



**PODIPLOMSKI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA**

**MAGISTRSKI ŠTUDIJ
HIDROTEHNIČNA SMER**

Kandidat:

JOŠT SODNIK

**Matematično modeliranje drobirskih tokov in priprava
podrobnih kart nevarnosti**

Magistrsko delo štev.: 215

**Mathematical modeling of debris flows and preparing of
hazard maps**

Master of Science Thesis No.: 215

Mentor:

prof. dr. Matjaž Mikoš

Predsednik komisije:

prof. dr. Matjaž Četina

Somentor:

prof. dr. Matjaž Četina

Člana:

prof. dr. Bojan Majes

izr. prof. dr. Mihael Ribičič

Ljubljana, 13. julij 2009

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani JOŠT SODNIK, univ.dipl.inž.grad., izjavljam, da sem avtor magistrskega dela z naslovom: »MATEMATIČNO MODELIRANJE DROBIRSKIH TOKOV IN PRIPRAVA PODROBNIH KART NEVARNOSTI«

Ljubljana, julij 2009

Jošt Sodnik, univ.dipl.inž.grad.

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 502.5:519.61/.64:528.9:551.3:556.5:627.141(043.3)
- Avtor:** Jošt Sodnik
- Mentor:** prof. dr. Matjaž Mikoš
- Somentor:** prof. dr. Matjaž Četina
- Naslov:** Matematično modeliranje drobirskih tokov in priprava podrobnih kart nevarnosti
- Obseg in oprema:** 214 str., 35 pregl., 120 sl., 13 en.
- Ključne besede:** digitalni model višin, drobirski tokovi, hudourniški vršaji, karte nevarnosti, matematično modeliranje, model Flo-2D, občutljivostna analiza, Sava Dolinka, Koroška Bela

Izvleček:

V nalogi je najprej pripravljen pregled in opisane različne klasifikacije masnih gibanj, med katere se uvrščajo tudi drobirski tokovi. Drobirski tokovi so predstavljeni podrobneje. Opisane so njihove lastnosti in prikazana klasifikacija glede na nastanek, velikost in hitrost. Opisane so tudi glavne razlike med drobirskimi tokovi in drugimi masnimi gibanji.

Nadalje je predstavljen model Flo-2D in opisana njegova uporaba, način delovanja in postopek izdelave modela drobirskega toka. Opisane so dosedanje izkušnje z modeliranjem drobirskih tokov v Sloveniji in uporaba različnih matematičnih modelov, vključno s Flo-2D.

Opisana je slovenska zakonodaja na področju varstva pred poplavami in erozijo, kjer je predpisana metodologija za izdelavo opozorilnih kart, kart nevarnosti in kart ogroženosti zaradi delovanja poplav in erozije. Predlagan je način izdelave opozorilnih kart in podrobnejših kart nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov, pri čemer so drobirski tokovi razdeljeni na hudourniške in pobočne.

Glavni del naloge je uporaba matematičnega modela Flo-2D pri modeliranju drobirskih tokov na hudourniških vršajih z uporabo javno dostopnih podatkov. Raziskava je opravljena na hudourniških vršajih pritokov Save Dolinke. V občutljivostni analizi modela je analiziran vpliv nastavitve kontrolnih parametrov modela, pozicije vhodnega hidrograma, Manningovega koeficienta hrapavosti n_g , velikosti računskih celic, različnih reoloških karakteristik in vpliv različnih načinov modeliranja objektov na hudourniških vršajih. Obravnavana je možnost uporabe rezultatov modelov, izdelanih z uporabo javno dostopnih vhodnih podatkov za pripravo podrobnejših kart nevarnosti, kar bi pomenilo, da je take karte možno pripraviti z relativno majhnimi stroški, brez dragih dodatnih raziskav. Prikazana je tudi možnost izdelave kart nevarnosti z vmesnikom, ki je vgrajen v model Flo-2D.

Kot največja pomanjkljivost med vhodnimi podatki so se izkazali podatki o terenu DMV5, kjer je zaradi avtomatske izdelave vsebovanih veliko napak o topografiji terena, ki lahko bistveno vplivajo na rezultate modela. Sicer pa je večina ostalih uporabljenih vhodnih podatkov dovolj dobro določljiva, da bi bil predlagani način dela uporaben za pripravo kart nevarnosti.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 502.5:519.61/.64:528.9:551.3:556.5:627.141(043.3)

Author: Jošt Sodnik

Supervisor: Prof. dr. Matjaž Mikoš

Co-supervisor: Prof. dr. Matjaž Četina

Title: Mathematical modeling of debris flows and preparing of hazard maps

Notes: 214 p., 35 tab., 120 fig., 13 eq.

Key words: debris flows, digital elevation model, Flo-2D model, hazard maps, mathematical modeling, sensitivity analysis, torrential fans, Sava Dolinka, Koroška Bela

Abstract:

The present thesis begins with an overview and different classifications of mass movements. Debris flows, one type of mass movements, are described in detail. First, their characteristics are presented and also classified according to the type of triggering, magnitude and velocity. The main differences between the debris flows and other mass movements are also described. In addition, the mathematical model Flo-2D is described. Its use, functioning and procedure of modeling debris flows are presented, as are the previous experiences with debris flow modeling in Slovenia and the use of different mathematical models, including Flo-2D.

In the following chapter, the Slovene legislation in the area of flooding and erosion hazard is described. This legislation prescribes the methodology of preparing the preliminary hazard maps, hazard maps and risk maps due to the influence of flooding and erosion. The thesis proposes a protocol of preparing the preliminary hazard maps and hazard maps due to the debris flow effects. Debris flows are divided into torrential and slope debris flows.

The main part of the thesis is dedicated to the practical use of the mathematical model Flo-2D in debris flow modeling of torrential fans using only the publicly available data. The alpine valley of Sava Dolinka River was selected as a test region. In the sensitivity analysis of the Flo-2D model, the influence of different parameters was tested: the control parameters settings of the model, the position of the incoming hydrograph, the Manning roughness coefficient, the computational grid size, different rheological characteristics and the influence of different ways of modeling objects on torrential fans. The possibility of using the results of the models made with publicly available data is evaluated in preparing hazard maps. This method would enable the preparation of hazard maps with relatively low costs and without the expensive extra surveys. The possibility of preparing hazard maps using an application proposed in the Flo-2D model is also presented.

The topographic data DEM5 turned out to be the main deficiency of all the input data used in the research, as they can dramatically affect the model results and hazard area assessments. The rest of the applied model input data can be defined well enough to be efficient in preparing the hazard maps the way it is described in this thesis.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Matjažu Mikošu in somentorju prof. dr. Matjažu Četini za vso strokovno pomoč in vzpodbudne besede pri nastajanju te naloge. Prof. Mikošu se zahvaljujem tudi za dobro sodelovanje skozi celoten čas podiplomskega študija.

Zahvaljujem se vsem strokovnim sodelavcem na ciljnem raziskovalnem projektu Ocena ogroženosti zaradi delovanja drobirskih tokov, ki ga je financirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost RS in v okviru katere je začela nastajati ta naloga.

Delodajalcu, podjetju VGP d.d. iz Kranja, se zahvaljujem za financiranje študija, sodelavcem pa za pomoč pri delovnih obveznostih, ki sem jih predvsem ob zaključku nastajanja tega dela nehote prelagal nanje.

Družini se zahvaljujem, ker so mi omogočili šolanje, me ves čas šolanja spodbujali in mi znanje predstavili kot vrednoto, s katero lahko narediš veliko dobrega.

Največja in najbolj iskrena zahvala pa gre ženi Janji in hčerki Niki, ki nehote o drobirskih tokovih vesta več kot povprečen arhitekt in dveinpolletna deklica. Predvsem pa sem hvaležen za vzpodbudne besede med študijem in da se nista pritoževali nad mojim zanemarjanem in sitnobo med kritičnimi trenutki pisanja te naloge, ki je brez njiju ne bi bilo. Predvsem pa tudi jaz ne bi bil to kar sem.

KAZALO

1 UVOD	1
2 PREGLED, KLASIFIKACIJA IN OPIS LASTNOSTI MASNIH GIBANJ	4
2.1 Uvod	4
2.2 Razdelitev masnih gibanj	4
2.2 Opis posameznih tipov masnih gibanj	6
2.2.1 Plazovi.....	6
2.2.2 Podori.....	8
2.2.3 Tokovi.....	9
3 DROBIRSKI TOKOVI.....	11
3.1 Lastnosti in različne delitve drobirskih tokov.....	11
3.1.1 Drobirski tokovi v Sloveniji.....	11
3.1.2 Faze drobirskega toka	13
3.1.3 Nastanek drobirskega toka – delitev glede na način proženja	15
3.1.4 Delitev drobirskih tokov po velikosti	16
3.1.5 Delitev drobirskih tokov po hitrosti.....	16
3.1.6 Sestava drobirskega toka.....	18
3.2 Razlike med drobirskimi tokovi in drugimi masnimi gibanji	19
3.2.1 Razlika med drobirskim tokom in normalnim ali prekoncentriranim vodnim tokom	19
3.2.2 Razlika med drobirskim tokom in zemljinskimi plazovi in splazitvami	20
4 MATEMATIČNI MODEL FLO-2D	21
4.1 Splošno o modeliranju drobirskih tokov	21
4.2 Opis modela Flo-2d	22
4.3 Delovanje modela Flo-2D	24
4.4 Modeliranje drobirskih tokov z modelom FLO-2D.....	26
4.5 Izdelava modela drobirskega toka v programu FLO-2D.....	30
4.5.1 Geometrija.....	30

4.5.2 Določitev računskega območja.....	31
4.5.3 Vnos vhodnega hidrograma in spodnjega robnega pogoja.....	32
4.5.4 Vnos reoloških podatkov	33
4.5.5 Nastavitve kontrolnih parametrov izračuna.....	33
4.6 Prikaz rezultatov modela Flo-2D	34
4.7 Izkušnje z modeliranjem drobirskih tokov v Sloveniji	34
4.7.1 Log pod Mangartom	34
4.7.2 Koseč	42
5 OCENJEVANJE NEVARNOSTI IN OGROŽENOSTI.....	46
5.1. Zakonodaja s področja kartiranja oz. ocenjevanja nevarnosti in ogroženosti zaradi delovanja voda in erozije v Sloveniji.....	46
5.1.1 Uvod	46
5.1.2 DIREKTIVA 2007/60/ES o oceni in obvladovanju poplavne ogroženosti.....	47
5.1.3 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	50
5.1.4 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.....	61
5.2 Dosedanje delo na področju ocenjevanja ogroženosti in nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov v Sloveniji.....	65
5.2.1 CRP: Ocena ogroženosti zaradi delovanja drobirskih tokov.....	66
5.2.2 Metode za ocenjevanje ogroženosti z drobirskimi tokovi.....	80
5.3 Karte območij delovanja drobirskih tokov	83
5.3.1 Predlog koncepta izdelave kart.....	83
5.3.2 Delitev drobirskih tokov glede na mesto proženja	85
5.3.3 Predlog priprave različnih vrst kart	86
6 MODELIRANJE DROBIRSKIH TOKOV PRI PRIPRAVI PODROBNEJŠIH KART NEVARNOSTI.....	90
6.1 Kratek opis raziskave.....	90

6.1.1 Uvod.....	90
6.1.2 Potek raziskave	91
6.2 Predstavitev vhodnih podatkov	92
6.2.1 Geometrija.....	92
6.2.2 Hidrologija	93
6.2.3 Magnituda modeliranih drobirskih tokov	99
6.3 Občutljivostna analiza modela pri modeliranju hudourniških drobirskih tokov	108
6.3.1 Nastavitve kontrolnih parametrov modela.....	108
6.3.2 Pozicija vhodnega hidrograma na vršaju	110
6.3.3 Manningov koeficient hrapavosti n_g	113
6.3.4 Velikost celic računske mreže.....	128
6.3.5 Analiza različnih načinov modeliranja vpliva objektov na vršaju.....	142
6.3.6 Analiza vpliva različnih reoloških karakteristik tokov	154
6.4 Modeliranje pobočno – hudourniških drobirskih tokov	166
6.4.1 Modeli pobočno-hudourniških pobočnih tokov z različnimi scenariji	166
6.4.2 Analiza možnih sprememb modela za zmanjšanje hitrosti drobirskih tokov	169
6.4.3 Ugotovitve pri modeliranju pobočno-hudourniških drobirskih tokov	177
6.4.4 Modeli pobočno-hudourniških drobirskih tokov s konstantnim koeficientom n_g	179
6.4.5 Zaključki modeliranja pobočno-hudourniških drobirskih tokov	188
7 ZAKLJUČKI	189
7.1 Uporabnost vhodnih podatkov in vpliv na rezultate	189
7.1.1 Uvod.....	189
7.1.2 Podatki o terenu DMV	189
7.1.3 Podatki o padavinah in visokih vodah	192
7.1.4 Ostali parametri in vhodni podatki modela.....	192
7.1.5 Modeliranje pobočno-hudourniških drobirskih tokov	196
7.2 Delovanje in uporabnost modela Flo-2D	197
7.2.1 Uvod.....	197
7.2.2 Izdelava modela	198
7.2.3 Prikaz in obdelava rezultatov	199

7.3 Možnosti uporabe rezultatov za pripravo podrobnejših kart nevarnosti.....	201
7.3.1 Uvod	201
7.3.2 Priprava kart nevarnosti v modelu Flo-2D	201
7.3.3 Možnosti uporabe rezultatov modelov za pripravo kart nevarnosti	205
7.4 Napotki za nadaljnje delo	207
8. POVZETEK.....	209
9. SUMMARY.....	212
VIRI	215

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Splošni pregled kopenskih masnih premikanj (Skaberne, 2001)	5
Preglednica 2:	Predlog kriterija razvrščanja podornih pojavov v razrede (CRP, 2004)	9
Preglednica 3:	Razdelitev drobirskih tokov na razrede glede na velikost (Fell, 1994 cit. po Fazarinc, 2002)	16
Preglednica 4:	Razdelitev drobirskih tokov v razrede glede na hitrost gibanja (Ribičič, 2000/2001)	17
Preglednica 5:	Razdelitev drobirskih tokov v hitrostne razrede (različni avtorji)	17
Preglednica 6:	Opis posledic drobirskih tokov različnih razredov	18
Preglednica 7:	Vrednosti koeficienta K za različne površine (O'Brien, 2006)	28
Preglednica 8:	Podatki o koeficientih α in β za različne primere drobirskih tokov (O'Brien, 2006)	30
Preglednica 9:	Merila za določitev razredov ranljivosti (UL RS 60/07)	59
Preglednica 10:	Klasifikacija obravnavanih vršajev v tri razrede ogroženosti (Sodnik, 2005)	83
Preglednica 11:	Padavine na postaji Javorniški Rovt (VGI, 1995)	95
Preglednica 12 :	Padavine na postaji Rateče – Planica (VGI, 1995)	95
Preglednica 13:	Podatki o stoletnih pretokih za obravnavane hudournike na Savi Dolinki	96
Preglednica 14:	Podatki o povodjih hudournikov na Savi Dolinki (VGI, 1995)	96
Preglednica 15:	Izračunane magnitude drobirskih tokov po metodi Takei	100
Preglednica 16:	Izračunane magnitude drobirskih tokov po metodi Kronfellner-Kraus	100
Preglednica 17:	Izračunane magnitude drobirskih tokov po metodi Marchi & D'Agostino	100
Preglednica 18:	Izračunane magnitude drobirskih tokov po metodi Ceriani et al.	100
Preglednica 19:	Izračunane magnitude drobirskih tokov za različne vrednosti C_v	102
Preglednica 20:	Izračunane magnitude drobirskih tokov za različne vrednosti maksimalnih pretokov pri $C_v = 0,5$	107

Preglednica 21:	Izračunane magnitude drobirskih tokov za različne vrednosti maksimalnih pretokov pri $C_v = 0,42$	<u>107</u>
Preglednica 22:	Testiranje kontrolnih parametrov modela	<u>109</u>
Preglednica 23:	Vrednosti koeficienta n_g za različne površine (Julien, 2002)	<u>114</u>
Preglednica 24:	Vrednosti koeficienta n_g za različne površine (O'Brien, 2006)	<u>114</u>
Preglednica 25:	Vrednosti koeficienta n_g pri testiranju vpliva na Presušniku	<u>115</u>
Preglednica 26:	Vrednosti koeficienta n_g pri testiranju vpliva na Beli	<u>120</u>
Preglednica 27:	Število celic in čas računanja v odvisnosti od računske celice	<u>129</u>
Preglednica 28:	Pregled modelov in podatkov pri analizi vpliva velikosti celice	<u>130</u>
Preglednica 29:	Pregled modelov in podatkov pri analizi vpliva različnih možnosti zajema vpliva objektov	<u>143</u>
Preglednica 30:	Mejne vrednosti reoloških parametrov pri izbranih C_v	<u>157</u>
Preglednica 31:	Pregled modelov in podatkov pri različnih kombinacijah reoloških parametrov	<u>157</u>
Preglednica 32:	Pregled modelov in reoloških podatkov modelov pri dodani analizi modela	<u>162</u>
Preglednica 33:	Pregled modelov in podatkov pri različnih variantah hudourniško-pobočnih tokov	<u>166</u>
Preglednica 34:	Pregled modelov in različnih dodatnih nastavitev za omejevanje hitrosti toka	<u>173</u>
Preglednica 35:	Pregled modelov s konstantno vrednostjo koeficienta hrapavosti n_g	<u>180</u>

