bilo tudi paziti, da je časovni korak pri MIKE 11 večkratnik časovnega koraka pri MIKE 21. Za začetni in končni čas simulacije pa je bilo potrebno izbrati isti čas, kot je bil izbran v modelu MIKE 21.

Ko smo pognali izračun, smo opazili, da pri večjih pretokih na nekaterih mestih na Bolski začne nihati vodna gladina. To se je pojavilo zaradi hipne spremembe prečnih prevezov. Napako smo odpravili tako, da smo popravili geometrijo prečnega prereza na odseku, kjer je do teh nihanj prišlo.

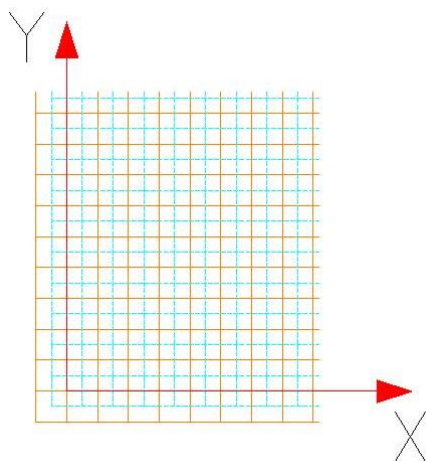
Ko sta bila pripravljena oba računski modela, tako MIKE 11 kot tudi MIKE 21, smo lahko oba združili v MIKE Flood. Najprej je bilo potrebno vnesti dvodimenzijski model, ki ga je predstavljal program MIKE 21, nato pa še model rečne mreže na tem območju, ki pa je bil zajet v MIKE 11. Sledilo je definiranje povezav med obema modeloma. Želeli smo določiti predvsem vpliv razlivanja vode iz struge po področju, zato smo izbrali le vzdolžne povezave med strugo v modelu MIKE 11 ter območjem v modelu MIKE 21. Za natančnejše računanje smo posamezno stran vodotoka razdelili na več odsekov, saj smo se s tem izognili napaki pri izračunu prelivne dolžine v prerezih zaradi meandriranja vodotoka.



Slika 26: Združena in povezana modela MIKE 11 in MIKE 21 v MIKE Flood

4.3.4 PCFLOW2D

Pri programu PCFLOW2D smo morali podatke pripraviti v obliki matrik. Najprej je bilo potrebno definirati x in y koordinate središč celic. Na sliki 27 predstavljajo svetlo modre črte središča celic, oranžna barva pa predstavlja rob celic. Pri definiranju območja moramo biti pazljivi na pravilno usmerjenost koordinatnih osi ter na pozicijo koordinatnega izhodišča. S tem se definira velikost računskega območja ter velikost računskih celic.



Slika 27: Detajl definiranja računske mreže v PCFLOW2D

Za račun je potrebno opredeliti, v katerih celicah naj poteka izračun. To storimo tako, da sestavimo matriko, ki ima vrednosti 1 v celicah, kjer želimo, da program izvrši račun, ter 0 v izločenih celicah, kjer računa ne želimo. Ta matrika je vsebovala same enke, le na mestih, kjer so objekti, smo v matriki predpisali številko 0.

Matriko gladin smo določili tako, da smo s pomočjo programa MIKE Zero izvozili geometrijo v tekstovno datoteko. Tako smo dobili matriko višin, ki pa smo jo morali za račun s programom PCFLOW2D obrniti, saj ima ta program zaradi boljšega izračuna v določeni smeri drugače usmerjene osi modela.

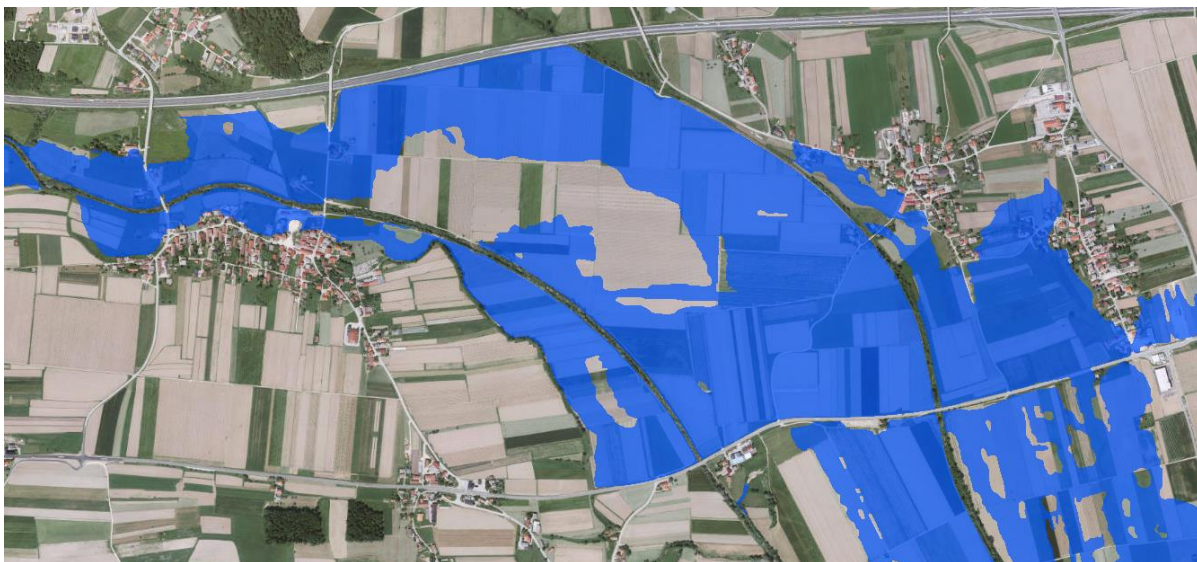
Največ dela je bilo z določitvijo matrike Manningovih koeficientov hrapavosti, saj smo morali s programom AutoCAD najprej določiti vse višinske točke celic, po katerih poteka vodotok. Tem točkam smo nato določili posebno vrednost, tako da so se razlikovale od drugih, ki so bile na poplavnem področju. S pomočjo programa Excel smo nato spremenili vrednosti v smiselne vrednosti Manningovih števil. Za celice v strugi smo vzeli vrednost $n = 0,030$, za poplavno območje pa $n = 0,035$. Vidimo lahko, da so vrednosti v strugi veliko manjše kot pri programu MIKE 11, to pa zato, ker imamo pri programu MIKE 11 veliko gladkejšo geometrijo, kar zelo vpliva na prevodno sposobnost vodotoka.

Nato je bilo potrebno pripraviti še datoteko s tipom robnih pogojev ter njihovimi lokacijami. Za gorvodni robni pogoj smo uporabili kar konstanten stoletni pretok Q_{100} za posamezni vodotok. Za dolvodni robni pogoj pa smo v posameznem vodotoku kot tudi na poplavnih območjih kot robni pogoj uporabili kritični tok. Tako smo dosegli, da je voda, ki se je razlila na poplavno območje in dosegla rob modela, prosto odtekala iz njega ter tako ni vplivala na gladino gorvodno. Lokacije vtokov in iztokov so razvidne iz pregledne situacije modela PCFLOW2D v prilogi B. Račun znotraj posameznega časovnega koraka ($\Delta t = 2$ s) je tekel tako dolgo, dokler ni bila relativna napaka kontinuitete po področju manjša od 1 % oziroma zaradi skrajšanja izračuna doseženo maksimalno število iteracij 60. Maksimalni čas računa je bil 5 ur, ko smo dosegli stacionarno stanje na obravnavanem področju.