KAZALO SLIK

Slika 1 :	Razdelitev masnih gibanj glede na vrsto in delež delcev (Meunier, 1991 in Coussot, 1996 cit. po CRP, 2004)	5
Slika 2:	Shematski prikaz gibanja drobirskega toka po strugi v treh značilnih prečnih prerezi: (Mikoš, 2000/2001)	14
Slika 3:	Težka napovedljivost drobirskega toka je tudi posledica velike oddaljenosti od mesta izvora do mesta razlivanja (Ribičič, 2000/2001)	15
Slika 4:	Grafični prikaz računa smeri toka v posamezni računski celici (O'Brien, 2006)	23
Slika 5:	Prikaz različnih tipov masnih gibanj v odvisnosti od koncentracije materiala v vodi (O'Brien, 2006)	27
Slika 6:	Strižna trdnost mešanice v odvisnosti od C_v (O'Brien, 2006)	29
Slika 7:	Viskoznost v odvisnosti od C_v (O'Brien, 2006)	29
Slika 8:	Primer računskega območja na vršaju Koroške Bele (mreža 5m x 5m)	32
Slika 9:	Pregledna situacija področja in računskih odsekov (Rajar et al. 2001)	35
Slika 10:	Odsek D – primerjava merjenih sledov na bregovih in izračunanih maksimalnih gladin (Rajar et al., 2001)	38
Slika 11 :	Izračunani hidrogrami za različne scenarije (vhodni podatek za odseka C in D) (Rajar et al., 2001)	39
Slika 12 :	Umerjanje modelov PCFLOW2D in FLO-2D (Rajar et al., 2001)	41
Slika 13:	Karta ogroženosti Zgornjega in Spodnjega Loga za primer ponovitve dogodka (Hojnik et al., 2001)	42
Slika 14:	Shema postopka določitve poplavnih in erozijskih območij (UL RS 60/07)	54
Slika 15:	Legenda oznak na kartah poplavne nevarnosti (UL RS 60/07)	56
Slika 16:	Legenda oznak na kartah erozijske nevarnosti (UL RS 60/07)	57
Slika 17:	Oznaka razredov nevarnosti na karti razredov poplavne ali erozijske nevarnosti (UL RS 60/07)	58
Slika 18:	Oznake razredov ranljivosti (UL RS 60/07)	60
Slika 19:	Kriteriji za določitev razredov ogroženosti (UL RS 60/07)	60
Slika 20 :	Prikaz mest izkopov na vršaju hudournika Bela (CRP, 2008)	68
Slika21:	Profil zgornjega izkopa na hudourniškem vršaju Bela (CRP, 2008)	69

Slika 22:	Prikaz razredov padavin s 50 letno povratno dobo (CRP, 2008)	76
Slika 23:	Karta verjetnosti nastajanja drobirskih tokov v Sloveniji M 1:250 000 (CRP, 2008)	79
Slika 24:	Karta izpostavljenosti drobirskim tokovom v slovenskih občinah (CRP, 2008)	80
Slika 25:	Hidrogram odtoka za Trebižo (Sodnik, 2005)	97
Slika 26:	Hidrogram odtoka za Suhelj (Sodnik, 2005)	97
Slika 27:	Hidrogram odtoka za Presušnik (Sodnik, 2005)	98
Slika 28:	Hidrogram odtoka za Belo (Sodnik, 2005)	98
Slika 29:	Vhodni hidrogram za drobiski tok $C_v = 0,5$	102
Slika 30:	Vhodni hidrogram za drobiski tok $C_v = 0,42$	102
Slika 31:	Vhodni hidrogram za hudournik Bela $Q_{max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_v = 0,50$	104
Slika 32:	Vhodni hidrogram za hudournik Bela $Q_{max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_v = 0,42$	105
Slika 33:	Vhodni hidrogram za hudournik Bela $Q_{max} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_v = 0,50$	105
Slika 34:	Vhodni hidrogram za hudournik Bela $Q_{max} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_v = 0,42$	106
Slika 35:	Vhodni hidrogram za hudournik Bela $Q_{max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_v = 0,50$	106
Slika 36:	Vhodni hidrogram za hudournik Bela $Q_{max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_v = 0,42$	107
Slika 37:	Tri pozicije hidrogramov na vršaju hudournika Presušnik (CRP, 2008)	110
Slika 38:	Izračunane maksimalne globine pri najnižji poziciji hidrograma (15x15, voda Q_{100}) (CRP, 2008)	111
Slika 39:	Izračunane maksimalne globine pri srednji poziciji hidrograma (15x15, voda Q_{100}) (CRP, 2008)	112
Slika 40:	Izračunane maksimalne globine pri najvišji poziciji hidrograma (15x15, voda Q_{100}) (CRP, 2008)	112
Slika 41:	Maksimalne globine pri modelu Pres5 (voda Q_{100} , 15x15, n_g : gozd 0,15; travnik 0,03; struga 0,1)	116
Slika 42:	Maksimalne globine pri modelu Pres6 (voda Q_{100} , 15x15, n_g : gozd 0,25; travnik 0,035; struga 0,15)	116
Slika 43:	Maksimalne hitrosti pri modelu Pres5 (voda Q_{100} , 15x15, n_g : gozd 0,15; travnik 0,03; struga 0,1)	117
Slika 44:	Maksimalne hitrosti pri modelu Pres6 (voda Q_{100} , 15x15, n_g : gozd 0,25; travnik 0,035; struga 0,15)	117

Slika 45: Pozicije izbranih prečnih prerezov na vršaju Presušnika	118
Slika 46: Primerjava vpliva koeficienta n_g na maksimalne gladine v prerezu P1 (Presušnik)	119
Slika 47: Primerjava vpliva koeficienta n_g na maksimalne gladine v prerezu P2 (Presušnik)	119
Slika 48: Pozicije izbranih prečnih prerezov na vršaju Bele	121
Slika 49: Primerjava vpliva koeficienta n_g na maksimalne gladine v prerezu P1 (Bela)	122
Slika 50: Primerjava vpliva koeficienta n_g na maksimalne gladine v prerezu P2 (Bela)	122
Slika 51: Maksimalne globine drobirskega toka pri modelu Bela6 (5x5, Q_{100} , $C_v=0,5$ n_g : gozd 0,12; ostalo območje 0,04)	124
Slika 52: Maksimalne globine drobirskega toka pri modelu Bela8 (5x5, Q_{100} , $C_v=0,5$, n_g : povsod 0,2)	124
Slika 53: Maksimalne globine drobirskega toka pri modelu Bela17 (5x5, Q_{100} , $C_v=0,5$ n_g : gozd 0.16; travnik 0.033; struga 0.13; območje hiš 0.2)	125
Slika 54: Maksimalne hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela6 (5x5, Q_{100} , $C_v=0,5$ n_g : gozd 0,12; ostalo območje 0,04)	125
Slika 55: Maksimalne hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela8 (5x5, Q_{100} , $C_v=0,5$, n_g : povsod 0,2)	126
Slika 56: Maksimalne hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela17 (5x5, Q_{100} , $C_v=0,5$ n_g : gozd 0,16; travnik 0,033; struga 0,13; območje hiš 0,2)	126
Slika 57: Maksimalne globine drobirskega toka pri modelu Bela14 (15x15, hidrogram Q_{100} , $C_v=0,42$)	131
Slika 58: Maksimalne globine drobirskega toka pri modelu Bela19 (5x5, hidrogram Q_{100} , $C_v=0,42$)	132
Slika 59: Maksimalne hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela14 (15x15, hidrogram Q_{100} , $C_v=0,42$)	132
Slika 60: Maksimalne hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela19 (5x5, hidrogram Q_{100} , $C_v=0,42$)	133
Slika 61: Zgornji del vršaja (območje P1), kjer bo prikazana podrobnejša primerjava rezultatov	134

Slika 62: Detajl izračunanih globin pri računski mreži 5m x 5m (Bela19, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$)	135
Slika 63: Detajl izračunanih globin pri računski mreži 15m x 15m (Bela14, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$)	135
Slika 64: Detajl izračunanih hitrosti pri računski mreži 5m x 5m (Bela19, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$)	136
Slika 65: Detajl izračunanih hitrosti pri računski mreži 15m x 15m (Bela14, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$)	136
Slika 66: Detajl izračunanih hitrosti (vektorski prikaz) pri računski mreži 5m x 5m (Bela19, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$)	137
Slika 67: Detajl izračunanih hitrosti (vektorski prikaz) pri računski mreži 15m x 15m (Bela14, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$)	138
Slika 68: Gladina drobirskega toka v profilu P1 pri mreži 5x5 (Bela 19, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$)	138
Slika 69: Gladina drobirskega toka v profilu P1 pri mreži 15x15 (Bela 14, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$)	139
Slika 70: Maksimalne globine drobirskega toka pri modelu Bela19 (5x5, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$, hiše: povečan n_g)	145
Slika 71: Maksimalne globine drobirskega toka pri modelu Bela20 (5x5, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$, hiše: blokirane celice)	146
Slika 72: Maksimalne hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela19 (5x5, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$, hiše: povečan n_g)	146
Slika 73: Maksimalne hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela20 (5x5, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$, hiše: blokirane celice)	147
Slika 74: Zgornji del vršaja (območje P1), kjer bo prikazana podrobnejša primerjava rezultatov	148
Slika 75: Podrobnejši prikaz izračuna maksimalnih globin drobirskega toka pri modelu Bela19 (5x5, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$, hiše: povečan n_g)	148
Slika 76: Podrobnejši prikaz izračuna maksimalnih globin drobirskega toka pri modelu Bela20 (5x5, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$, hiše: blokirane celice)	149
Slika 77: Podrobnejši prikaz izračuna maksimalnih hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela19 (5x5, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$, hiše: povečan n_g)	149

Slika 78:	Podrobnejši prikaz izračuna maksimalnih hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela20 (5x5, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$, hiše: blokirane celice)	150
Slika 79:	Podrobnejši prikaz izračuna maksimalnih hitrosti (vektorski prikaz) drobirskega toka pri modelu Bela19 (5x5, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$, hiše: povečan n_g)	150
Slika 80:	Podrobnejši prikaz izračuna maksimalnih hitrosti (vektorski prikaz) drobirskega toka pri modelu Bela20 (5x5, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$, hiše: blokirane celice)	151
Slika 81:	Viskoznost v odvisnosti o volumske koncentracije (O'Brien, 2006)	156
Slika 82:	Strižna trdnost v odvisnosti o volumske koncentracije (O'Brien, 2006)	156
Slika 83:	Maksimalne globine drobirskega toka pri modelu Bela21 (15x15, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,5$, $\tau=18 \text{ N/m}^2$ in $\eta=5,4 \text{ Pas}$)	158
Slika 84:	Maksimalne globine drobirskega toka pri modelu Bela22 (15x15, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,5$, $\tau=800 \text{ N/m}^2$ in $\eta=185 \text{ Pas}$)	159
Slika 85:	Maksimalne hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela21 (15x15, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,5$, $\tau=18 \text{ N/m}^2$ in $\eta=5,4 \text{ Pas}$)	159
Slika 86:	Maksimalne hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela22 (15x15, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,5$, $\tau=800 \text{ N/m}^2$ in $\eta=185 \text{ Pas}$)	160
Slika 87:	Zgornji del vršaja, kjer je bil izbran primerjalni prerez P1	161
Slika 88:	Prečni prerez P1 – primerjava gladin modelov z različnimi reološkimi parametri	161
Slika 89:	Maksimalne globine drobirskega toka pri modelu Bela22b (15x15, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,5$, $\tau=800 \text{ N/m}^2$ in $\eta= 3000 \text{ Pas}$)	163
Slika 90:	Maksimalne hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela22b (15x15, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,5$, $\tau=800 \text{ N/m}^2$ in $\eta= 3000 \text{ Pas}$)	163
Slika 91:	Prečni prerez P1 – primerjava gladin z modelov z različnimi reološkimi parametri – dodatna analiza	164
Slika 92:	Maksimalne globine pri modelu Bela 36 (15x15, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$)	167
Slika 93:	Maksimalne hitrosti pri modelu Bela 36 (15x15, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$)	168

Slika 94: Maksimalne globine pri modelu Bela 38 (15x15, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$)	168
Slika 95: Maksimalne hitrosti pri modelu Bela 38 (15x15, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$)	169
Slika 96: Računska mreža na zgornjem delu vršaja v prvotnem modelu z mrežo 15 m x 15 m	171
Slika 97: Nova podaljšana mreža 15 m x 15 m pri novem modelu	171
Slika 98: Maksimalne hitrosti pri modelu Bela 39 (podaljšana 15x15 mreža, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$)	174
Slika 99: Maksimalne hitrosti pri modelu Bela 48 (podaljšana 15x15 mreža, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$, hidrogram v 4 celicah oblike 1x4)	175
Slika 100: Maksimalne hitrosti pri modelu Bela 49 (podaljšana 15x15 mreža, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$, hidrogram v 4 celicah oblike 1x4, omejitev $Fr \leq 1,1$)	176
Slika 101: Maksimalne hitrosti v zgornjem delu vršaja -Bela36 (15x15, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : gozd $0,16 \text{ ms}^{-1/3}$; travnik $0,033 \text{ ms}^{-1/3}$; struga $0,13 \text{ ms}^{-1/3}$; področje med hišami $0,035 \text{ ms}^{-1/3}$)	177
Slika 102: Maksimalne hitrosti v zgornjem delu vršaja -Bela39 (podaljšana 15x15 mreža, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : celotna mreža $0,04 \text{ ms}^{-1/3}$)	178
Slika 103: Računska mreža na zgornjem delu vršaja Bela	181
Slika 104: Maksimalne globine pri modelu Bela 54 (15x15 mreža, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : povsod $0,25 \text{ ms}^{-1/3}$)	181
Slika 105: Maksimalne globine pri modelu Bela 56 (15x15 mreža, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : povsod $0,15 \text{ ms}^{-1/3}$)	181
Slika 106: Maksimalne hitrosti pri modelu Bela 54 (15x15 mreža, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : povsod $0,25 \text{ ms}^{-1/3}$)	182
Slika 107: Maksimalne hitrosti pri modelu Bela 56 (15x15 mreža, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : povsod $0,15 \text{ ms}^{-1/3}$)	182
Slika 108: Zgornji del vršaja Bela, kjer je prikazana podrobnejša preiskava in je bil izbran primerjalni prerez P1	183
Slika 109: Podrobnejši prikaz maksimalnih globin v zgornjem delu vršaja pri modelu Bela 56 (15x15 mreža, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : povsod $0,15 \text{ ms}^{-1/3}$)	184

Slika 110: Podrobnejši prikaz maksimalnih globin v zgornjem delu vršaja pri modelu Bela 54 (15x15 mreža, $C_v = 0,42$, $Q_{max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : povsod $0,25 \text{ ms}^{-1/3}$)	184
Slika 111: Podrobnejši prikaz maksimalnih hitrosti v zgornjem delu vršaja pri modelu Bela 56 (15x15 mreža, $C_v = 0,42$, $Q_{max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : povsod $0,15 \text{ ms}^{-1/3}$)	185
Slika 112: Podrobnejši prikaz maksimalnih hitrosti v zgornjem delu vršaja pri modelu Bela 54 (15x15 mreža, $C_v = 0,42$, $Q_{max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : povsod $0,25 \text{ ms}^{-1/3}$)	185
Slika 113: Podrobnejši prikaz maksimalnih hitrosti (vektorski prikaz) v zgornjem delu vršaja pri modelu Bela 56 (15x15 mreža, $C_v = 0,42$, $Q_{max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : povsod $0,15 \text{ ms}^{-1/3}$)	186
Slika 114: Podrobnejši prikaz maksimalnih hitrosti (vektorski prikaz) v zgornjem delu vršaja pri modelu Bela 54 (15x15 mreža, $C_v = 0,42$, $Q_{max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : povsod $0,25 \text{ ms}^{-1/3}$)	186
Slika 115: Gladine v prerezu P1 v odvisnosti od koeficienta hrapavosti n_g	186
Slika 116: Model Trebiža, kjer se voda razliva izven struge že v zgornjem delu vršaja (voda, Q_{100} , mreža 5x5) (Sodnik et al., 2009)	188
Slika 117: Model Trebiže z uporabo podatkov DMV12,5 (voda, Q_{100} , mreža 12.5 x 12.5) (Sodnik et al., 2009)	191
Slika 118: Karta nevarnosti pri modelu Bela20 (rdeča barva – velika nevarnost, oranžna barva- majhna nevarnost)	203
Slika 119: Karta nevarnosti pri modelu Bela20 (moj predlog razdelitve razredov: rdeča barva – velika nevarnost, oranžna barva- srednja nevarnost, rumena – majhna nevarnost)	204
Slika 120: Karta nevarnosti v zgornjem delu vršaja Bela (rdeča barva – velika nevarnost, oranžna barva- srednja nevarnost, rumena – majhna nevarnost)	205

1 UVOD

Drobirski tokovi veljajo za enega bolj redkih, vendar zelo intenzivnih pojavov, ki imajo lahko katastrofalne posledice. Pogosto povzročijo veliko gmotno škodo ali celo terjajo človeška življenja. Prav ta zadnji podatek in dejstvo, da so v Sloveniji drobirski tokovi v zadnjem obdobju vse bolj pogosti, je razlog, da se tudi slovenska stroka s tem pojavom ukvarja vse bolj intenzivno.

Drobirski tokovi so masno gibanje, ki je po koncentraciji sedimenta v vodi nekje med čisto vodo in zemljinskim plazom, odvisno od primera do primera. Pregled vseh masnih gibanj je predstavljen na začetku naloge v poglavju 2. V njej je poudarek na modeliranju drobirskih tokov na hudourniških vršajih, ki se pojavljajo na hudourniških območjih (poglavje 3). Razlog za to je v tem, da taki drobirski tokovi zelo pogosto ogrožajo območje hudourniških vršajev, kjer je poselitev navadno gosta.

V zadnjem obdobju je bila v Sloveniji sprejeta zakonodaja na področju varstva pred poplavami in erozijo. Natančno so določeni postopki za izdelavo opozorilnih kart, kart nevarnosti in kart ogroženosti zaradi delovanja voda, ter s tem poplav in erozije. Zakonodaja prav tako predpisuje omejevanje dejavnosti in posegov za ogrožena območja. S tem naj bi bile preprečene vse dejavnosti in posegi, ki bi lahko zaradi škodljivega delovanja voda utrpeli škodo oz. bili zaradi poplav ali erozije prizadeti.

Omenjena zakonodaja, ki je v tej nalogi predstavljena v poglavju 5, pa ne zajema problematike drobirskih tokov. Zaradi prej omenjene pogostosti pojavljanja drobirskih tokov, bi bila podobna zakonodaja oz. kartiranje potrebno tudi na področju drobirskih tokov, ki so zelo specifičen dogodek. Za razliko od poplav drobirski tokovi niso periodičen pojav, ki se ponovi vsakih nekaj let, ampak se na določenem območju zgodi in se potem na tem istem območju lahko ne ponovi tudi nekaj sto let. To dejstvo botruje temu, da je v Sloveniji zelo malo historičnih podatkov in zabeležk o takih dogodkih.

V tej nalogi je podan predlog za izdelavo opozorilnih kart, ki bi jih lahko izdelali z dodelavo že izdelanega modela verjetnosti pojavljanja drobirskih tokov (CRP, 2008) in klasifikacije

hudourniških vršajev. Podrobnejše karte nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov pa bi bilo potrebno izdelati z uporabo matematičnih modelov za gibanje drobirskega toka. Uporaba matematičnega modela je z zakonodajo predvidena tudi pri izdelavi kart nevarnosti zaradi poplav in erozije.

Matematično modeliranje drobirskih tokov je bilo do danes ponavadi uporabljeno za pojasnjevanje preteklih dogodkov in za napoved morebitnih posledic ponovitve dogodka (Rajar et al., 2001; Hojnik, 2004; Hojnik et al., 2001; Mikoš et al., 2006), kjer je zaradi podatkov o dogodku in ustreznih meritev, možno umerjanje modela.

Modeliranje pa je lahko uporabno tudi za napovedovanje in ocenjevanje posledic potencialnih dogodkov na območjih, kjer se v bližnji preteklosti drobirski tokovi niso pojavljali, ampak območje zaradi svojih karakteristik spada v potencialno nevarno (opozorilna karta drobirskih tokov). Težava pri takem modeliranju pa je veliko neznanih parametrov in pomanjkanje podatkov s terena, ki bi omogočali umerjanje modela.

Glavni cilj te naloge je ugotoviti, do katere mere oz. natančnosti, je možno z uporabo komercialnega matematičnega modela Flo-2D in javno dostopnih podatkov o terenu, padavinah in ostalih parametrih napovedati posledice potencialnih drobirskih tokov na hudourniških vršajih. Za podatke o terenu je na Geodetski upravi RS na voljo digitalni model višin v različnih natančnostih. Najbolj natančna verzija DMV5, kjer so podatki o terenu posneti z resolucijo 5 m, je bila uporabljena v tej nalogi. Podatki o padavinah pa so dostopni na Agenciji RS za okolje in so uporabljeni v hidroloških študijah posameznih povodij, ki jih izdeluje Inštitut za vode RS. Prav ti javno dostopni in že obstoječi podatki bi namreč omogočili izdelavo omenjenih podrobnejših kart nevarnosti z minimalnimi stroški.

V tej nalogi je opravljena občutljivostna analiza matematičnega modela Flo-2D. Ta model je bil v tej raziskavi izbran, ker je komercialen, kar pomeni, da je javno dostopen in ga je možno kupiti. Model Flo-2D je v tujini verificiran (ang. FEMA approved hydraulic model) za modeliranje drobirskih tokov. Poleg tega pa je bil ta model že uspešno uporabljen za modeliranje drobirskih tokov tudi v Sloveniji in sicer v Logu pod Mangartom in v Koseču. Sicer je v Sloveniji na voljo tudi matematični model PCFLOW2D, ki je bil razvit na UL-FGG

in je bil prav tako uspešno uporabljen v Logu pod Mangartom. Glavna prednost modela Flo-2D je v tem, da je komercialen in ima zato vgrajenih veliko uporabnih vmesnikov, med drugim tudi za izdelavo kart nevarnosti.

V raziskavo so vključeni hudourniški vršaji hudournikov Bela, Suhelj, Trebiža in Presušnik, ki so vsi pritoki Save Dolinke. Večina raziskav je bila opravljenih na vršaju hudournika Bela, za katerega velja, da so se v preteklosti že prožili drobirski tokovi. Prav tako je bilo ugotovljeno, da tudi nastanek novih drobirskih tokov velikih razsežnosti ni izključen. Na podlagi te analize so sprejeti določeni zaključki o tem, kateri parametri so bolj pomembni, in kateri manj in predvsem, kako uporabni so prej omenjeni javni podatki pri izdelavi podrobnejših kart nevarnosti. Izdelava kart nevarnosti, in kasneje kart ogroženosti, bi pomenila velik napredek na področju preventive, saj bi se lahko ob upoštevanju teh kart omejilo oz. preprečilo posege in dejavnosti na ogroženih območjih. To bi imelo za posledico manj škode in človeških žrtev ob morebitnih katastrofalnih dogodkih, kar drobirski tokovi nedvomno so.

2 PREGLED, KLASIFIKACIJA IN OPIS LASTNOSTI MASNIH

GIBANJ

2.1 Uvod

Masna gibanja povzročajo sprememba ravnovesja sil. Zunanje sile so preperevanje, ciklični zmrzovanja in taljenja, dolgotrajne padavine in močni nalivi, erozivnost padavin in vodotokov, potresi, povečanje vodostaja in precejanje podzemnih voda skozi pobočje, nihanje gladin, vremenski faktorji ter antropogeni posegi v okolje. Ti so preobtežitev pobočja z objekti, nasutji, nezavarovani vkopi pri gradbenih posegih, miniranje, neustrezno pridobivanje surovin ali neprimerna raba zemljišč, posek gozdne vegetacije, pomanjkljivo vzdrževanje gozdov, prekomerna paša, intenzivna raba in denudacija. Ti posegi učinkujejo na sistem in ga pripeljejo do labilne ravnotežne lege in zato ta sistem preide v novo stabilno ravnotežno lego (CRP, 2004).

Osnovna geološka sestava, površje in usmerjenost površin so osnovni parametri, ki ostajajo bolj ali manj stabilni v daljših časovnih obdobjih. Ti parametri določajo osnovno dovzetnost pobočij za nestabilnost.

2.2 Razdelitev masnih gibanj

Tipov masnih gibanj je več. Med seboj se razlikujejo po nastanku, po sestavi mase, predvsem pa po načinu premikanja in odlaganja mase. Skozi čas se je pojavilo več klasifikacij, ki so masna gibanja razdelile na različne tipe. Podlage za razdelitev so lahko različne. Najpogostejše so kvantitativni podatki, analiza mikrostrukture materiala, mehanske značilnosti toka ali pa terenske raziskave. Te delitve so si pogosto tudi nasprotujoče.

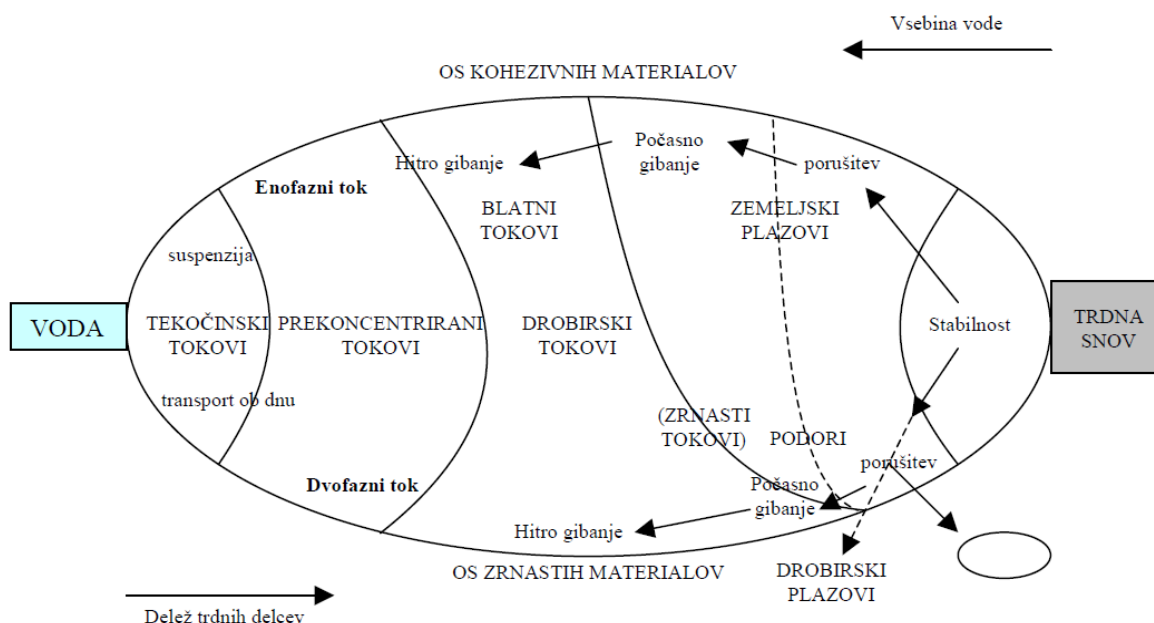
V preglednici 1 je podan splošni pregled kopenskih masnih gibanj, ki temelji na koncentraciji delcev in se prične s transportom lebdečih plavin.

Preglednica 1: Splošni pregled kopenskih masnih premikanj (Skaberne, 2001).

Table1: Overview of subareal mass transport.

Kopenska masna premikanja (subareal mass transport)	TEČENJE (flows)	<ul style="list-style-type: none"> - transport lebdečih plavin (suspended sediment transport) - prekoncentrirani tokovi (hyperconcentrated flows) - tokovi puhlice (loess flows) - zrnasti tokovi (granular flows) - drobirski hudourniki (debris torrents) - drobirski tokovi (debris flows) - snežni plazovi (snow avalanches) - drobirski plazovi (debris avalanches)
	PLAZENJE (slides)	<ul style="list-style-type: none"> - drobirski plazovi (debris slides) - usadi (slumps) - drsenje blokov (block slides) - skalnati plazovi (rock slides)
	PADANJE (falls)	<ul style="list-style-type: none"> - skalno in zemljinsko padanje (rock and soil falls)

Pregledna klasifikacija je tudi slika 1, ki deli gibanja glede na vrsto in delež trdnih delcev.



Slika 1 : Razdelitev masnih gibanj glede na vrsto in delež delcev (Meunier, 1991 in Coussot, 1996 cit. po CRP, 2004).

Fig. 1 : Classification of mass movements according to type and concentration of sediment parts.

2.2 Opis posameznih tipov masnih gibanj (povzeto po CRP, 2004)

2.2.1 Plazovi

Zemeljski plazovi so podmnožica širše množice zemljinskih plazov, kamor spadajo tudi drobirski plazovi, glede na granulometrično sestavo prevladujočega materiala plazovine. Pri zemljinskih plazovih telo plazine sestavljajo zemljine. Zdrs se pojavi znotraj mase zemljine ali pa na kontaktu zemljine s podlago. Voda igra pomembno vlogo s pornimi tlaki, tlaki precejajoče se vode in s tlaki zaradi nabrekanja mineralov gline. V Sloveniji so najpogostejši preperinski plazovi. Preperinsko plazenje nastane s plazenjem preperine po hribinski podlagi. Debelina je odvisna od debeline preperine, ki ponavadi znaša od enega do nekaj metrov. Drsina nastane na stiku preperina – podlaga. Neposredno sprožitev plazenja preperinskega pokrova ponavadi sproži dolgotrajno deževje, lahko pa se sproži tudi neposredno po dežju – poleg vzgonskih tlakov delujejo še strujni. In tak plaz se lahko preoblikuje v pobočni drobirski tok, ki lahko prepotuje večje razdalje. Interakcija zemeljskih plazov in vodotokov lahko pripelje do drobirskih tokov, ki potencialno ogrožajo tudi oddaljene dolvodno ležeče kraje.

Glede na obliko drsne ploskve se plazovi delijo.

- krožna drsna ploskev, ki nastane v homogeni hribini (rotacijsko plazenje)
- linijska drsna ploskev – zdrs plasti po hribini zaradi vložka gline
- kombinirana drsna ploskev – kombinirano plazenje (zgoraj krožno, spodaj linijsko)
- podolgovata drsna ploskev – globoki in dolgi plazovi
- nepravilna drsna ploskev – pri velikih in globokih plazovih

V grobem se zemeljski plazovi delijo na:

- rotacijski plazovi, ki se oblikujejo znotraj homogenega zemljinskega materiala, predvsem v glinastih in meljastih zemljinah. Drsna ploskev je krožna in vpada na odlomnem robu skoraj navpično. Pogosto so v zgornjem delu plazu vidna gola rebra in razpoke. V čelu se zdrsela masa zaustavi, razpade in pri velikem deležu vode lahko preide v pobočni blatni tok.

- translacijski plazovi, ki imajo spremenljivo površino razširjanja in njihova debelina doseže pogosto več deset metrov. Plasti drsijo po šibki coni v zemljini ali na kontaktu zemljine s podložno zemljino. To je pogosto na območjih v flišu, apnenčastih laporjih ali metamorfnih skrilavcih.

Glede na aktivnost se plazovi delijo na:

- aktivni plaz (v fazi premikanja stalno ali s prekinitvami)
- umirjeni plaz (ni več znakov premikanja, saniran plaz)
- fosilni plaz (starejši plaz, kjer se samo po zunanjih znakih vidi, da je bilo prisotno masno gibanje, možni so manjši lokalni zdrsi)
- potencialni plaz (območje, kjer so prisotni vsi dejavniki, ki nakazujejo na možnost plazenja)

Premiki pri so plazovih majhni. Pri aktivnih plazovih več centimetrov ali decimetrov dnevno, izjemoma pa nekaj metrov. Predlagana razvrstitev plazov glede na hitrost gibanja je sledeča:

- 0 - 2 cm na leto = zelo počasen plaz
- 2 - 10 cm na leto = počasen plaz
- > 10 cm na leto = aktiven, počasen s hitrimi fazami

Plazovi so zelo različnih globin, oz. so debeline splazelega materiala zelo različne. Predlagana je naslednja delitev:

- zdrs humusa; zaradi strmega pobočja zdrsne nekaj dm debela plast
- plitek plaz; zdrs preperinskega pokrova do debeline 2 m po kamniti podlagi
- srednje globok plaz; debelina 2 do 5 m
- globok plaz; nastopajo v peskih in peščenjakih, debeline 5 do 10 m
- zelo globoki plazovi; vezani so na narivne zgradbe, na tektonske in litološke meje, zato je globina drsenja več 10, pa tudi preko 100 m

Med zemeljske plazove se štejejo tudi usadi in proces polzenja. Usadi so težnostna gibanja v kamninah z izrazito navpično komponento gibanja vzdolž ločitvenih ploskev. Polzenje pa je dolgotrajno in počasno preoblikovanje v zemljinah in kamninah. Za razliko od hribinskih plazov se ne izoblikujejo neprekinjene drsne ploskve.

2.2.2 Podori

Podor je opredeljen kot hipno in hitro masno gibanje, že predhodno ločenih delov hribine, ki se začne v obliki krajšega zdrsa ali prevrnitve in pri katerem se ločitev od matične kamnine pojavi vzdolž lomnih ploskev v kamnini. Začetno gibanje nato preide v prosto padanje, trk s pobočjem in odboj, let po odboju ali ustavitvev, kotaljenje in drsenje. Pri podorih so ločene faze nastanka, gibanja in odlaganja. Odkladrnine so razdeljene po velikosti na bloke, skalovje in kamenje ter zemljino.