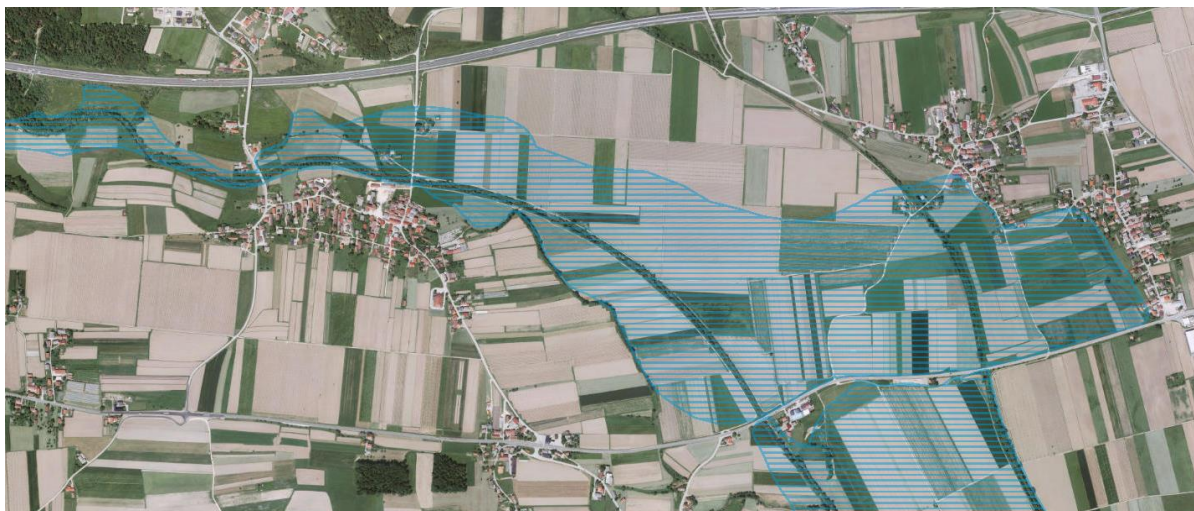
4.4 Primerjava rezultatov

Rezultate, dobljene s pomočjo opisanih programov in modelov, ki smo jih izdelali, smo primerjali s kartami, ki so objavljeni na Atlasu okolja. To je uradna spletna stran Agencije Republike Slovenije za okolje. Pri pretokih, računanih s stoletnim pretokom Q_{100} , smo svoje rezultate primerjali s karto, ki prikazuje območje dosega stoletnih poplav (slika 28). Za pretoke, ki so bili zabeleženi septembra 2007, pa smo uporabili karto, ki prikazuje poplavni dogodek 18. 9. 2007 in je prav tako objavljena na Atlasu okolja. Za poplavni dogodek iz leta 2007 smo uspeli dobiti tudi podatek o globini vode pri hišni številki Trnava 26 a, ki je znašala nekje od 60 do 70 cm.

Ker s programom PCFLOW2D nismo mogli zmodelirati podrobnega vpliva mostov ter prepustov v cestnem nasipu, smo s programom MIKE naredili izračune še brez mostov ter prepustov in jih nato primerjali med seboj. Na mestu, kjer smo odstranili prepuste, smo celice poglobili, da smo ustvarili prehod skozi nasip.



Slika 28: Območje dosega stoletnih (Q_{100}) poplav (Atlas okolja, 2. 6. 2014)



Slika 29: Karta poplavnega dogodka dne 18. in 19. 9. 2007 (Atlas okolja, 2. 6. 2014)

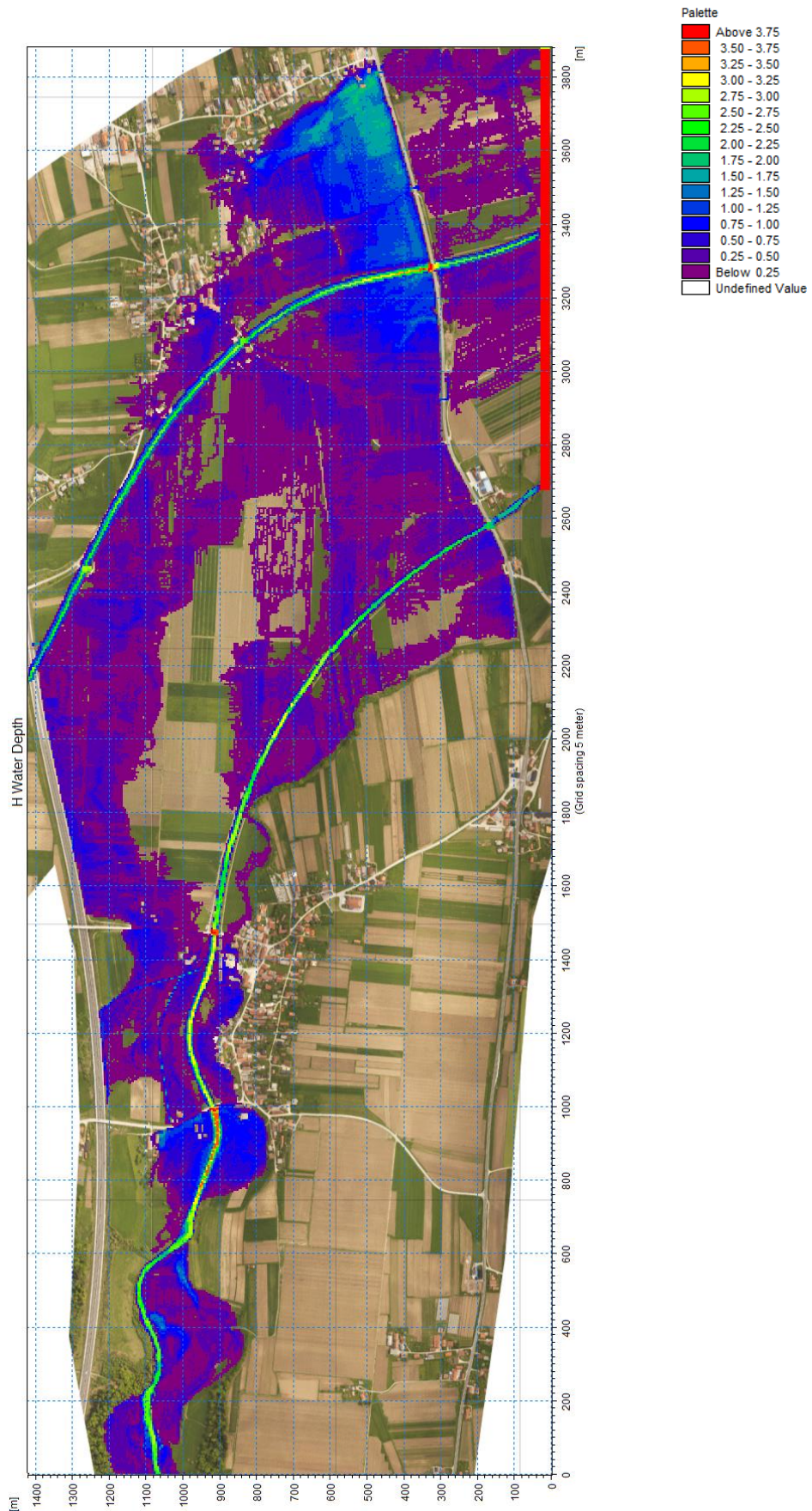
4.4.1 Primerjava rezultatov za poplavni val 18. in 19. 9. 2007

S primerjavo rezultatov, dobljenih z različnimi modeli pri pretoku, ki so ga zabeležili 18. 9. 2007 na vodomerni postaji Dolenja vas, smo ugotovili, da so razlike v poplavnih področjih velike. Po pričevanjih prebivalcev na tem območju smo s programom MIKE 21 dobili nekje podoben obseg poplav, kot je bil dejansko na terenu. Globina pri hišni številki Trnava 26 a je znašala nekje 20 cm manj, kot pa je bila po pričevanjih dosežena na terenu. S programom MIKE Flood pa je bil obseg poplavnega območja veliko manjši. Opazimo lahko, da v obeh primerih voda odteka skozi vse tri prepuste v cestnem nasipu. Cesta pa v nobenem izračunu ni poplavljenjena.