Glede na velikost in hitrost sestavnih delov je bila predlagana naslednja delitev podorov:

padajoče kamenje: premer < 50 cm, hitrost 5 do 30 m/s

padajoče skalovje: premer > 50 cm, hitrost 5 do 30 m/s

skalni podor: prostornina 100 - 100.000 m³, hitrost 10 do 40 m/s

gorski podor: prostornina >1.000.000 m³, hitrost >40 m/s (Crosta et al., 2001 cit. po CRP 2004)

Večina razvrščanj pojavnih oblik podorov temelji na prostornini odkladrnine sproščenega materiala in hitrosti procesa. Smiselno pa bi bilo opredeliti pojave še na osnovi kinematike gibanja, saj se lahko zgodi, da je zaradi razbitja podornega materiala v posamezne kose z opazovanjem stanja po dogodku, težko razbrati ali gre za skupek ali samo za en podorni dogodek.

Na podlagi teh ugotovitev je bila v raziskovalni nalogi (CRP, 2004) predlagana naslednja delitev podornih pojavov v razrede, ki temelji na možnostih rednega vzdrževanja cest oz. možnosti sanacij podornih pojavov na cestah. V razdelitvi so upoštevane človekova moč dvigovanja, moč viličarja ali avtodvigala in meja, kjer je zaradi velikost blokov potrebno razstreljevanje.

Preglednica 2: Predlog kriterija razvrščanja podornih pojavov v razrede (CRP, 2004).

Table 2: Proposed rockfall classification.

pojav	Dimenzija največje odkladnine	
	(prostornina)	(premer, največja dimenzija)
Sproščanje zemljine (grušča in zemlje)	$< 100 \text{ cm}^3$	$< 6 \text{ cm}$
Odlom kamenja	$100 \text{ cm}^3 < 20 \text{ dm}^3$	6 cm do 3 dm
Odlom skalovja	$20 \text{ dm}^3 \text{ do } 2 \text{ m}^3$	3 dm do 2 m
Odlom blokov	$2 \text{ m}^3 \text{ do } 200 \text{ m}^3$	2m do 7 m
Skalni podor	$200 \text{ m}^3 \text{ do } 1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	$> 7 \text{ m}$
Gorski podor	$> 1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	

Neposredni vzrok nastanka podornega pojava je presežena mejna vrednost statične sile trenja znotraj kamnine. To se zgodi kot posledica več dejavnikov, ki postopoma povzročajo prehajanje kamnine iz stabilnega v labilno ravnotežje. Dokončna porušitev ravnotežja pa pomeni podorni pojav. Ti dejavniki so lahko stalni ali občasni. Stalni so preperevanje, erozija, vremenski pojavi, občasni pa so potres, vulkanska aktivnost in človeški vplivi. Učinek teh dejavnikov je odvisen od lastnosti pobočja, katero definirajo geologija, topografija, morfologija, pokrovnost in litologija. Sili, ki nasprotujeta dejavnikom proženja in ohranjata stabilnost, sta notranji kot trenja in kohezija.

2.2.3 Tokovi

Od čiste tekočine (0% sedimenta) pa do suhega sedimenta (100% sedimenta) obstaja zvezni spekter volumskih razmerij med tekočino in sedimentom. V tem območju so tri mejna območja, ki pa niso točno določena. Njihova vrednost je odvisna od porazdelitve velikosti zrn trdih delcev in njihove mineralne sestave oz. fizikalnih in kemičnih lastnosti. Te tri meje ločujejo v reološki klasifikaciji štiri tipe tokov zmesi sediment-voda: zrnasti, blatni, prekoncentrirani in normalni vodni tok (Skaberne, 2001).

Zrnasti tok se obnaša plastično, intersticije so zapolnjene z mešanico vode, zraka in finega materiala. Porni tlak je manjši od hidrostatičnega. V to skupino spadajo zemljinski tok, zrnski tok in podorni tok.

Blatni tok se obnaša plastično, a je sestavljen iz mešanice koherentnih sedimentov (in preperine) in vode. Brez kohezije bi bil to zrnski tok. Prevladujejo plastične Binghamove sile

(kohezijska strižna trdnost in viskoznost). Binghamov model opisuje gibanje viskozno-plastičnega materiala brez nastanka drsnih ploskev in prekoračitve notranjega trenja (Meunier, 1991 cit. po CRP, 2004).

Porni tlak je večji od hidrostatičnega. Z večanjem deleža vode se kohezija zmanjšuje in tako lahko tak plastični tok preide v tekočinskega. Pojavni obliki sta drobirski tok in soliflukcija, ki je ponavadi opredeljena kot zelo počasen tok z vodo nasičenih kohezivnih sedimentov, preperine ali drugega površinskega materiala (Skaberne, 2001), ali kot polzenje površinskih plasti tal (prsti) v povezavi s cikličnim taljenjem in zmrzovanjem (Lateltin, 1997 cit. po CRP, 2004).

Pri drobirskih tokovih gre za razmeroma veliko vsebnost vode, kar ima za posledico veliko hitrost in rušilno delovanje ter veliko transportno sposobnost. Območje odlaganja je 10 do 100 krat večje od območja proženja. Drobirski tok lahko erodira dno doline in njene boke. Odlaganje oz. razlitje toka se največkrat zgodi v obliki pahljačastega razlitja, ko se strma grapa, po kateri drvi, odpre v bolj ravninski svet – hudourniški vršaj. V primeru, da se dolina razširi, se material odlaga tudi ob obeh robovih vodotoka, kjer lahko tudi z velikimi skalami tvori velike robne nasipe vzdolž vodotoka (Ribičič, 2002).

Prekoncentrirani vodni tokovi in turbiditni (kalni) tokovi so tekočinski tokovi z zelo različno koncentracijo trdnih sedimentnih delcev v vodi. Nekateri nizko koncentrirani turbiditni tokovi imajo že lastnosti navadnih vodnih tokov. Glavni mehanizem ohranjanja zrn v toku je turbulenca.

Hitrost gibanja je pomemben dejavnik pri opredeljevanju vrste tokovnega pojava. Blatni in podorni tokovi razvijejo hitrosti od 1m/min pa do 2 m/s, drobirski tokovi pa celo preko 10m/s.

3 DROBIRSKI TOKOVI

3.1 Lastnosti in različne delitve drobirskih tokov

V tem delu naloge so opisane lastnosti in tisti podatki o drobirskih tokovih, ki so najbolj pomembni za razumevanje tega pojava in raziskave, izvedene v okviru te naloge.

Najprej je podana definicija, ki je bila izdelana oz. objavljena kmalu po katastrofalnem drobirskem toku, ki je močno poškodoval vas Log pod Mangartom, novembra 2000.

Definicija: Drobirski tok je gravitacijski (hiperkoncentrirani) tok mešanice zemljin, hribin (skal), vode in/ali zraka, ki je sprožen z nastankom plazju pri velikem vtoku vode (Ribičič, 2000/2001).

3.1.1 Drobirski tokovi v Sloveniji

V Sloveniji je zgodovinskih podatkov o drobirskih tokovih zelo malo. Hudourniške službe imajo podatke o t.i. hudourniških izbruhih na različnih območjih, vendar ti podatki niso analitično obdelani, niti ne razdeljeni na različne pojave, ki se pojavljajo na hudournikih (poplave, erozija, drobirski tokovi ipd.) Prav pomanjkanje teh podatkov in njihove obdelave je razlog, da je raziskovanje tega pojava v Sloveniji zelo oteženo in na nižji ravni kot v sosednjih državah, kjer je raziskovalna dejavnost na tem področju zelo razvita.

Večja pozornost temu pojavu je bila posvečena po katastrofalnem drobirskem toku v Logu pod Mangartom leta 2000, ki je terjal 7 življenj in povzročil veliko gmotno škodo. Od takrat je bilo v Sloveniji izvedenih več raziskav in študij na temo drobirskih tokov. Bile so izvedene raziskave o geomehanskih lastnostih drobirskih tokov (Petkovšek, 2002; Majes et al., 2002), modeliranje gibanja tokov (Rajar et al., 2001; Mikoš et al., 2006; Hojnik, 2001, 2004; Fazarinc, 2002), ocenjevanje ogroženosti hudourniških vršajev (CRP, 2008) in raziskave o ocenjevanju magnitud drobirskih tokov (Sodnik, 2005). Pregled dosedanjih drobirskih tokov v Sloveniji je bil pripravljen leta 2002 (Fazarinc, 2002), kjer so naštetih naslednji dogodki:

- neurje na Kozjanskem leta 1989, ko se je zaradi intenzivnih padavin (200 mm v dveh urah) zgodilo veliko zdrsov in usadov od katerih so se nekateri preoblikovali v

drobirske tokove. Pretoki v hudournikih so za več kot 100% presegali veljavne teoretične 100-letne pretoke.

- Log pod Mangartom leta 2000, kjer se je zaradi velike količine padavin (480 mm v petih dneh) sprožil drobirski tok. Po dodatnih analizah (FGG, KSH) naj bi v 48 urah padlo 1638 mm padavin, kar je prav tako več kot 100-letni pojav. Primer v Logu je precej specifičen, saj je bil izrazito dvofazen. Najprej se je sprožil plaz, ki je zdrsil v strugo Mangartskega potoka. Po namakanju in dodatnem dežju pa se je v obliki drobirskega toka začel premikati do naselja Gornji Log, kjer je povzročil veliko škode.
- plaz Strug nad vasjo Koseč, kjer se je decembra 2001 sprožil hribinski podor, ki je dosegel strugo hudournika Brusnik. Omenjen material se ni aktiviral takoj, ampak so se ob vsakem obilnejšem deževju v letu 2002 prožili manjši drobirski tokovi, ki so ogrožali vas Koseč.

V obdobju od leta 2002 se je v Sloveniji sprožilo še nekaj drobirskih tokov:

- Čedca nad Jezerskim, kjer se je junija 2008 kamninski podor nad slapom preoblikoval v drobirski tok in potoval slab kilometer daleč. Na tem območju sicer ni poselitve, vendar so bili vseeno sprejeti in izvedeni določeni ukrepi.
- Ciprnik nad Tamarjem
- Lokavec, kjer se po sprožitvi plazu leta 2000, ob večjih deževjih prožijo manjši blatni tokovi
- Hrenovec nad Kropo, kjer se je med ujmo septembra 2007 pojavil drobirski tok. Površinska voda izpod Vodiške planine je povzročila površinsko erozijo in s tem zemeljski plaz, ki je končal v strugi Hrenovca. Tam se je preoblikoval in potoval v obliki drobirskega toka naprej po strugi, ter se na srečo ustavil v položnejšem delu struge na naseljem Kropa (Sodnik, 2007).

3.1.2 Faze drobirskega toka

Drobirski tok ima tri faze: proženje, gibanje in odlaganje.

Faza proženja:

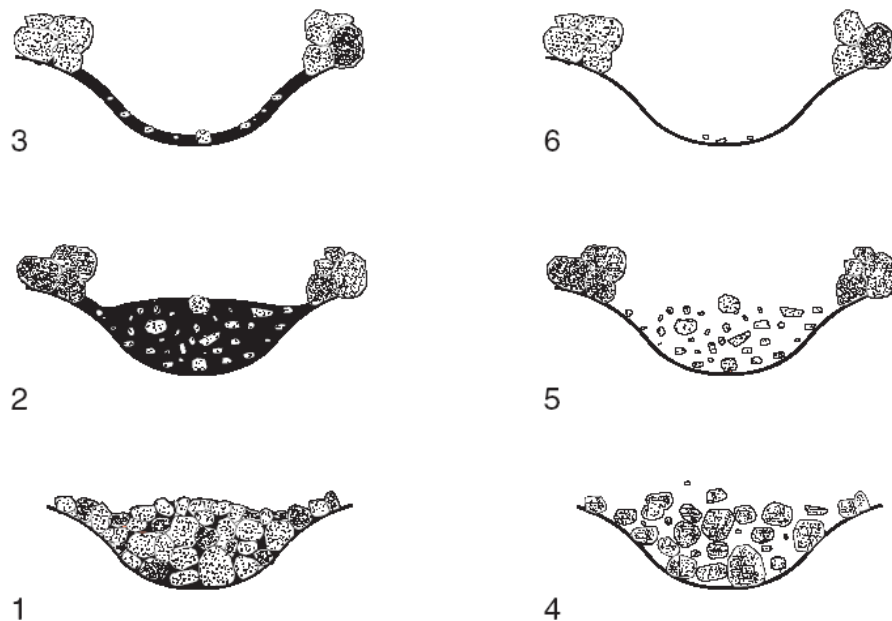
O proženju drobirskih tokov je napisano v poglavju 3.1.3, kjer so opisani vzroki za nastanek, in kako posamezen tip sprožitve vpliva na lastnosti toka. Izdelana je tudi razdelitev drobirskih tokov glede na nastanek.

Faza gibanja:

Drobirski tok lahko erodira dno in brežine ter premešča velike količine sedimentov. Pri drobirskih tokovih velikih dimenzij se dogaja, da erodirajo dno in naraščajo vzdolž poti. V strugi se lepo vidi erozijski rob med strugo in nedotaknjeno okolico. Na zunanjih krivinah se rob, ki nastane ob prehodu čela vala, poviša zaradi centrifugalne sile. Ta rob omogoča oceno in izmero pomembnih parametrov:

- a) geometrijske značilnosti in preoblikovanje struge, po kateri je tekel tok
- b) ocenitev hidroloških in hidravličnih značilnosti toka, kot so hitrost, maksimalna gladina toka, maksimalni pretok in tlak udarnega vala pri prehodu čela toka.

Čelo toka vsebuje malo vode in bi ga lahko imenovali kamniti tok. Za čelom teče mnogo bolj blaten tok materiala, katerega pretok počasi upada. Tu prihaja do značilnega valovanja ali pulziranja v pretoku s spremenljivo hitrostjo gibanja, gostoto toka in koncentracijo trdnih snovi v toku. Po prehodu čela vala se pretočni prerez bistveno zmanjša, lahko niha, a vztrajno pada. Na Japonskem se je v nekaterih primerih zgodilo, da je nekaj časa pred nastopom drobirskega toka gladina vode upadala, vodni tok pa je bil blaten z nekaj peska in proda. Tik pred prihodom drobirskega toka pa se je gladina dvignila, prav tako pa se je dvignila tudi vsebnost proda. Ko je prišlo čelo toka, se je nenadoma povečala vsebnost velikih kamnov in sama globina toka. Po prehodu čela pa je vsebnost velikih kamnov hitro upadla, prav tako pa tudi gladina (Mikoš, 2000/2001).



Slika 2: Shematski prikaz gibanja drobirskega toka po strugi v treh značilnih prečnih prerezih: (Mikoš, 2000/2001).

Fig 2: Schematic presentation of debris flow movement in three typical channel cross sections.

a) za blatni drobirski tok

1) grobozrnato (skalnato) čelo toka

2) slabo prebran material za čelom toka in obrobni narivi, ki jih je za seboj pustilo čelo toka

3) po prehodu čela toka je v sredini odložen drobnejši in na robovih grobejši material

b) za skalnati drobirski tok

4) grobozrnato (skalnato) čelo toka, kjer posamezne skale trkajo druga ob drugo

5) slabo prebran material za čelom toka med čistim grobozrnatim materialom na robovih, ki ga je za seboj pustilo čelo toka

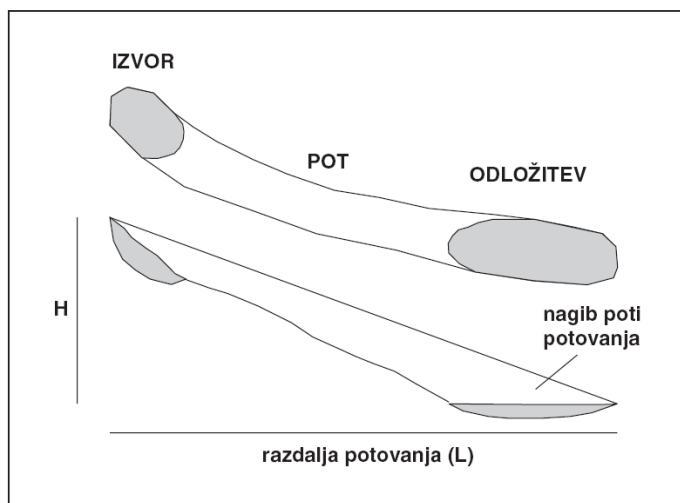
6) po prehodu čela toka je bolj grob material odložen le na robovih

Faza odlaganja:

Večina materiala se odloži v dolinskem delu, kjer se ustvari vršaj. Lahko pa se del mase odloži tudi v krivini ali manj strmih oziroma širših delih struge. Ko se tok iz strmejše struge prelije v položnejše dolinsko dno, se upočasni in odloži.

Glede na način gibanja tokove delimo na tokove v makroviskoznom režimu, prehodnem režimu in inertnem režimu. Način gibanja določata prostorninska vsebnost vode v mešanici sedimenta in vode in zrnastostna sestava sedimenta. Če je vode dovolj in je sediment drobozrnat, nastane viskozna gmota vode in sedimenta, v kateri viskozne sile prevladujejo nad vztrajnostnimi silami. Posamezna bolj groba zrna so obdana z viskozno tekočino, v kateri so v vodi pomešana drobna zrna drobirja. Kadar vode ni veliko in je sediment grobozrnat, se

zrna drobirja gibljejo pod vplivom težnosti tako, da se medsebojno drgnejo, trkajo in brusijo, zato pri gibanju prevladujejo vztrajnostne sile nad viskozni (Mikoš, 2000/2001).