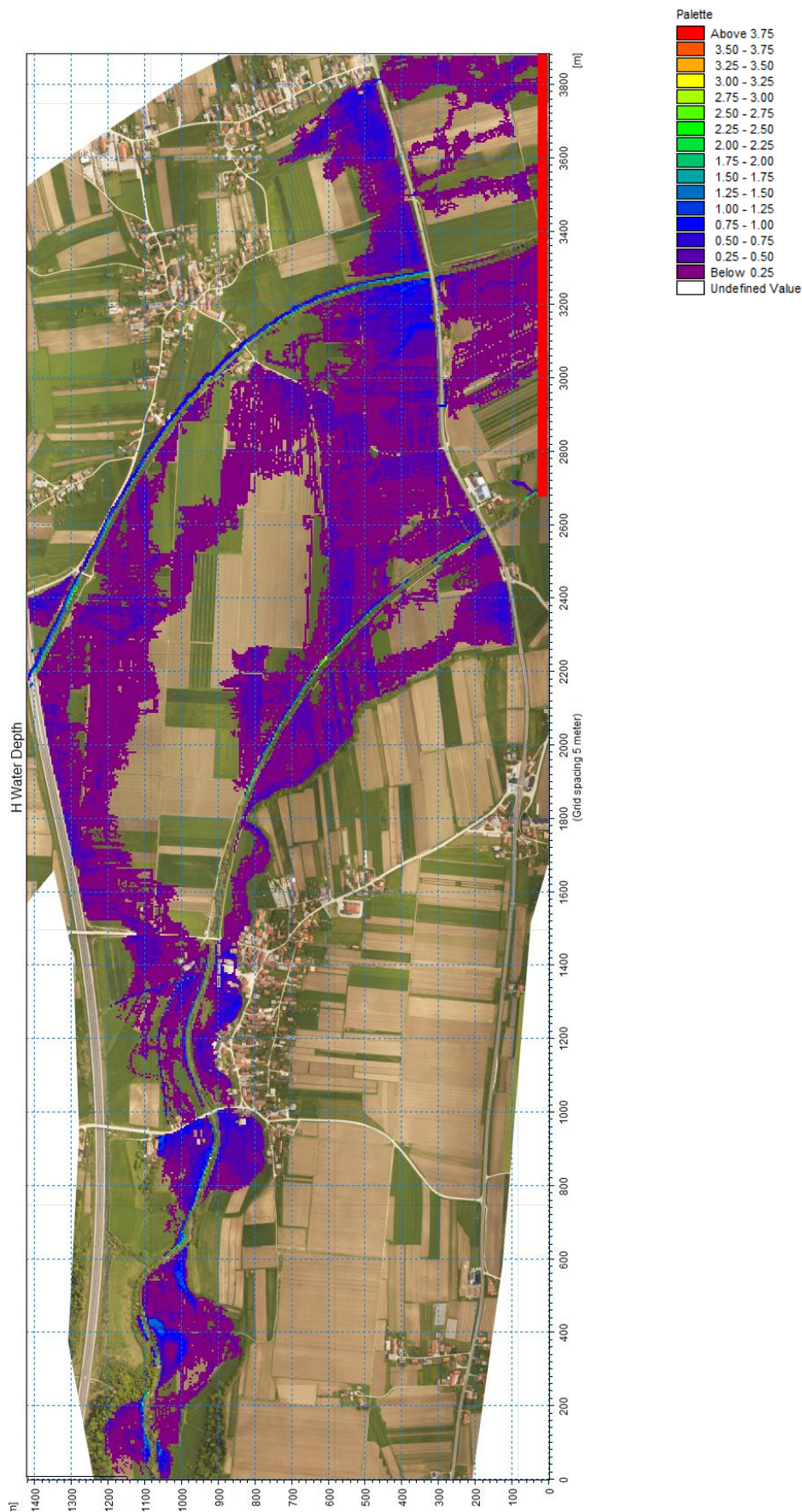
Nobeden od rezultatov se ne ujema dobro s karto poplavnega dogodka. Verjetno pa tudi karta poplavnega območja ni povsem točna, saj ni rezultat meritev, ampak ustreznega matematičnega modela. V vseh primerih namreč Bolska poplavi severni del ob avtocesti, nato pa se prelije v Trnavco. Prebivalci iz naselij Trnava in Gomilsko so povedali, da je izračunano poplavno območje z MIKE 21 kar točno.

Vendar vseeno tega izračuna ne moremo smatrati kot točnega, saj razpoložljivi vhodni podatki niso bili dovolj točni. Na vodomerni postaji Dolenja vas namreč niso izmerili količine vode, ki se je zadržala na poplavnem območju za cestnim nasipom, ampak tisto, ki je odtekla iz območja skozi mostova ter prepuste v nasipu. S tem, ko smo poplavni val, izmerjen na

vodomerni postaji Dolenja vas, razdelili na poplavna valova za Bolsko in Trnavco, smo naredili določeno napako, zato ti rezultati niso povsem merodajni za primerjavo. Tako za poplavni dogodek iz leta 2007 nismo izvajali izračuna s programom PCFLOW2D s takrat zabeleženim pretokom.

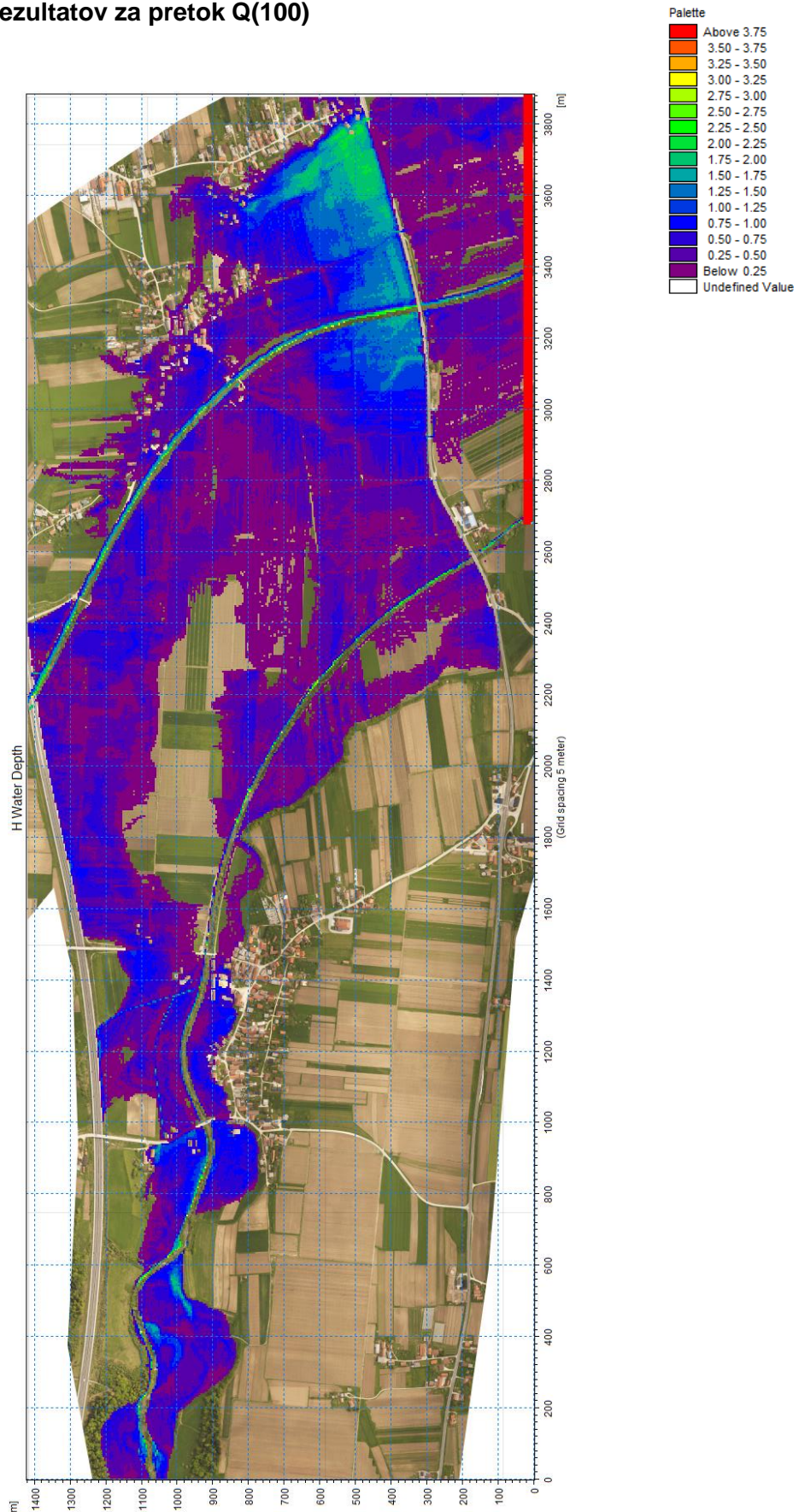


Slika 30: Rezultati izračuna globlin z MIKE 21 pri hidrogramu poplavnega dogodka dne 18. 9. 2007



Slika 31: Rezultati izračuna globlin z MIKE Flood pri hidrogramu poplavnega dogodka dne 18. 9. 2007

4.4.2 Primerjava rezultatov za pretok Q(100)

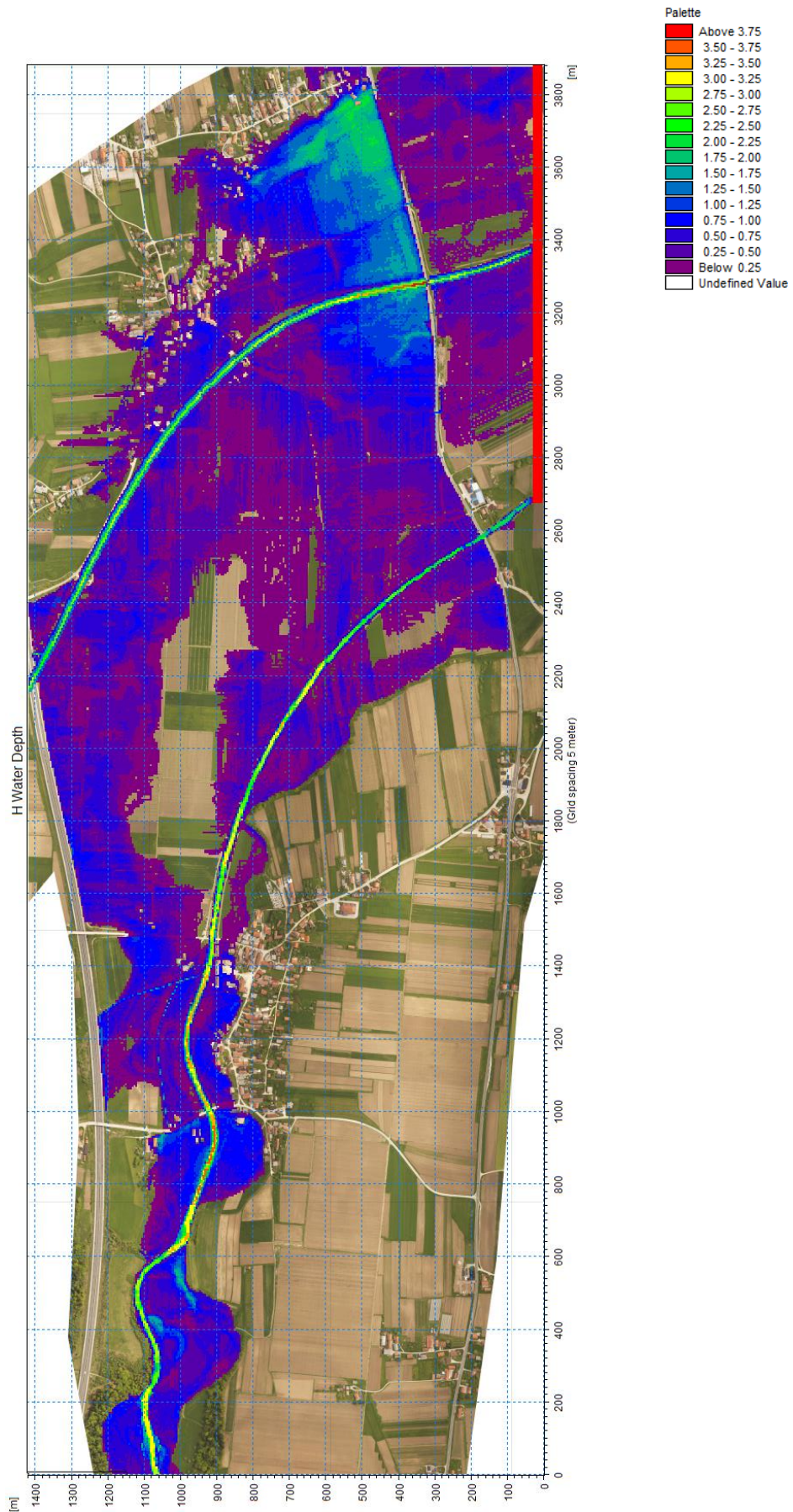


Slika 32: Rezultati izračuna globlin z MIKE Flood pri hidrogramu s konico Q(100)

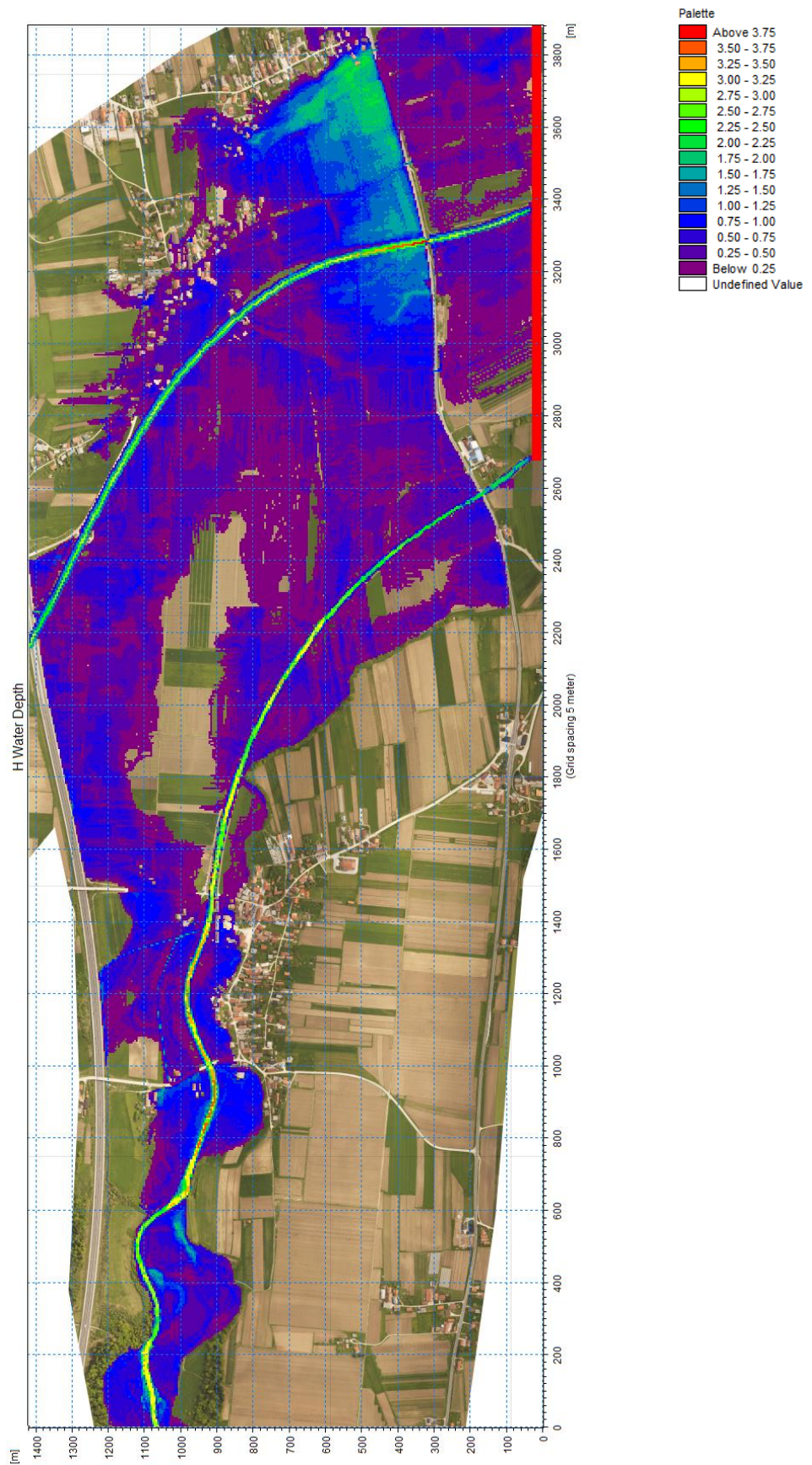
Izračuni s programoma MIKE 21 in MIKE Flood so trajali več kot dva dni. Razlog dolgotrajnosti računa je bil časovno dolg vhodni hidrogram, ki je trajal 24 ur. Ker gre pri poplavnih valovih za razmeroma počasno naraščanje pretoka, smo z namenom, da bi skrajšali izračun, poizkusili namesto vhodnega hidrograma za začetni robni pogoj vnesti kar konstantni stoletni pretok. Iz slik 33 in 34 lahko opazimo, da s tem nismo naredili večje napake. Sam čas simulacije smo prilagodili tako, da smo opazovali, kdaj se pretoki skozi model ustalijo ter gladine dosežejo maksimalne vrednosti. Tako smo čas računanja posameznega primera močno skrajšali. Izračun z modelom v programu MIKE 21 doseže maksimalne globine nekje po treh urah in pol, model MIKE Flood pa šele po sedmih urah in pol. Čas simulacije s programom MIKE 21 smo skrajšali iz 24 ur na 4 ure, pri MIKE Flood pa na 8 ur, s tem pa nismo bistveno vplivali na rezultate samega izračuna.