Slika 3: Težka napovedljivost drobirskega toka je tudi posledica velike oddaljenosti od mesta izvora do mesta razlivanja (Ribičič, 2000/2001).

Fig. 3: Long distance between triggering and stopping point makes debris flows hard to predict.

3.1.3 Nastanek drobirskega toka – delitev glede na način proženja

Za nastanek drobirskih tokov je več vzrokov. Drobirski tokovi so lahko posledica pobočnih premikanj kot so plazovi, zdrsi ali drobirski plazovi. Največkrat jih povzroči močno dolgotrajnejše deževje (primeri drobirskih tokov v Sloveniji) ali pa je prisotno delovanje potresnih sil. Za proženje je velikokrat odločilno ali pa vsaj zelo pomembno delovanje človeka, ki s svojimi nepravilno načrtovanimi posegi v okolje, povzročajo erozijsko nestabilnost in s tem potencialna žarišča drobirskih tokov. Človeški posegi pogosto povzročijo porušitev krhkega naravnega ravnovesja in s tem nastanek zemeljskih plazov ali podorov, ki pa se lahko ob pravih pogojih spremenijo v drobirski tok. To so t.i. pobočni drobirski tokovi. Za take drobirske tokove je značilna velika količina sproščenega materiala v zelo kratkem času.

Poleg drobirskih tokov, ki nastanejo ob zemeljskih plazovih, podorih in podobnih procesih, lahko drobirski tokovi nastanejo tudi ob veliki erodibilnosti terena ali hudourniške struge. Takrat velika erodibilnost omogoči aktiviranje velike količine materiala in s tem nastanek velike količine drobirske mešanice, ki ob primernih pogojih pridobi velike hitrosti in je potencialno zelo nevarna. Drobirski tokovi, ki nastanejo z erozijo ob visokih pretokih

hudournikov, pa so t.i. hudourniški drobirski tokovi. Pri hudourniških drobirskih tokovih je značilno postopno sproščanje materiala, kar se pri velikih pretokih hudournikov odraža v delnem povečanju konic pretokov (odvisno od koncentracije materiala), ne prihaja pa do večkratnega povečanja pretoka vode, kot se to lahko dogaja pri pobočnih drobirskih tokovih. V primeru Loga pod Mangartom, kjer je bil dogodek res ekstremen, je bila razlika skoraj 80-kratna, saj je 100-letni pretok Predelice $77 \text{ m}^3/\text{s}$, maksimalni pretok drobirskega toka pa je bil skoraj $6000 \text{ m}^3/\text{s}$.

V tem delu je bila podana razdelitev drobirskih tokov na pobočne in hudourniške. Ta razdelitev bo v nadaljevanju naloge, pri poglavju o izdelavi kart nevarnosti, zelo pomembna.

Poleg obeh tipov nastanka drobirskih tokov, ki sta opisana zgoraj, je zelo pogosto proženje drobirskih tokov na vulkanskih območjih. Ti nastanejo med samim izbruhom vulkana ali po njem, zaradi obilnega dežja, hitrega taljenja snega ali ledenikov, hitrega odtoka kraterskih jezer ali nastanka piroklastičnih tokov. (Costa, 1984).

3.1.4 Delitev drobirskih tokov po velikosti

Preglednica 3: Razdelitev drobirskih tokov na razrede glede na velikost (Fell, 1994 cit. po Fazarinc, 2002).

Table 3: Debris flows classification according to magnitude.

Razvrstitev po razredih	Opis drobirskih tokov	Prostornina (m^3)
7	Izjemno veliki	$>5.000.000$
6	Zelo veliki	$1.000.000 - 5.000.000$
5	Srednje veliki	$250.000 - 1.000.000$
4	Srednji	$50.000 - 250.000$
3	Majhni	$5.000 - 50.000$
2-3	Zelo majhni	$500 - 5.000$
2	Izjemno majhni	< 500

3.1.5 Delitev drobirskih tokov po hitrosti

Hitrosti drobirskih tokov se gibljejo od 0,5 do 20 m/s. Razpon vrednosti je zelo velik, saj je veliko parametrov, ki vplivajo na hitrost gibanja toka. To so koncentracija delcev v vodi, zrnavost teh delcev, delež glin v drobirski zmesi in geometrija struge. Pri geometriji so

najbolj pomembni padec struge, velikost prečnega prereza in ukrivljenost (vijugavost) struge. Hitrosti se bistveno razlikujejo pri gibanju v strugi ali pri gibanju po vršaju.

Za razdelitev hitrosti masnih gibanj na razrede je bilo pripravljenih več predlogov. Za različna masna gibanja je bila pripravljena preglednica 4, kjer je razvidna razlika v hitrosti posameznih procesov in njihova primerjava.

Preglednica 4: Razdelitev drobirskih tokov v razrede glede na hitrost gibanja (Ribičič, 2000/2001).

Table 4: Debris flows classification according to transport speed.

KATEGORIJA	značilna hitrost	človeška reakcija	značilna vrsta plazenja
izjemno hiter	10 m/s	je ni	hribinski podor
zelo hiter	5 m/s	je ni	drobirski tok
hiter	3 m/minuto	evakuacija	usad
srednje hiter	1,8 m/uro	evakuacija	preperinski plaz
počasen	13 m/mesec	sanacija	drobirski plaz
zelo počasen	1,6 m/leto	sanacija	glinast plaz
izjemno počasen	16 mm/leto	je ni	globok plaz

Razdelitev po Varnes 1978 , Hugner 1981 in Cruden in Varnes 1994

Razdelitev hitrosti za drobirske tokove pa so pripravili tudi Varnes(1978) , Hugner (1981) in Cruden in Varnes (1994), ki so drobirske tokove razdelili v 7 razredov, Cruden in Varnes sta podala še značilnosti in stopnje ogroženosti posameznih razredov (povzeto po Fazarinc, 2002).

Preglednica 5: Razdelitev drobirskih tokov v hitrostne razrede (različni avtorji).

Table 5: Debris flow transport speed classes.

Varnes (1978)	Cruden in Varnes (1994)				Hunger (1981)
hitrost v	razred	opis	hitrost v	v (m/s)	v (m/s)
3 m/s	7	Skrajno hitro	5 m/s	5	1,1
0,3 m/min	6	Zelo hitro	3 m/min	5×10^{-2}	
1,5 m/dan	5	Hitro	43,2 m/dan	5×10^{-4}	
1,5 m/mesec	4	Umirjeno	13 m/mesec	5×10^{-6}	$3,5 \times 10^{-6}$
1,5 m/leto	3	Počasi	1,6 m/leto	5×10^{-8}	$3,5 \times 10^{-8}$
60 mm/leto	2	Zelo počasi	16 mm/leto	5×10^{-10}	
	1	Skrajno počasi			

Preglednica 6: Opis posledic drobirskih tokov različnih razredov.

Table 6: Consequences of different debris flows classes.

razred	opis
7	Katastrofa izjemnih razsežnosti. Porušitev zgradb. Smrtni primeri med prebivalstvom, možnost bega je majhna
6	Ogrožena so življenja ljudi. Hitrost je prevelika za evakuacijo.
5	Možnost evakuacije. Porušitev stavb, nepremičnin in vodov
4	Možno vzdrževanje začasnih objektov z manjšimi poškodbami.
3	Možna izvedba del za ojačitev in obnovo. Zgradbe so manj poškodovane
2	Zaradi pomikov so poškodovani le nekateri objekti
1	Gibanje ni zaznavno

3.1.6 Sestava drobirskega toka

Sestava drobirskega toka je zelo heterogena in se spreminja. Drobirski tok je dobro premešan večfazni tok drobirja (drobnih delcev, grušča in skal) in vode ali pa zraka. Velikost posameznih delcev se lahko spreminja od najbolj drobnega materiala do velikih skal in skalnih blokov. Drobirski tok lahko vsebuje tudi les oziroma ostanke dreves, ki jih je odnesel na svoji poti (Fazarinc, 2002).

Sestava toka se od primera do primera zelo razlikuje in je zelo pogojena z virom nastanka toka, z lastnostmi pobočja ali struge po kateri potuje, in s količino vode ali zraka, ki je prisoten. Od teh sestavin so odvisne tudi lastnosti, ki pogojujejo reološke lastnosti toka. Te bistveno vplivajo na gibanje samega toka, njegovo hitrost in globino, ki jih dosega. To pa pomeni, da vplivajo tudi na škodni potencial vsakega drobirskega toka, ki je odvisen od hitrosti, globin in njegovega dosega. Več o reoloških lastnostih, ki vplivajo na gibanje in posledično na modeliranje le-tega bo opisano v poglavju 6 o senzitivnostni analizi modela pri modeliranju drobirskih tokov.

3.2 Razlike med drobirskimi tokovi in drugimi masnimi gibanji

3.2.1 Razlika med drobirskim tokom in normalnim ali prekoncentriranim vodnim tokom

Prehodni značaj

Za drobirske tokove je značilna izrazita oblika občasnega, pulzirajočega toka. Valovi se pojavljajo na nekaj minut. Izrazit tak primer je bil blatni tok v soteski Jiangjia, ki je trajal 5 ur in imel 126 naraščajočih valov. Za take pojave se v literaturi pojavlja več razlag: hidravlična nestabilnost, deroči tok na strmih pobočjih in podobno. Take pulzacije so sicer možne tudi pri vodnem toku, vendar ob zelo specifičnih pogojih. Eden od takih je tok pri visokem Froudovem številu v gladkem in enakomernem kanalu. Pri drobirskih tokovih pa so take pulzacije pravilo. Tudi pri dogodkih v Sloveniji so bile zabeležene omenjene pulzacije toka (Fazarinc, 2002).

Število faz toka iz hidromehanskega vidika

Pri drobirskem toku je razlika med hitrostjo vode in trdnih delcev majhna, tako da se celotna masa zvezno deformira. Med tokom se mehanske lastnosti bistveno ne spreminjajo. Drobirski tok je opredeljen kot enofazni tok viskozne mešanice. Pri prekoncentriranem toku pa je hitrost delcev, ki se kotalijo in drsijo, bistveno manjša od hitrosti vode. Pri vodnih tokovih se večji trdni delci premikajo za krajše razdalje, pri drobirskem toku pa trdni delci prepotujejo celotno pot zmesi. Značilnost drobirskega toka je tudi premeščanje velikih skal, ki v najbolj ekstremnih primerih presegajo težo 3.000 ton (Takahashi, 1980).

Struktura pri odlaganju

Odložena zmes drobirskega toka vsebuje vse značilne deleže, od vode, blata, gline in velikih skal do skalnih blokov. Vzrok je velika gostota, viskoznost in mešanje med potovanjem drobirskega toka. Pri prekoncentriranih tokovih pa je slika drugačna, saj je gibanje delcev odvisno predvsem od kinetične energije vodnega toka. Pri upadanju hitrosti toka se zmanjšuje premestitvena zmogljivost in se začnejo odlagati bolj grobi delci. Pri nadaljevanju umirjanja toka pa se odložijo še drobnejši delci (Fazarinc, 2002).

Delež frakcije trdnih delcev

Pri prekoncentriranih vodnih tokovih je delež trdnih delcev od 1 do 25%, pri drobirskih tokovih pa je ta delež od 50 do 90% (Cousot, 1995 cit. po Fazarinc, 2002).

3.2.2 Razlika med drobirskim tokom in zemljinskimi plazovi in splazitvami

Hitrosti

Za drobirske tokove so značilne relativno velike hitrosti, ki dosežajo od 0,5 m/s do 20 m/s. Razlika v hitrosti drobirskega toka in drobirskega plaza pa je relativno majhna. Pri drobirskem plazu vodo nadomešča zrak. Zemljinski plazovi pa so bistveno počasnejši in so njihove hitrosti nekaj m/leto ali celo manj.

Način gibanja

Zemljinski plazovi se premikajo po drsni ploskvi in se mešanica malo deformira. Pri drobirskem toku pa se vezi med delci med gibanjem trgajo in se formirajo nove, ki se zopet trgajo. Zmes drobirskega toka se zaradi velikih razdalj, ki jih prepotuje, zelo deformira.

Razlike pri odlaganju

Pri odlaganju drobirskega toka se pojavijo nekatere značilne morfološke oblike, kot so strma čela, stranski narivi in stranski tokovi, vmesne začasne ustavitve ter erozijske poglobitve strug. Praviloma so stranska območja, kjer se je odložil drobirski tok, plitvejša od tistih na sredini. Pri plazovih pa imajo narivi bistveno večjo višino. (Fazarinc, 2002)

4 MATEMATIČNI MODEL FLO-2D

4.1 Splošno o modeliranju drobirskih tokov

Namen modeliranja drobirskih tokov je boljše razumevanje pojava in uporaba tega znanja za zaščito nepremičnin in človeških življenj. Večina primerov modeliranja, vsaj v Sloveniji, je bila izvedena za pojasnjevanje dogodka v preteklosti in za napovedovanje posledic morebitne ponovitve dogodka. Sicer drobirski tokovi veljajo za zelo enkratni dogodek, ki navadno ni periodičen kot npr. poplave. Prav ta enkratnost oz. redkost pojava še bolj zmanjšuje možnosti, da bi imeli v Sloveniji izdelan arhiv s popisom takih dogodkov.

Pri modeliranju je zelo pomembno umerjanje modela, oz. občutljivostna analiza vpliva posameznih parametrov, saj nekateri parametri močno vplivajo na potek računa in na rezultate modela. Umerjanje modela je možno pri primerih, ki pojasnjujejo določen dogodek, ki se je že zgodil in so vidne posledice oz. obrisi gladin toka. Takrat je možno model umeriti na izmerjene vrednosti, s čimer je zagotovljena določena natančnost rezultatov.

Če pa modeliramo potencialne drobirske tokove, ki se še niso sprožili in nam bodo rezultati modela služili za napovedovanje posledic dogodka ali za kartiranje nevarnosti, kar bo opisano v nadaljevanju, pa je umerjanje modela težje oz. nemogoče. V takih primerih je potrebna obširna analiza modela in vpliva posameznih parametrov, s čimer se določijo meje, znotraj katerih se lahko gibljejo posamezni vhodni parametri, s tem pa se določi tudi meje rezultatov.

V praksi se uporabljajo različni eno- in dvodimenzijski matematični modeli, ki opisujejo gibanje drobirskih tokov in s pomočjo katerih poskušamo določiti območja nevarnosti. Kljub razširjeni uporabi je treba take modele uporabljati zelo previdno in samo ob sočasnem upoštevanju zanesljivih terenskih podatkov, laboratorijskih raziskav erozijskega drobirja in predvsem ob sočasnem sodelovanju izkušenih strokovnjakov, ki poznajo lokalne razmere. Ti dvodimenzijski modeli so razviti za modeliranje dvofaznih mešanic vode in sedimenta, v naravi pa predstavljajo pomemben delež drobirskih tokov organske snovi. To so predvsem drevesa, grmovje in druga podrast ter humus. Tako je potrebno govoriti o trifazni mešanici. In

prav drevesa lahko bistveno vplivajo na dinamiko toka, saj lahko povzročajočasne zaježitve, česar pa dvofazni model ne upošteva (Mikoš, 2000/2001).

Dvofazni tok pomeni, da nastopata dve snovi: voda in drobir. Hiperkoncentriran tok pomeni, da suhemu pesku toliko časa dodajamo vodo, ki v kratkem časovnem obdobju nekaj sekund preide iz mirujočega stanja v gibajoče, kjer se obnaša kot tekočina. Problem fizičnih hidravličnih modelov pa je, da v veliki meri odstopajo od realnih razmer v naravi (Ribičič, 2000/2001).

4.2 Opis modela Flo-2d (povzeto po O'Brien, 2006)

Flo-2d je dvodimenzijski model, namenjen modeliranju gibanja vode in masnih tokov, med katere sodijo tudi drobirski tokovi. Razvit je bil za modeliranje dogodkov z daljšo povratno dobo. V osnovi je to »volume conservation model«, ki vodo ali masni tok premika po računski mreži, ki jo definira uporabnik in z njo zajame geometrijo terena, struge, objektov in ostalih geometrijskih parametrov terena. Račun gibanja tekočine poteka v dveh dimenzijah z integracijo osnovnih enačb in z ohranjanjem prostornine tekočine.