Za program PCFLOW2D je bilo skrajšanje potrebnega časa simulacije na 5 ur še posebej koristno, saj so računski časi zaradi uporabljene polne implicitne sheme (v primerjavi z metodo ADI pri MIKE 21) še bistveno daljši.

Tako smo za vse nadaljnje primere namesto celotnih vhodnih hidrogramov uporabili kar maksimalni pretok za stoletne vode in določili maksimalni čas simulacije pri posameznih programih tako, da je bilo na obravnavanem področju doseženo stacionarno stanje.



Slika 33: Rezultati izračuna globlin z MIKE 21 pri hidrogramu z maksimalnim pretokom $Q(100)$

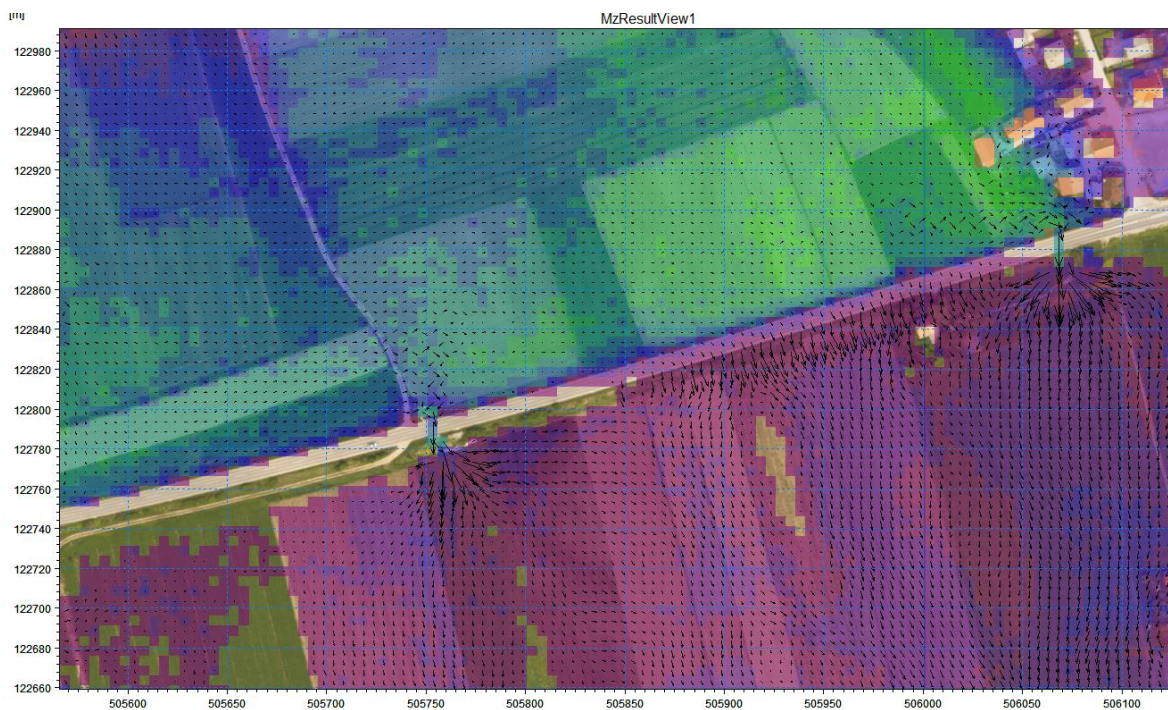


Slika 34: Rezultati izračuna globin z MIKE 21 pri konstantnem pretoku $Q(100)$

4.4.3 Primerjava rezultatov med različnimi modeli pri konstantnem pretoku Q(100)

Da bi bili računski modeli za vse tri načine računanja čim bolj podobni, smo iz modela za MIKE 21 ter MIKE Flood izločili mostove na obeh strugah ter prepuste v nasipu regionalne ceste. S primerjavo globin in hitrostnega polja rezultatov je bilo mogoče opazovati razlike med izračuni posameznih računalniških programov.

Tudi v tem primeru lahko iz rezultatov globin opazimo razlike med velikostjo poplavnega področja. Pri izračunu s programoma MIKE 21 ter PCFLOW2D voda odteka celo preko cestnega nasipa. Na spodnjih slikah lahko vidimo detajl toka preko cestnega nasipa, kar je bilo izračunano s programoma MIKE 21 ter PCFLOW2D. Opazimo lahko, da v izračunu s programom MIKE 21 dobimo višjo gladino vode, saj je cesta v celoti poplavljena. Pri programu PCFLOW2D pa lahko opazimo vmes še nekaj suhih celic. Na slikah se tudi lepo vidi izločitev hiš iz poplavnega področja ter tok vode skozi prepusta. Pri natoku na prepust lahko opazimo, da so pri programu MIKE 21 puščice usmerjene v različne smeri, medtem ko so pri programu PCFLOW2D vse usmerjene proti prepustu.