Osnovni enačbi modela sta:

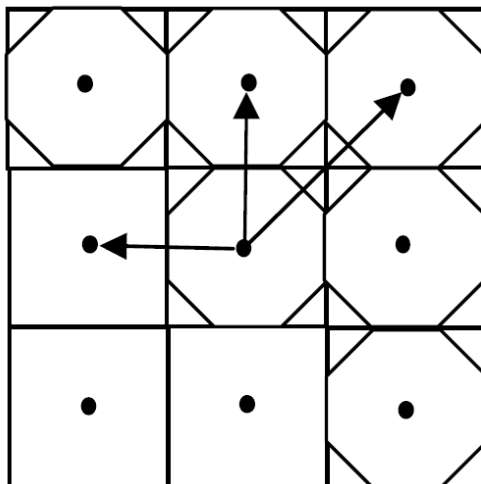
kontinuitetna enačba:
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hV_x}{\partial x} + \frac{\partial hV_y}{\partial y} = i \quad (1)$$

dinamična enačba:
$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \quad (2)$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_y}{\partial t} \quad (3)$$

pri čemer je h globina toka tekočine, V_x in V_y globinsko povprečni komponenti hitrosti v x in y smeri. S_{fx} in S_{fy} sta padca energijske črte v x in y smeri, odvisna od Manningovega koeficienta hrapavosti, S_{ox} in S_{oy} sta naklona terena v x in y smeri, i pa intenziteta dežja [m/s]. V enačbah nastopata še gradient tlaka in členi lokalnih pospeškov.

Dinamična enačba je iz vrednotena tako, da je izračunana povprečna hitrost toka v računski celici za vsako smer posebej. Hitrosti se računajo v osmih smereh (sever, jug, vzhod, zahod in vmesne smeri severovzhod, severozahod, jugozahod in jugovzhod). Hitrost je v vsaki smeri izračunana kot enodimenzionalna in to neodvisno od ostalih hitrosti. Tak potek izračuna je imenovan tudi kvazidvodimenzijska metoda. Stabilnost te eksplicitne sheme je zagotovljena s kriterijem kontrole velikosti posameznega časovnega koraka v računu.



Slika 4: Grafični prikaz računa smeri toka v posamezni računski celici (O'Brien, 2006).
Fig. 4: Concept octagon for the boundary widths and flow lengths.

Za reševanje enačb program uporablja eksplicitno shemo končnih razlik. Za opis geometrije območja pa se uporablja mrežo poljubno velikih kvadratnih računskih celic. Program je sestavljen iz večih uporabniških vmesnikov, od katerih je vsak namenjen določenemu delu modeliranja. V nadaljevanju so naštet in kratko opisani tisti, ki so bili uporabljeni pri modeliranju v tej nalogi in zadoščajo za izdelavo modela drobirskega toka na hudourniških vršajih.

GUI – » Graphical User Interface«

GUI je glavna komponenta modela, kjer se obdeluje vse vhodne datoteke. Gui formira datoteke v ASCII obliki, kakršne uporablja program Flo-2D. Iz tega vmesnika je možno obdelovati vse vhodne datoteke in tudi poganjati simulacije. Ta vmesnik je sestavljen pretežno tabelarično, kar omogoča vnos vseh potrebnih podatkov.

GDS – »Grid developer system«

GDS je glavni vmesnik za pripravo geometrije modela. V tem delu se obdelata vhodne DMV podatke, ki jih program uporablja kot eno od možnosti vnosa geometrijskih podatkov modela. V tem delu se formira računsko mrežo poljubnih dimenzij in se za vsako celico interpolira višina. GDS avtomatsko pripravi vse potrebne vhodne datoteke za simulacijo. V GDS se oblikuje celotna geometrija modela. V tem delu se določa koeficiente n_g , objekte, dolvodne robne pogoje in pozicijo vhodnega hidrograma. Za modeliranje vode omogoča tudi vnos vhodnega hidrograma. Za modeliranje drobirskih tokov pa je potrebno hidrogram dodatno obdelati v vmesniku GUI, kjer se vnese koncentracija C_v in reološke karakteristike mešanice.

MAPPER

Mapper je komponenta, namenjena pregledovanju in interpretaciji rezultatov, kjer program omogoča grafični vpogled v rezultate izračuna. Omogoča prikaz rezultatov modela na podlagi ortofoto posnetka DOF. Možnih je več kombinacij prikaza izračunih globlin in hitrosti toka. Več o možnostih prikaza rezultatov bo opisano v poglavju 6, kjer je opisano modeliranje, izvedeno v tej nalogi in so predstavljeni tudi rezultati.

4.3 Delovanje modela Flo-2D (povzeto po O'Brien, 2006)

Za reševanje diferencialnih enačb program uporablja eksplicitno shemo končnih razlik. Algoritem računa je tak, da izračuna hitrosti za vsako računsko celico posebej. Dinamična enačba je rešena za vsako računsko polje posebej. Taka numerična shema je relativno enostavna, ponavadi pa zahteva veliko časa, saj je časovni korak pogojen s kriterijem numerične stabilnosti. To pomeni, da je računski čas modela v primerih bolj zapletenih modelov relativno dolg.

Algoritem računanja modela je povzet v naslednjih korakih (O'Brien, 2006):

- izračun povprečne geometrije toka, hrapavosti in padca med dvema sosednjima računskima celicama

- na podlagi prejšnjega izračuna je ocenjena globina toka d za naslednji izračun hitrosti v določeni računski celici. Ocena je izvedena na podlagi povprečne globine med dvema elementoma:

$$d_x^{i+1} = d_x^i + d_{x+1}^i \quad (4)$$

- iz preoblikovane dinamične enačbe (ang. diffusive wave equation), v kateri je edina neznanka hitrost, je izračunana prva ocena hitrosti. To velja za primer računa toka po površini (ang. overland flow), strugi (ang. channel flow) ali po ulici (ang. street flow).
- ocenjena hitrost je uporabljena za rešitev polne dinamične (ang. full dynamic wave equation) in kontinuitentne enačbe in s tem za izračun prave hitrosti toka. Pri modeliranju hiperkoncentriranega toka ali drobirskega toka so v tem računskem koraku upoštevani tudi členi enačbe, ki zajemajo vpliv viskoznosti in strižne trdnosti mešanice.
- izračun pretoka Q na meji računskega območja z pomnožitvijo hitrosti in površine toka v določenem prečnem prerezu. Pri računu toka po površini (ang. overland flow), je širina prilagojena upoštevanju redukcijskih faktorjev širine (ang. width reduction factors), ki jih lahko definira uporabnik.
- seštevanje prirastka pretoka za posamezno celico v določenem časovnem koraku v vseh osmih smereh izračuna:

$$\Delta Q_x^{i+1} = Q_n + Q_e + Q_s + Q_w + Q_{ne} + Q_{se} + Q_{sw} + Q_{mw} \quad (5)$$

nato je ta seštevek razporejen po površini celice in s tem določitev spremembe globine toka:

$$\Delta d_x^{i+1} = \Delta Q_x^{i+1} * \Delta t / \text{površinacelice} \quad (6)$$

Pri čemer je Δt časovni korak med časoma i in $i+1$.

- pred izračunom globine v naslednji računski celici je preverjen kriterij numerične stabilnosti (ang. numerical stability criteria). Če je kateri od kriterijev presežen, se časovni korak zmanjša in izvede se ponovni izračun vseh hitrosti.

- simulacija poteka in časovni korak se povečujeta, dokler ni presežen eden od stabilnostnih kriterijev.

4.4 Modeliranje drobirskih tokov z modelom FLO-2D

Drobirski tokovi so nehomogene in nenewtonske tekočine. Gibanje drobirskih tokov je odvisno od reoloških lastnosti mešanice, geometrije terena oz. vršaja, naklona oz. padca terena in hrapavosti površine obravnavanega terena.

Mešanica je sestavljena iz vode in drobirja različnih frakcij. Količina oz. koncentracija materiala določa specifično težo, strižno odpornost in viskoznost mešanice. Koncentracija materiala v mešanici je izražena z volumsko koncentracijo C_v , ki je izražena kot:

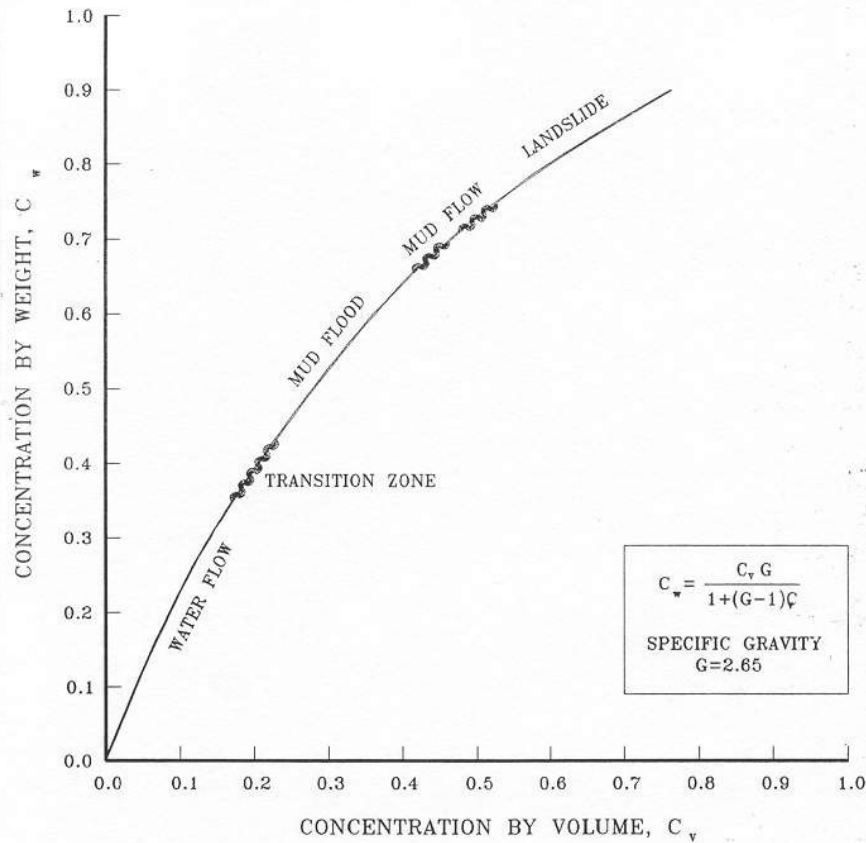
$$C_v = \text{prostornina drobirja} / \text{prostornina mešanice} \quad (7)$$

V povezavi s koncentracijo po teži C_w pa je volumska koncentracija definirana s sledečim izrazom:

$$C_v = C_w \gamma / \{ \gamma_s - C_w (\gamma_s - \gamma) \} \quad (8)$$

pri čemer je γ specifična teža vode, γ_s pa specifična teža sedimenta oz. drobirja

Koncentracija C_v je pomembna pri nadaljnji obravnavi gibanja drobirskih tokov, saj s tem podatkom, na podlagi podatka o količini vode, določamo tudi skupno magnitudo drobirskega toka. Prav tako je od koncentracije C_v odvisen sam tip dogodka.



Slika 5: Prikaz različnih tipov masnih gibanj v odvisnosti od koncentracije materiala v vodi (O'Brien, 2006).
Fig. 5: Classification of hyperconcentrated sediment flows.

Pri simuliranju drobirskih tokov je zelo važen člen S_f (oz. člena S_{fx} in S_{fy} v enačbah 2 in 3), v katerem so izražene vse izgube energije (na enoto dolžine). V modelu Flo-2D je uporabljena formulacija O'Briena (O'Brien et.al, 1993):

$$S_f = \frac{\tau}{\gamma_M * h} + \frac{K * v * \eta}{8 * \gamma_M * h^2} + \frac{(n_g * v)^2}{R^3} \quad (9)$$

Kjer oznake pomenijo: h – globina toka, v – hitrost toka, K – koeficient laminarnega odpora, η – viskoznost mešanice, τ – strižna trdnost mešanice in n_g – Manningov koeficient hrapavosti.

Poleg volumske koncentracije C_v so torej za model drobirskega toka potrebni še naslednji podatki:

- koeficient laminarnega odpora K
- specifična teža drobirja γ_s
- podatki o strižni trdnosti τ
- podatki o viskoznosti η

Koeficient laminarnega odpora K [-]:

Ta koeficient odraža hrapavost površine, kjer potuje tok. Ta vrednost je pomembna za območja oz. faze, ko je tok laminaren ali prehoden. Pri strogo turbulentnih tokovih je ta faktor manj odločilen. Vrednost koeficienta K se giblje od 24 za gladka pravilna korita pa vse do 50.000 pri bolj hrapavih in geometrijsko bolj zapletenih primerih. Za modeliranje drobirskih tokov je bila umerjena vrednost 2285 (O'Brien, 2006). V preglednici 7 so prikazane vrednosti za različne površine:

Preglednica 7: Vrednosti koeficienta K za različne površine (O'Brien, 2006).

Table 7: Resistance parameters for laminar flow.

Tip površine	Vrednost K
Beton /asfalt	24 -108
Pesek	30 - 120
Pobočja v naklonu	90 - 400
Glina	100 - 500
Redka vegetacija	1.000 – 4.000
Travniki	3.000 – 10.000
»Bluegrass« okrasna zelenica	7.000 – 50.000

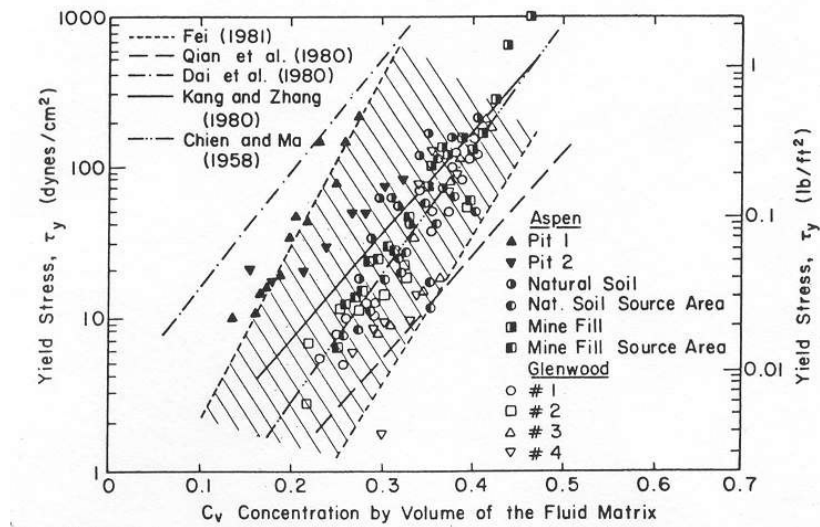
Specifična teža materiala γ_s [N/m^3]:

Ta podatek je pomemben za določanje specifične teže mešanice, ki je odvisna od specifične teže materiala in koncentracije le-tega. Od specifične teže mešanice so zelo odvisne lastnosti, ki jih ima mešanica pri gibanju po pobočju.

Podatki o strižni trdnosti τ [$dyness/cm^2$]:

Pri tem parametru gre za podatek, ki je odvisen od volumske koncentracije materiala v mešanici. Podati je potrebno dva koeficienta in sicer α in β . Strižna trdnost se izračuna po naslednji enačbi:

$$\tau = \alpha * e^{\beta C_v} \text{ [dyness/cm}^2\text{]} \quad (10)$$

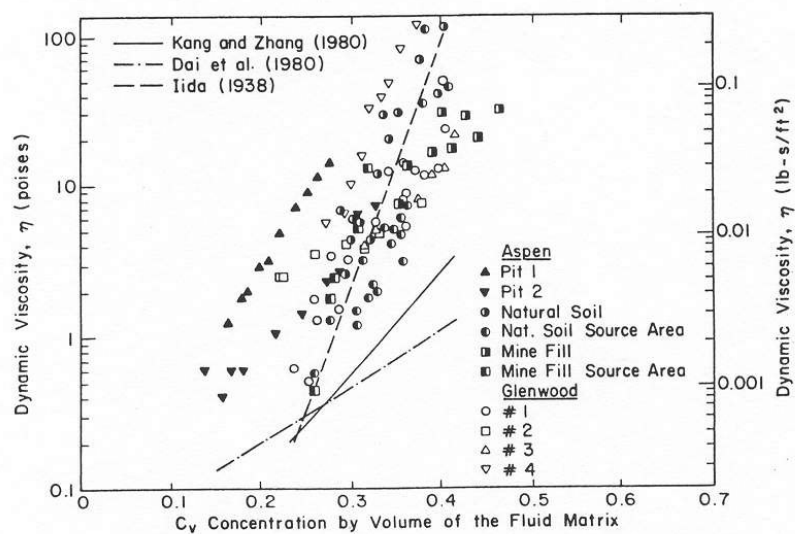


Slika 6: Strižna trdnost mešanice v odvisnosti od C_v (O'Brien, 2006).
Fig.6: Yield Stress versus volumetric concentration.

Podatki o viskoznosti η [poisses]:

Tudi viskoznost mešanice je odvisna od volumske koncentracije C_v materiala v mešanici. Prav tako je potrebno podati dva koeficienta α in β . Model izračuna trenutno viskoznost po naslednji enačbi:

$$\eta = \alpha * e^{\beta C_v} \text{ [poisses]} \quad (11)$$



Slika 7: Viskoznost v odvisnosti od C_v (O'Brien, 2006).
Fig.7 Dynamic viscosity versus volumetric concentration.

Avtor programa za koeficienta α in β , ki določata viskoznost in strižno odpornost mešanice v literaturi (O'Brien, 2006) podaja preglednico 8, v kateri so umerjene vrednosti teh koeficientov za različne primere drobirskih tokov po svetu.

Preglednica 8: Podatki o koeficientih α in β za različne primere drobirskih tokov (O'Brien, 2006).

Table 8: Yield stress and viscosity as a function of sediment concentration.