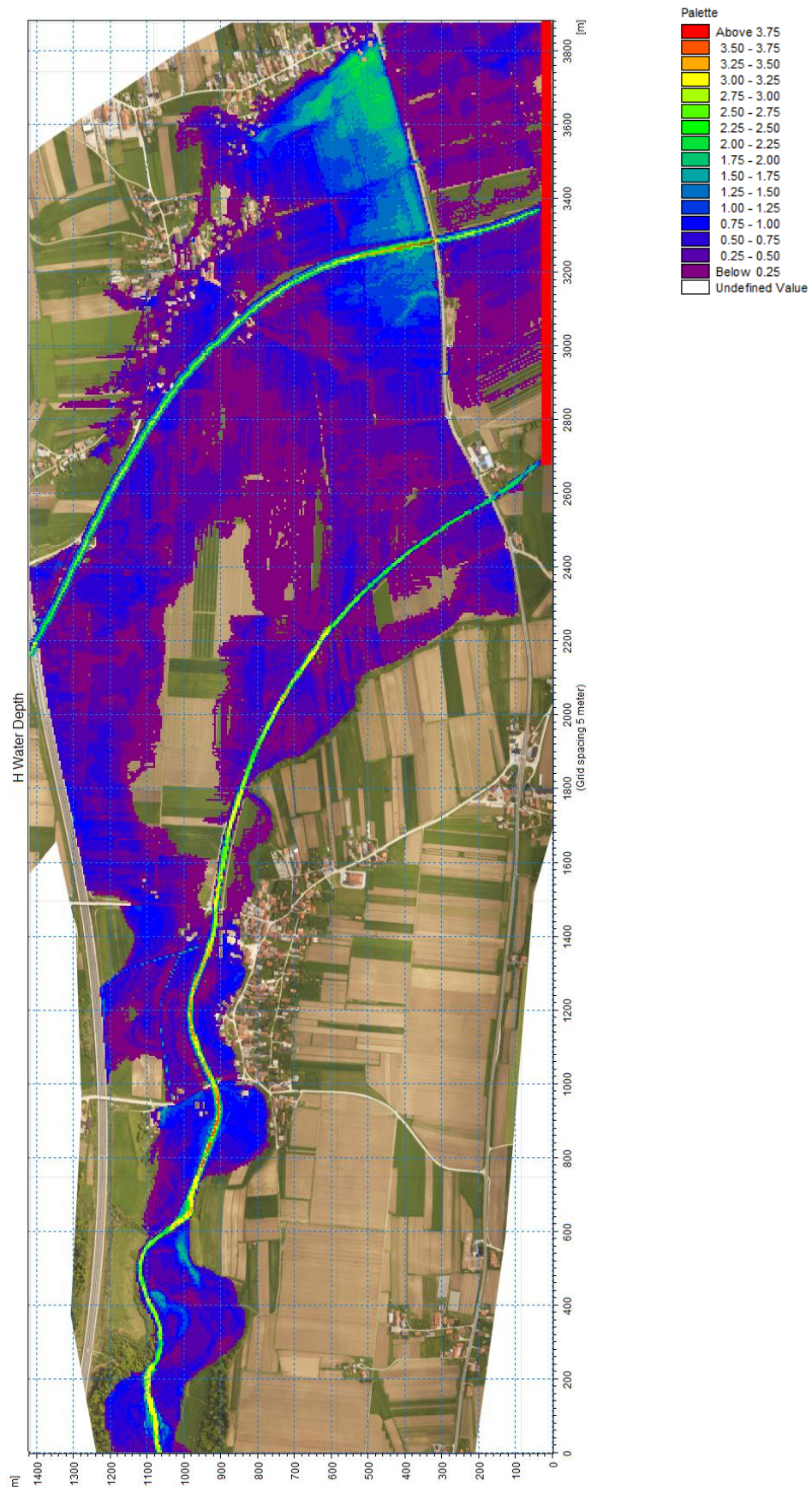


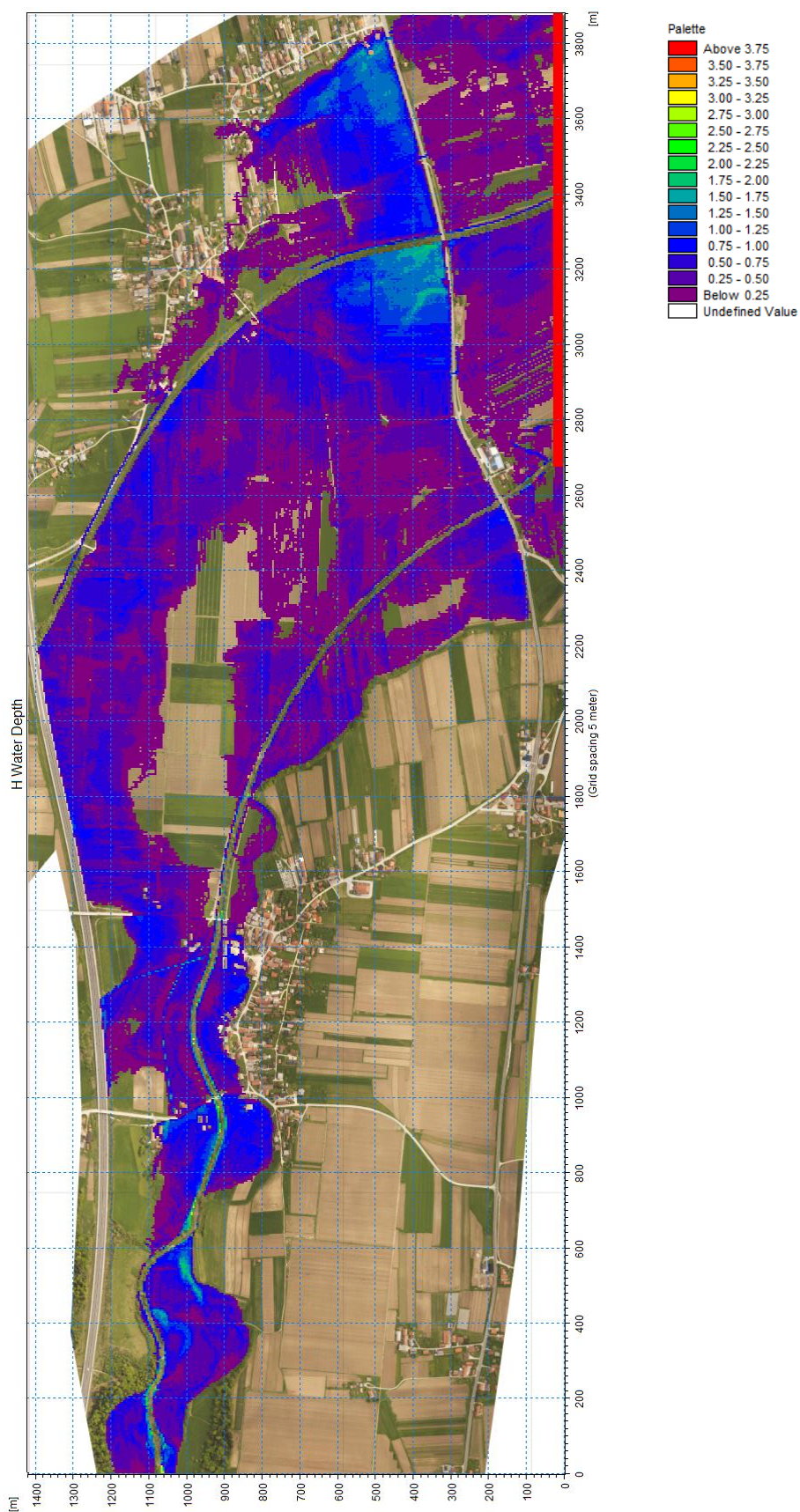
Slika 35: Hitrostno polje in globine vode izračunane s programom MIKE 21



Slika 36: Hitrostno polje izračunano s programom PCFLOW2D

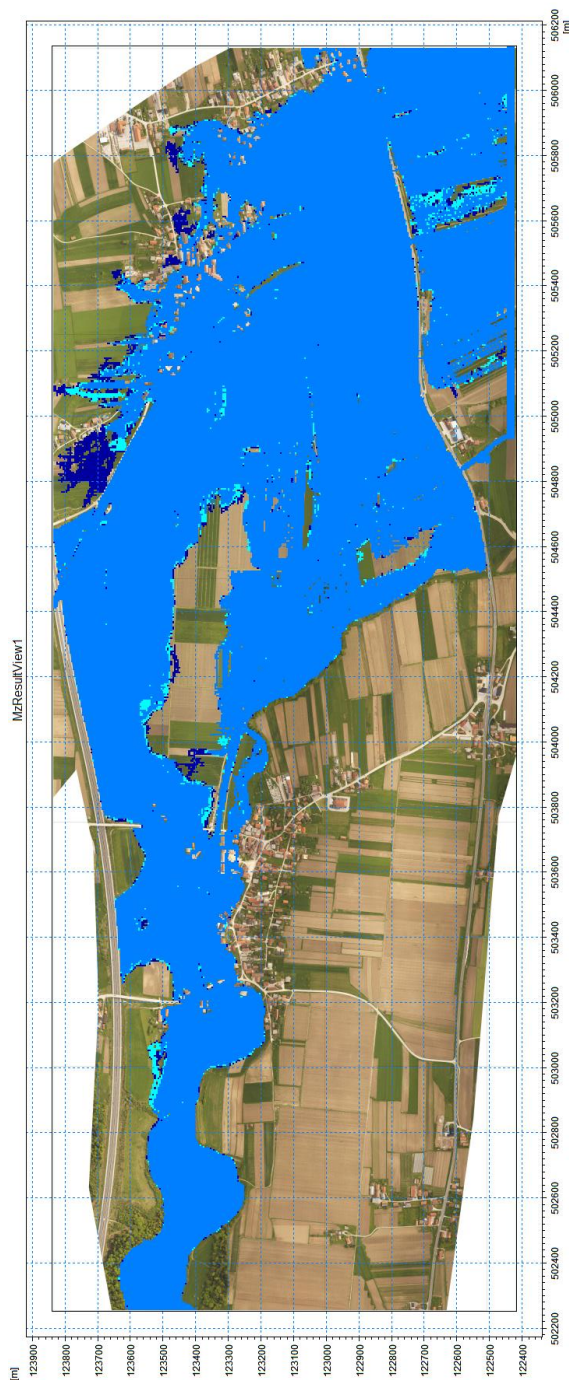
Rezultati hitrostnih polj posameznih izračunov za celotno področje so zaradi boljše preglednosti podani v večjem merilu v prilogah E, F in G na koncu naloge.