Source	$\tau_y = \alpha e^{\beta C_v}$		$\eta = \alpha e^{\beta C_v}$	
	α	β	α	β
Field Data				
Aspen Pit 1	0.181	25.7	0.0360	22.1
Aspen Pit 2	2.72	10.4	0.0538	14.5
Aspen Natural Soil	0.152	18.7	0.00136	28.4
Aspen Mine Fill	0.0473	21.1	0.128	12.0
Aspen Watershed	0.0383	19.6	0.000495	27.1
Aspen Mine Source Area	0.291	14.3	0.000201	33.1
Glenwood 1	0.0345	20.1	0.00283	23.0
Glenwood 2	0.0765	16.9	0.0648	6.20
Glenwood 3	0.000707	29.8	0.00632	19.9
Glenwood 4	0.00172	29.5	0.000602	33.1

4.5 Izdelava modela drobirskega toka v programu FLO-2D

V nadaljevanju je na kratko opisan postopek izdelave modela drobirskega toka, ki smo ga uporabili v raziskavi.

4.5.1 Geometrija

Program omogoča izdelavo novega modela na podlagi več tipov geometrije: DMV podatki o terenu, ASCII grid file ali Shapefile. Glede na to, da je bila v tej nalogi uporabljena varianta s podatki o terenu DMV (digitalni model višin), je podrobneje opisana ta možnost.

DMV je digitalni model reliefa (ang. DEM ali DTM), kjer so točke višin posnete z določeno resolucijo. V Sloveniji (Geodetska uprava RS) so na voljo DMV25, DMV12,5 in DMV5, kjer so točke posnete z resolucijo 25, 12,5 in 5m. V tej nalogi je bil uporabljen DMV5, ki je najnatančnejši od modelov, ki so na javno na voljo na GURS-u. Omenjeni podatki v datoteki DMV so bili zapisani v *.pts obliki. Zaradi možnosti napak pri posnetkih je smiselno te posnetke pregledati v za to namenjenih programskih orodjih. Netočnosti v geometriji lahko

povzročijo nestabilnost modela in s tem zelo podaljšajo čas računanja ali pa povzročijo napačne rezultate.

Ko so točke višin iz DMV vnešene v program, je potrebno pripraviti računsko mrežo poljubnih dimenzij. Več o izbiri velikosti mreže je napisano v poglavju 6 o občutljivostni analizi modela. Mrežo je treba višinsko interpolirati, kar pomeni, da je potrebno posameznim poljem v računski mreži določiti višino, saj model za račun upošteva samo višine v računski mreži. Pogoje interpolacije se določi v nastavitvah programa. Pri postopku interpolacije se določi, v kakšnem radiju okrog računske celice naj program upošteva višinske točke iz podatkov DMV in jih upošteva za izračun višine obravnavane računske celice. Poleg tega se lahko določi tudi filtriranje višin, s čimer lahko uporabnik omeji višinske razlike med posameznimi računskimi celicami. Možnost filtriranja višin pri naših modelih ni bila uporabljena. S tem postopkom dobi vsaka računska celica svojo nadmorsko višino, ki je usklajena tudi z višinami sosednjih celic – pogoj za stabilnost računa.

4.5.2 Določitev računskega območja

Ker je čas računanja zelo odvisen od skupnega števila računskih celic, je potrebno izbrati optimalno velikost računskega območja. Potrebno je podrobno obdelati geometrijo posameznega modela in določiti računsko območje, ki zavzema celotno področje gibanja masnega toka, medtem ko ne sme biti preveliko, saj to po nepotrebnem podaljšuje čas računanja. Najbolj smiseln je sledeč postopek. Najprej se pri večjih računskih celicah izbere večje računsko območje, kjer lahko s hitrim računom dobimo okvirno področje, kjer se giblje voda ali masni tok. Nato se računsko območje postopno zmanjšuje in mreža gosti, s čimer dobimo na območju, kjer se giblje voda ali masni tok, natančen račun, ki omogoča pridobitev rezultatov, uporabnih za nadaljnjo obdelavo oz. uporabo.



Slika 8: Primer računskega območja na vršaju Koroške Bele (mreža 5m x 5m).
Fig.8: Computational grid area sample on Koroška Bela fan (grid 5 m x 5 m).

4.5.3 Vnos vhodnega hidrograma in spodnjega robnega pogoja

Ko je pripravljena geometrija modela, je potrebno vnesti vhodne podatke o pretokih toka. V našem primeru je bil to hidrogram $Q(t)$ na zgornjem robu modela. Način pridobitve hidrograma za obravnavane hudournike je opisan v poglavju hidrologija. Hidrogram, pridobljen iz programa HEC-HMS je bilo potrebno najprej diskretizirati, saj model Flo-2D zahteva podatke v diskretni obliki. Določitev pozicije hidrograma na računskem območju in vnos korakov $Q(t)$ omogoča vmesnik GDS. Če pa namesto vode modeliramo drobirske tokove, je potrebno dodatne parametre hidrograma vnesti v vmesniku GUI.

Pri vnosu dodatnih podatkov hidrograma v GUI-ju je potrebno vnesti koncentracije C_v v posameznih časovnih korakih hidrograma. Na podlagi koncentracije model izračuna reološke značilnosti mešanice (način izračuna je bil opisan v poglavju o modeliranju drobirskih tokov z modelom Flo-2D), ki jih nato uporabi pri modeliranju gibanja.

Poleg hidrograma je potrebno v model vnesti tudi spodnje robne pogoje. Model omogoča več tipov, avtor programa za modeliranje površinskega toka (ang. overland flow) predlaga robni pogoj »normalne gladine«, ki je bil uporabljen tudi v tej nalogi. V GDS-ju je potrebno v spodnjem delu vršaja na robu računskega območja določiti verigo računskih celic in jih določiti za spodnji robni pogoj. S temi celicami je potrebno zajeti celoten rob računskega območja, kjer je možno, da se tok razliva izven računskega območja.

4.5.4 Vnos reoloških podatkov

Pri modeliranju drobirskih tokov so reološki podatki pomembni. Potrebno je definirati strižno trdnost in viskoznost mešanice, ki močno vplivata na gibanje masnega toka. Model reološke lastnosti izračuna v odvisnosti od volumske koncentracije C_v , podane v vstopnem hidrogramu (način izračuna je bil podan v poglavju o modeliranju drobirskih tokov z modelom Flo-2D).

4.5.5 Nastavitve kontrolnih parametrov izračuna

Pri nastavitvah kontrolnih parametrov je pomembno izbrati čim bolj optimalne nastavitve, saj lahko z izbiro napačnih povzročimo nestabilnost računa ali nenatančnost, po drugi strani pa lahko po nepotrebnem podaljšujemo čase računanja. Pri modelu se nastavljajo naslednji parametri:

V datoteki *cont.dat*:

- n-value adjustment: spreminjanje faktorja n z globino toka
- Flowdepth for Depth duration Analysis: nastavev za beleženje časa trajanja poplav
- Bulking Concentration: za približno modeliranje vpliva sedimentov v vodi
- Area reduction factor: zmanjševanje površine posameznih računskih elementov (za modeliranje intenzivne vegetacije ali geometrijskih nepravilnosti)
- Floodplain Limiting Froude Nr: omejevanje Froudeovega števila
- Shallow flow n-value: vrednost faktorja n za plitve tokove

V datoteki *toler.dat*:

- Surface detention: najmanjša globina, ki jo model še modelira
- Percent Change in Flow depth: nastavitve za tolerance sprememb v globini sosednjih polj
- Dynamic Wave Stability Coefficient: nastavev koeficienta stabilnosti računa

4.6 Prikaz rezultatov modela Flo-2D

Za pregledovanje in prikaz rezultatov je namenjen vmesnik Mapper. V tem vmesniku program Flo-2D omogoča različne kombinacije predstavitve rezultatov. Rezultati izračuna, ki so ponavadi pomembni, so:

- maksimalne globine toka
- maksimalne hitrosti toka
- vektorji hitrosti toka v posameznih celicah
- prerezi terena in gladin

Mapper omogoča prikaz teh rezultatov na podlagi DOF (digitalni ortofoto), kar je v veliko pomoč pri interpretaciji rezultatov. Poleg tega omogoča pregled izračunanih gladin v poljubnih prerezih, ki jih določa uporabnik. Pri prikazu prerezov terena in gladin je pri večjih globinah težava z merili, saj program težko sam najde pravilno merilo, kjer bi bile lepo razvidne globine toka v posameznih točkah prereza. Ker pa program Mapper omogoča izvoz podatkov prečnega prereza v *.txt obliki, je možno omenjeno datoteko obdelati s programom MS Excel, kjer pa se lahko pri izrisu grafikona nastavi poljubno merilo in enote in je zato prikaz bolj pregleden. Več o omejitvah in težavah pri prikazu rezultatov modela bo napisano v poglavju o občutljivostni analizi modela (poglavje 6.3), kjer bodo prikazani tudi rezultati modelov s komentarji.

4.7 Izkušnje z modeliranjem drobirskih tokov v Sloveniji

V Sloveniji je bilo matematično modeliranje večinoma uporabljeno za analiziranje dogodkov, ki so se zgodili v preteklosti in za napovedovanje posledic ponovne sprožitve drobirskega toka na obravnavanem hudourniku.

4.7.1 Log pod Mangartom (Rajar et al., 2001; Hojnik et al., 2001)

V Logu pod Mangartom je šlo za kombinacijo več modelov (FGG-ULJ in VGB Maribor). Najprej je bil za zgornji del uporabljen 1D model PLAZ1D, katerega rezultat – hidrogram je bil uporabljen kot vhodni podatek za modeliranje toka v spodnjem delu, kjer pa sta bila uporabljena dva modela, in sicer PCFLOW2D, razvit na FGG in FLO-2D, ki je komercialni

program, uporabljen tudi v tej nalogi. Osnovni namen modeliranja je bilo predvidevanje posledic morebitne ponovne sprožitve in načrtovanje ukrepov za zavarovanje naselja Log pod Mangartom.

Plaz, ki je 15.11.2000 zdrsnil do mostu v Mlinču (glej sliko 4), ga delno prelil, večina mase pa se je ustavila, je bil razmeroma suh. Skupni plaz, ki je zdrsel iz struge Mangartskega potoka, pa je bil bistveno bolj moker, zato je z veliko hitrostjo in rušilno močjo nadaljeval pot po dolini. Zaradi raznolikosti terena in zelo različnih delov je bilo celotno območje razdeljeno na več odsekov. V nadaljevanju je podana karta območja, na kateri so označeni posamezni odseki.



Slika 9: Pregledna situacija področja in računskih odsekov (Rajar et al., 2001).
Fig. 9: Computational sections of research area.

Odsek A: od plazišča do mostu v Mlinču – model PLAZ1D

Odsek B: Od mostu v Mlinču do G. Loga – model PLAZ1D

Odsek C: skozi naselje G. Log – PCFLOW2D in FLO-2D

Odsek D: Od G. Loga do mostu v Možnici – modeli PLAZ1D in FLO-2D

4.7.1.1 Modeliranje z 1D modelom:

Model PLAZ1D je nastal na FGG z nadgradnjo modela za modeliranje porušitvenih valov pri pregradah. Najprej je bil predelan za modeliranje snežnih plazov, nato pa še za modeliranje zemeljskih plazov-drobirskih tokov.

Glavni parametri, potrebni za umerjanje modela, so:

- mejna strižna trdnost τ
- viskoznost η
- Manningov koeficient hrapavosti n_g

Za umerjanje modela so bile uporabljeni naslednji podatki:

- sledovi maksimalnih kot, ki jih je povzročil plaz vzdolž odseka A
- približna masa plazu po ustavljanju, lokacija ustavljanja in naklonski kot ustavljenega materiala
- masa sproženega skupnega plazu, ki je nadaljeval pot, sledovi na bregovih vzdolž odsekov B (kanjon Predelice), C in D in količine, ki so se odložile vzdolž posameznih odsekov.

Manningov koeficient je bil umerjen za vsak odsek posebej, nekje skoraj po profilih, saj ta parameter ne zajema samo hrapavosti površine, ampak tudi trke materiala in turbulenco. To pomeni, da je n_g pri drobirskem toku večji kot pri modeliranju vode.

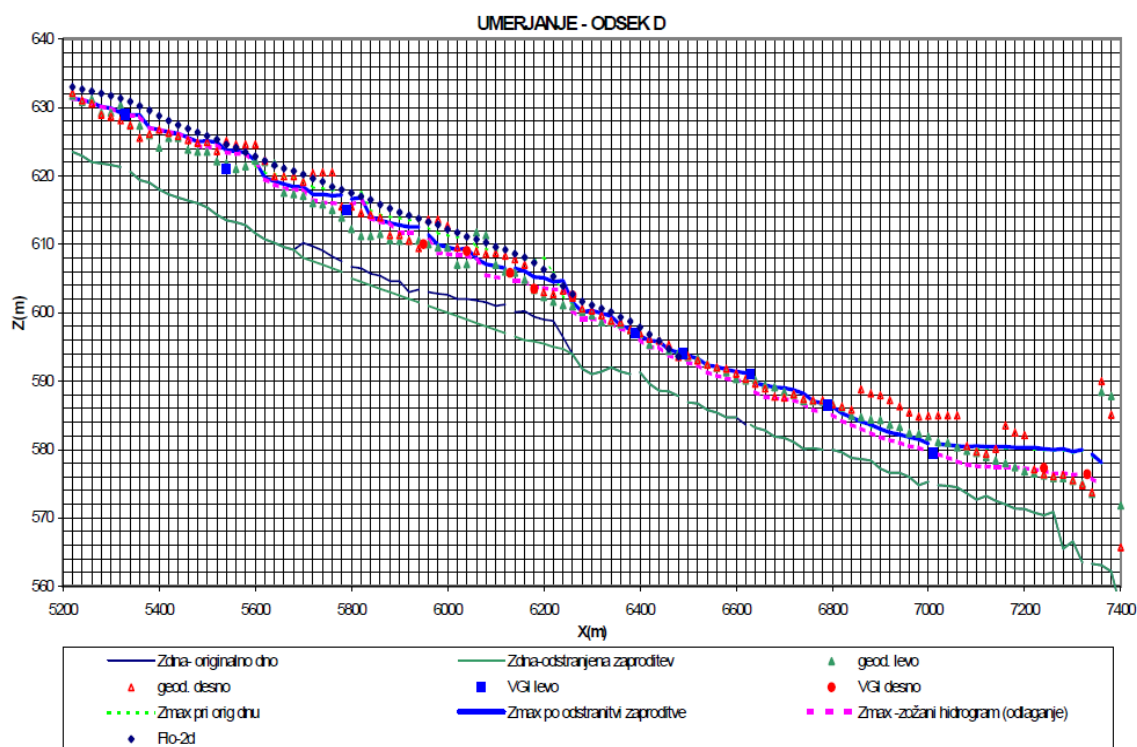
Strižna trdnost in viskoznost pa sta bili določeni na podlagi umerjanja modela z upoštevanjem vrednosti, dobljenih v geomehanskem laboratoriju. Obe vrednosti sta zelo odvisni od vsebnosti vode oz. koncentracije sedimenta in sta bili zato za zgornji »suhi« plaz in za spodnji »mokri« plaz zelo različni. Za »suhi« plaz je bila uporabljena volumska koncentracija $C_v = 0,5$, za »mokri« plaz pa $C_v = 0,42$.

Umerjanje je bilo izvedeno posebej za odsek A, kjer je bil modeliran »suhi« plaz in za odseka B in D, kjer je bil modeliran »mokri« plaz. Na odseku A je bilo umerjanje težje, ker ni bilo nobenih posnetkov plazu med 15. in 17. novembrom 2000. Model je pravilno pokazal končno

stanje odloženega plazu, kar je za tako zapleten pojav kot je drobirski tok izjemno dobro. Končni naklon 16% je bil dosežen s spreminjanjem strižne trdnosti.

Za umerjanje na odseku B je bilo na voljo več podatkov. Za umerjanje so bili na voljo geodetski posnetek, snemanja iz zraka in terestrično snemanje sledov drobirskega toka. Odsek B je bil za modeliranje zelo problematičen, saj je na tem delu soteska zelo ozka, naklon znaša na določenih odsekih tudi 45%, poleg tega pa so na tem delu tudi »skoki«, kjer tok pada v obliki slapu. Veliko teh nepravilnosti se je umerilo s pomočjo koeficienta n_g . Glede na vse te zahtevne okoliščine je bilo ujemanje modela z dejanskim tokom razmeroma dobro.

Za odsek D, ki je segal od vasi Log do mostu v Možnici, je značilno povečanje odlaganja materiala. Za ta odsek so značilne razširitve in zato odlaganje na območju Gornjega Loga in v strugi Koritnice. Nad mostom v Možnici se je odložilo cca 600.000 m³ materiala, kar pomeni 80% zmanjšanje poplavnega vala. Na odseku D je povprečna debelina odloženega materiala 5 m. Model ni omogočal modeliranja odlaganja materiala v polnem obsegu. Možno je bilo modelirati samo usedanje v repu vala, kar pa predstavlja samo majhen delež dejanskega usedanja. Na tem odseku je Manningov koeficient manjši, saj ni več lokalnih zožanj struge in skokov nivelete. A na tem odseku je bilo ujemanje modeliranih gladin z merjenimi zelo dobro. Določeno odstopanje je bilo povzročeno s poružitvijo stare avstrijske hudourniške pregrade, česar v model ni bilo možno zajeti. V tem delu se je za največjo pomanjkljivost modela izkazala nezmožnost modeliranja odlaganja materiala. Zgornji del odseka D je bil modeliran tudi z modelom Flo-2D.