Slika 37: Rezultati izračuna globin z MIKE 21 pri konstantnem pretoku $Q(100)$



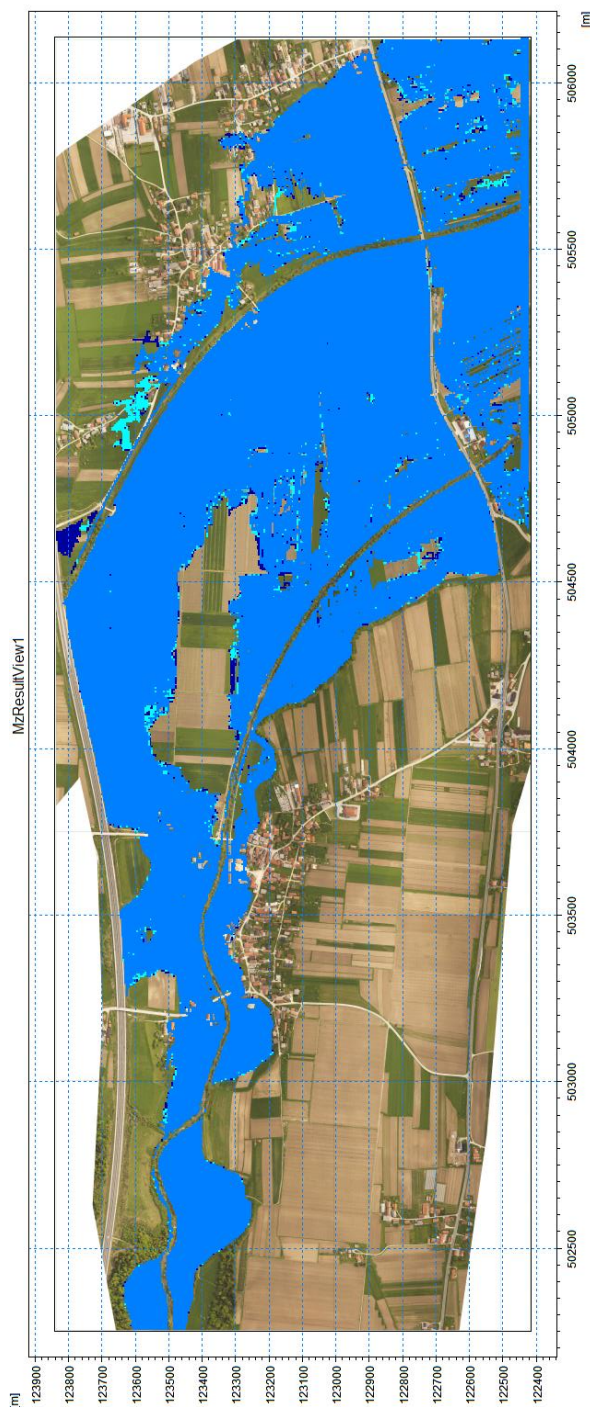
Slika 38: Rezultati izračuna globin z MIKE Flood pri konstantnem pretoku $Q(100)$

Ker z razpoložljivimi pretoki ter pridobljenimi podatki o merjenih gladinah za posamezne pretoke nismo mogli izvesti kakovostnega umerjanja modela, smo izvedli občutljivostno analizo modela. To smo naredili tako, da smo modelu povečevali Manningov koeficient trenja. Iz prvotnega 0,035 smo ga povečali na 0,045 ter nato še na 0,055. Iz te analize lahko vidimo, kako koeficient trenja vpliva na obseg poplavnega področja. Na slikah 39, 40 in 41 je prikazan obseg poplav za posamezni program z različnimi koeficienti trenja.

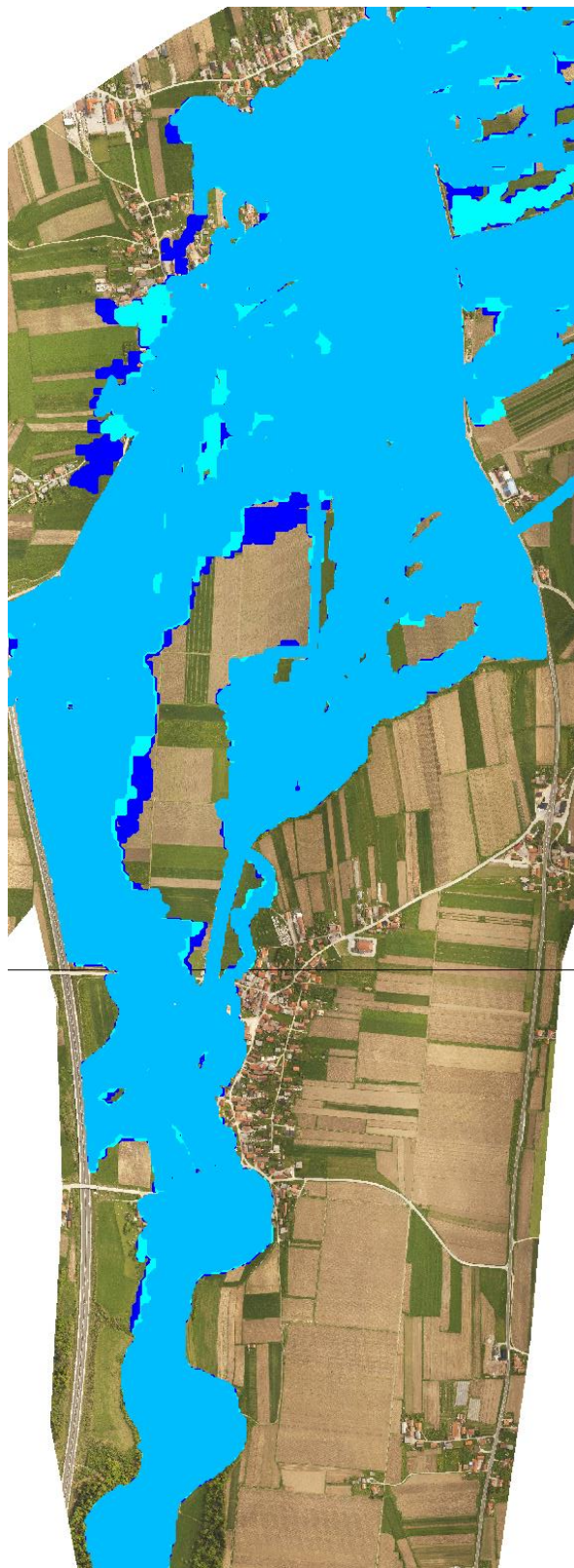


Slika 39: Rezultat občutljivostne analize s programom MIKE 21

Opazimo lahko, da se z večanjem Manningovega koeficienta veča tudi obseg poplavljenega območja. To smo tudi predvidevali, saj z večanjem koeficienta hrapavosti otežujemo vodi odtekanje iz poplavnega področja. Temno modra barva predstavlja rezultate z modelom, kjer smo uporabili Manningov koeficient 0,055, svetlo modra predstavlja izračun s koeficientom 0,045, modra pa 0,035.



Slika 40: Rezultat občutljivostne analize s programom MIKE Flood



Slika 41: Rezultat občutljivostne analize s programom PCFLOW2D

5 ZAKLJUČEK

Izdelava točnega računskega modela za računanje toka vode je zelo zahteven in dolgotrajen proces. Na tok vode vplivajo najrazličnejši dejavniki, na nas pa je, da v modelu upoštevamo tiste, ki najbolj vplivajo na točnost izračuna. Lahko bi namreč upoštevali vsak najmanjši vpliv, od vetra do Coriolisovih sil, vendar nam vsako upoštevanje dodatnega vpliva podaljšuje čas računanja. Za točno umeritev modela moramo dobro pregledati, kakšno je dejansko stanje v naravi, uporabiti prave koeficiente hrapavosti struge in poplavnih področij, koeficiente vtoka na prepustih, mostnih upornikih in drugod. Imeti moramo tudi točne hidrološke podatke za pretoke, na katere umerjamo sam model, ter tudi izmerjene vrednosti gladin na terenu, s katerimi lahko nato primerjamo izračune našega modela.

Pri uporabljenih modelih na obravnavanem območju žal nismo mogli narediti podrobnega umerjanja modelov, saj razpoložljivi podatki o pretokih ob poplavnem dogodku septembra 2007 niso bili dovolj natančni, čeprav je bilo na voljo nekaj podatkov in opazovanj iz terena o doseženih gladinah in obsegu poplavljenega področja. Za stoletni pretok pa smo imeli računsko dobljene vhodne podatke o hidrogramih, ki v naravi še niso nastopili, in jih uporabljamo za namene projektiranja hidrotehničnih ureditev. Opazimo pa lahko, da med različnimi modeli obstajajo pomembne razlike tako med uporabo kot tudi med samimi rezultati.

Dobljeni rezultati kažejo, da so vrednosti, pridobljene s kombinacijo enodimenzionalnega in dvodimenzionalnega modela nekoliko drugačne od končnih vrednosti, dobljenih samo z dvodimenzionalnim modelom računa. S pomočjo enodimenzionalnega modela lahko namreč veliko lepše opišemo strugo na nekem območju, kot če jo moramo opisati s kvadratnimi celicami. S tem, ko neko strugo opišemo s kvadratnimi celicami, dobimo nekakšne »ovire« ob robovih struge, še posebej, če struga poteka poševno glede na mrežo celic. Temu se lahko izognemo tako, da manjšamo velikost celic, kar pa je bilo v našem obravnavanem primeru nemogoče zaradi velikosti območja. Teh »ovir« v enodimenzionalnem modelu ni in je potrebno morebitno dodatno hrapavost ob robovih struge zajeti z višjim koeficientom hrapavosti, da ne dobimo prevelikih odtokov iz modela. To se je pokazalo tudi v našem primeru, ko smo uporabili znatno večji Manningov koeficient trenja v samem enodimenzionalnem modelu za račun s programom MIKE Flood.

Za samo izdelavo računskega modela je enostavnejši program MIKE, s podmodeloma 21 in Flood, saj je uporabniku veliko bolj prijazen. Ima vgrajenih tudi veliko podprogramov, s katerimi si poenostavimo delo pri uvozu podatkov v model ali pa izvozu rezultatov v druge datoteke. Tudi pri samem računanju nas sproti opozarja, če je kje v računu napaka oziroma če bi lahko bili rezultati kje napačni zaradi računskega postopka. Zato je ta program zelo uporaben v praksi, ko moramo za naročnika hitro izdelati izračun ter rezultate prikazati na enostaven in pregleden način.

Program PCFLOW2D pa je na drugi strani nekoliko manj prijazen do uporabnika. Vhodne podatke mu moramo podati kot matrike, ki pa so brez ustreznih pregledovalnikov nepregledne. Ima pa tudi dobre lastnosti. Lahko ga namreč priredimo glede na potrebe izračuna, mu dodamo nove robne pogoje ter mu spremenimo vrednosti ali enačbe, ki so vgrajene v samem programu. Tako je zelo uporaben tudi v študijske namene in pri preizkušanju novih metod, ki lahko izboljšajo točnost izračunov.

Kateri program bomo uporabili, je odvisno od narave problema. Lahko se tudi zgodi, da nam za določene lokalne probleme, kjer so tridimenzijski učinki še posebej poudarjeni, da globinsko povprečni računski model premalo točne rezultate. V tem primeru moramo uporabiti polne tridimenzijske matematične modele ali sicer praviloma dražje fizične modele.

VIRI

Agencija Republike Slovenije za okolje. 2008. Visoke vode in poplave 18. septembra 2007. (26. 2. 2008).

<http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Visoke%20vode%20in%20poplave%2018.%20septembra%202007.pdf> (Pridobljeno 25. 4. 2014.)

Agencija Republike Slovenije za okolje. 2007. Poročilo o vremenski in hidrološki situaciji 18. septembra 2007. (18. 9. 2007).

http://www.arso.gov.si/vode/publikacije%20in%20poro%C4%8Dila/visoke_vode-20070918.pdf (Pridobljeno 6. 5. 2014.)

Agencija Republike Slovenije za okolje. 2013. Atlas okolja – GIS pregledovalnik.

http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso (Pridobljeno 24. 4. 2014 in 2. 6. 2014.)

Chappell, E. 2011. AutoCAD civil 3D essentials; Autodesk official training guide. San Francisko, Wiley Technology Pub: loč. pag.

Četina, M. 1998. Dvodimenzijski program PCFLOW2D za račun toka s prosto gladino. Študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: loč. pag.

Danish Hydraulic Institute-DHI. 2007. MIKE Flood, Modelling of River Flooding: A step-by-step training guide. Denmark: loč. pag.

Danish Hydraulic Institute-DHI. 2007. MIKE 21 Flow Model, Hydrodynamic Module: A step-by-step training guide. Denmark: loč. pag.

Duhovnik, R. 2007. Ureditev suhega zadrževalnika ob reki Savinji pri Malih Braslovčah. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (samozaložba R. Duhovnik): 18–27.

Geodetski inštitut Slovenije. 2013. http://www.geopedia.si/#T105_x504574_y123090_s15_b4 (Pridobljeno 4. 4. 2014.)

Hladnik, A. 2007. Matematično modeliranje toka v ribjem prehodu rečne hidroelektrarne. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Hladnik): 30–40 f.

Jokanović, S. 2010. Predlog ureditve reke Bolske v Brodeh na Vranskem. Diplomaska naloga. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo (samozaložba S. Jokanović): 18–31 f.

Leban, L. 2009. Osnove programa AutoCad Civil 3D. Uporabniški priročnik za tečaj. Ljubljana, CGS Plus d. o. o.: loč. pag.

Mlačnik, J. 2003. Vloga hidravličnih modelov v vodarski inženirski praksi. V: 14. Mišičev vodarski dan – zbornik. Maribor: 172–179.

<http://www.Mvd20.com/LETO2003/R26.pdf> (Pridobljeno 2. 4. 2014.)

Natek, M. 1995. The 1994 summer storm in the Bolska river watershed (Central part of eastern Slovenia): Poletno neurje v porečju Bolske leta 1994 (Osrednji del vzhodne Slovenije). Ljubljana, Geografski inštitut ZRC SAZU, Geografski zbornik, XXXV (1995): loč. pag.

Patankar, S. 1980. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. McGraw Hill Book Company.

Rajar, R. 1997. Hidromehanika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: loč. pag.

Vidmar, V., Petkovšek, G. 2010. Tutorial AQUATERRA 2010. Uporabniški priročnik za tečaj. Ljubljana, CGS Plus d. o. o.: loč. pag.

Zidarič, M. 2009. 2D modeliranje zadrževalnikov v Spodnji Savinjski dolini. V: 20. Mišičev vodarski dan – zbornik. Maribor: 182–189.

<http://mvd20.com/LETO2009/R27.pdf> (Pridobljeno 6. 4. 2014.)

PRILOGE

A	Pregledna situacija računskega območja	M 1:5000
B	Pregledna situacija – PCFLOW2D	M 1:7500
C	Pregledna situacija – MIKE 21	M 1:7500
D	Pregledna situacija – MIKE Flood	M 1:7500
E	Rezultati – PCFLOW2D	M 1:7500
F	Rezultati – MIKE 21	M 1:7500
G	Rezultati – MIKE Flood	M 1:7500