Slika 10: Odsek D – primerjava merjenih sledov na bregovih in izračunanih maksimalnih gladin (Rajar et al., 2001).

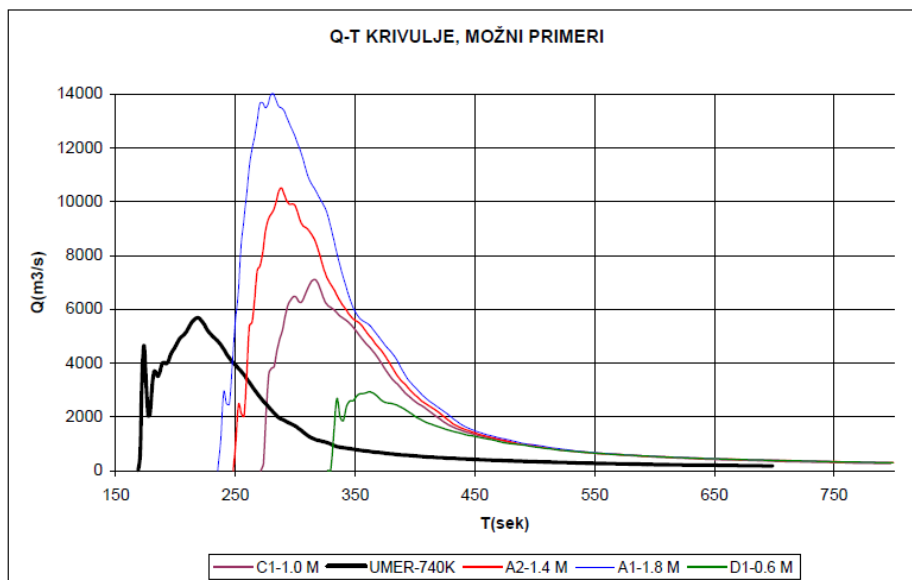
Fig. 10: Section D – comparison of computed and measured flow elevations.

Po umerjanju modela na pretekli dogodek je bilo potrebno predvideti nove potencialne scenarije, ki bi se lahko zgodili in ogrozili naselje Log pod Mangartom. Ti scenariji so bili pomembni za napoved morebitnih posledic in za načrtovanje ukrepov za zmanjševanje škodljivih posledic morebitne ponovitve drobirskega toka.

Najbolj težavna je bila določitev magnitude ponovnega drobirskega toka. V dogovoru z geologi in geomehaniki so bili določeni štiri scenariji: 2,0 mio m³, 1,6 mio m³, 1,2 mio m³ in 0,8 mio m³. Poleg teh scenarijev je bilo potrebno upoštevati še potencialen vpliv pregrade, ki je bila predvidena kot eden od ukrepov in bi zadržala do 600.000 m³. Na koncu je bilo dogovorjeno, da se naselje Log pod Mangartom štiti na ponovitev dogodka iz novembra 2000, torej na 1,2 mio m³.

Kot glavni rezultat 1D modela je bil hidrogram Q(t) na začetku Gornjega Loga, ki je služil za vhodni hidrogram modelov PCFLOW2D in Flo-2D, ki sta bila uporabljena na odseku C in D. Neposredna verifikacija hidrograma ni bila možna, pač pa se je pravilnost potrdila pri

rezultatih 2D modelov. Po presoji se je nadaljnje račune izvajalo za primer drobirskega toka z magnitudo 2 mio m³ in za ponovitev dogodka z magnitudo 1,2 mio m³. Oba od teh sta bila preračunana za primer s pregradami in za primer brez pregrad.



Slika 11 : Izračunani hidrogrami za različne scenarije (vhodni podatek za odseka C in D) (Rajar et al., 2001).
Fig. 11: Computed hydrographs for different scenarios.

Na odseku D je bil z 1D modelom preračunan scenarij brez odlaganja materiala, torej s polnim hidrogramom, ki je bil rezultat 2D modela na odseku C. Predpostavljane odlaganje bi bilo preveč tvegano in je zato račun s polnim hidrogramom zaradi višjih gladin na varni strani.

4.7.1.2 Modeliranje z 2D modelom:

Pri modeliranju na odsekih C in D sta bila uporabljena dva 2D modela in sicer PCFLOW2D in Flo-2D. Modela sta bila uporabljena vzporedno, v obeh pa je za modeliranje nenevtonske tekočine uporabljen t.i. model Julien-O'Brien. Da bi preprečili sistemske napake, sta bila modela umerjena ločeno. Modela sicer uporabljata različni numerični metodi.

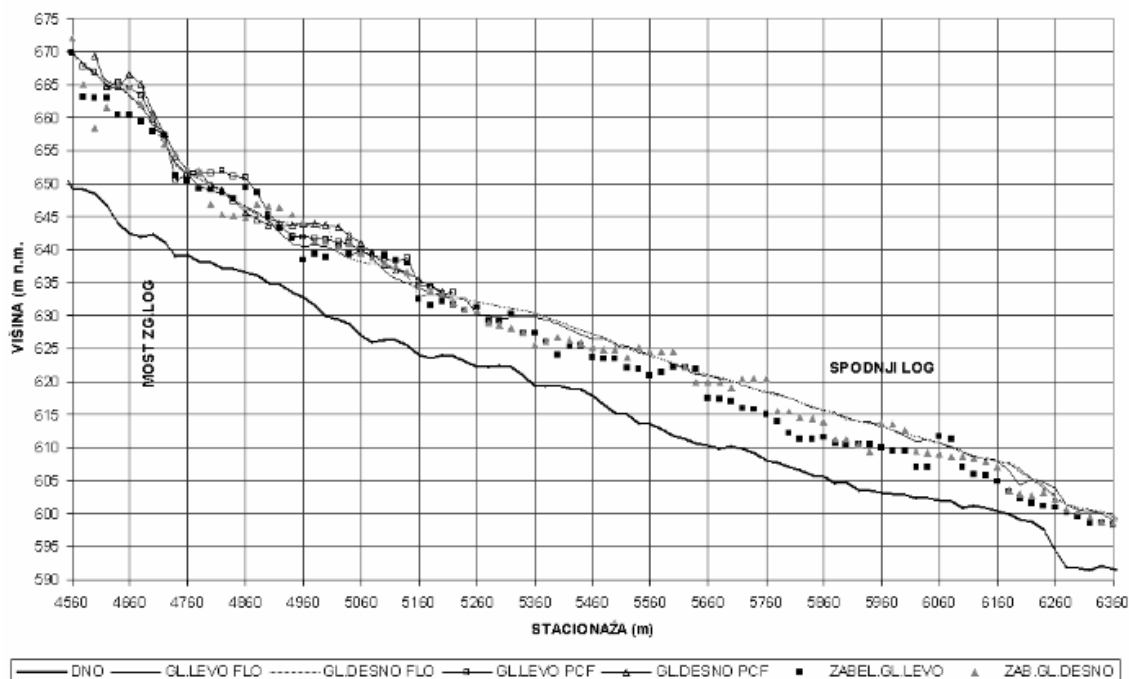
Za geometrijski opis topografije terena sta bili uporabljeni geodetski karti, ki sta bili izdelani predvsem na podlagi fotogrametričnih aerosposnetkov iz leta 1998 za stanje pred plazom. Za stanje po plazju pa je bilo izvedeno snemanje 27.11.2000. Z modelom PCFLOW2D je bilo modelirano območje Zgornjega Loga v dolžini 600 m z mrežo 2 x 2 m, z modelom Flo-2D pa

je bilo modelirano celotno območje Zgornjega in Spodnjega Loga v dolžini 2000 m z mrežo 4 m x 4 m.

Umerjanje obeh modelov je potekalo na podlagi zabeleženih gladin po dogodku 17.11.2000 in na podlagi geodetskega posnetka iz leta 1998. Delno so bile gladine posnete tudi terestično. Izvedena je bila tudi tlorisna primerjava zabeleženega in izračunanega območja in kvantitativna primerjava zabeleženih in izračunanih kot na obeh robovih območja. Ker začetni hidrogram ni bil zabeležen, je bil uporabljen hidrogram izračunan z 1D modelom.

Za reološke podatke je bila uporabljena vrednost $\tau = 20$ Pa in $\eta = 10$ Pas, ki je bila dobljena na podlagi geomehanskih raziskav (Petkovšek, 2001). Umerjanje modela pa je bilo potrebno pri parametrih n_g in K. V modelu PCFLOW2D je umerjena vrednost n_g znašala $0,05 \text{ ms}^{-1/3}$, medtem ko je pri Flo-2D znašala za območje pozidave $0,11 \text{ ms}^{-1/3}$ drugod pa $0,065 \text{ ms}^{-1/3}$. Koeficient K je pri obeh modelih znašal 2285. Razlika med koeficienti n_g pri obeh modelih je razumljiva zaradi različne gostote mreže in zaradi razlike pri upoštevanju vpliva objektov. PCFLOW2D objekte upošteva, medtem ko so v modelu Flo-2D upoštevani z večjo hrapavostjo. Razlika je še pri uporabi modela turbulence, del razlike pa gre pripisati tudi različnim numeričnim metodam, ki jih uporabljata programa.

Primerjava računane gladine z zabeleženim območjem je služila predvsem za verifikacijo podatkov o geometriji. Ujemanje gladin z zabeleženimi je bilo na zgornjem delu obravnave dobro, težave so bile le v zavojih struge, kjer model ne pokaže tako izrazite razlike med gladino na levi in na desni strani. Model je pokazal podobno gladino tako v konkavnem kot v konveksnem delu zavoja – v konveksnem delu je bila gladina previsoka, zato je bilo ocenjeno, da je model na varni strani. V spodnjem delu je bilo ujemanje slabše, saj je bila modelirana gladina 2 do 5 m previsoka. Ta razlika bi se lahko kompenzirala z uporabo nižjega koeficienta n_g , saj je bilo na tem območju manj turbulence in medsebojnih trkov delcev. Vzrok za neujemanje gladin bi lahko bila tudi intenzivna erozija pri prehodu vala, ki je povzročila tudi porušitev stare avstrijske pregrade. Dobra stran slabšega ujemanja je bila to, da je bilo ujemanje boljše na desni brežini, kjer je naselje stanovanjskih hiš. Za raziskavo pojava erozije bi bile potrebne dodatne terenske raziskave.



Slika 12 : Umerjanje modelov PCFLOW2D in FLO-2D (Rajar et al., 2001).

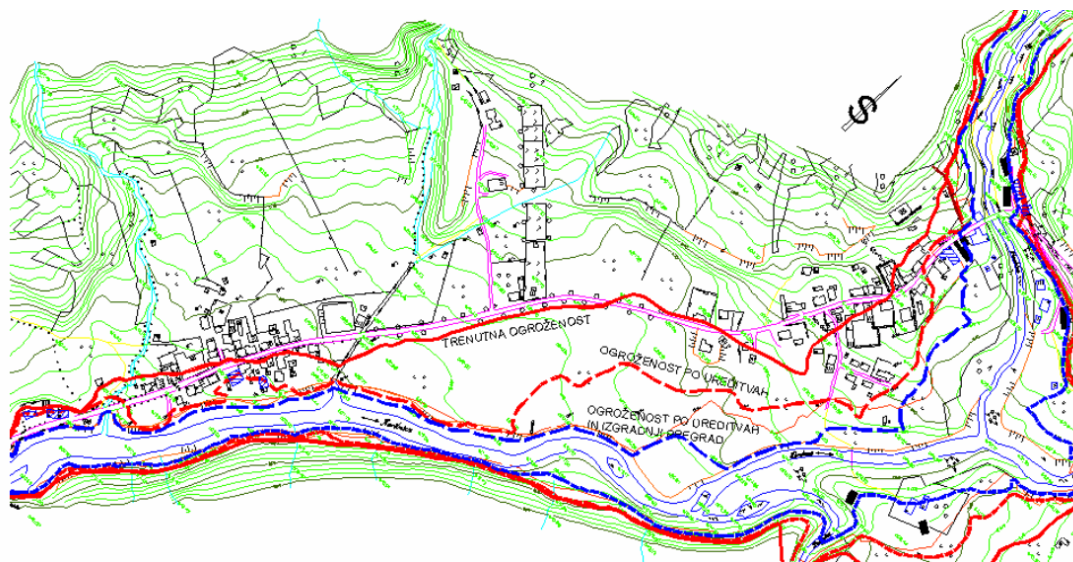
Fig. 12: PCFLOW2D and FLO-2D models moderation.

Pri občutljivostni analizi modela je bilo ugotovljeno, da ima pri nizkih vrednostih reoloških parametrov največji vpliv koeficient n_g . 30% - na sprememba koeficienta n_g ima večji vpliv kot 300% - na sprememba koeficienta K . Sprememba parametra τ ima zelo majhen vpliv na izračunane gladine. Sprememba koeficienta n_g iz $0,05 \text{ ms}^{-1/3}$ na $0,065 \text{ ms}^{-1/3}$ pomeni 8% spremembo v globini toka.

Z 2D modeli so bili preračunani isti scenariji kot z 1D modelom. Opis scenarijev je podan v prejšnjem delu, kjer je opisano modeliranje z modelom 1D. Modeliranje je bilo izvedeno na geometriji iz leta 1998 (stanje po popolni odstranitvi plazine) in na geometriji iz leta 2000, ko je bil odstranjen samo majhen del plazine. Upoštevane so bile tudi različne variante obrambnih zidov.

Rezultati za scenarij ponovitve dogodka z enako magnitudo so pokazali, da je ob ponovitvi dogodka brez ukrepov ogrožena precej večja površina, kot je bila prizadeta 17.11.2000, saj je bilo dno struge po drobirskem toku višje za 5 do 7 m. Med ukrepi za zmanjšanje ogroženosti je bilo predlaganih več rešitev: Obrambni zidovi, ki bi bili visoki 6 m in varnostno nadvišanje, selitev 30-ih hiš, kar pa je bilo nesprejemljivo zaradi več dejavnikov. Ena od možnosti, da bi zaščitili 9 hiš, je bila odstranitev $300.000 - 500.000 \text{ m}^3$ materiala in izgradnja obrambnega

zidu v višini dveh metrov, kar pa tudi ni bilo sprejemljivo. Z izgradnjo pregrad in delnim preoblikovanjem doline pa bi lahko zagotovili varnost najbolj ogroženih 9-ih objektov. Največja prednost pregrad bi bila tudi zaustavljanje materiala pri scenarijih z magnitudo, večjo od tiste leta 2000.



Slika 13: Karta ogroženosti Zgornjega in Spodnjega Loga za primer ponovitve dogodka (Hojnik et al., 2001).
Fig. 13: Risk map for Zgornji and Spodnji Log.

V primeru Loga pod Mangartom se je modeliranje izkazalo kot zelo uporaben postopek pri načrtovanju ukrepov in zagotavljanju varnosti. Rezultate je možno dobiti v razmeroma kratkem času, njihova natančnost pa je zadovoljiva. Poudariti pa je potrebno, da je za detajlno projektiranje ukrepov potrebno pridobiti točnejše podatke o geometriji in uporabiti model, ki bi upošteval spreminjanje hitrosti po globini (odlaganje) – 3D model.

4.7.2 Koseč (Mikoš et al., 2006; Hojnik, 2004)

Pri modeliranju drobirskih tokov nad vasjo Koseč sta bila uporabljena dva modela in sicer DEBRIF-1D in Flo-2D. Model DEBRIF-1D je v bistvu model PLAZ1D opisan v prejšnjem delu, prirejen za modeliranje drobirskih tokov. Drugi uporabljeni model pa je komercialni model Flo-2D, ki je bil uporabljen tudi pri modeliranju drobirskega toka v Logu pod Mangartom. Model Flo-2D tega območja je bil izdelan kot strokovna podlaga za Državni lokacijski načrt, namen modela pa je bil oceniti ter načrtovati ukrepe za zmanjševanje ogroženosti prebivalcev naselja Koseč. Model DEBRIF-1D pa je bil uporabljen za hidravlično študijo širšega območja med območjem podora in naseljem Ladra. Sicer pa se je delo obeh

skupin prepletalo. 1D model je bil, podobno kot v Logu pod Mangartom, uporabljen kot vhodni podatek za 2D model, ki je obravnaval odsek skozi naselje Koseč.

Decembra 2001 se je iz območja Zastruge pod Planico sprožil kamninski podor in končal v strugi hudournika Brusnik. Kamninske mase so padle na labilen teren, ki ga sestavljajo fliši. Debelina gruščnatih nanosov, ledeniške morene in zaglinjenih flišev je bila ocenjena na 5 do 10 m. Struga Brusnika je bila zasuta v dolžini 350 m. Ocenjena količina materiala je bila 180.000 m³. Zaradi zavedanja nevarnosti drobirskih tokov je bila leta 2002 struga Brusnika skozi Koseč poglobljena in utrjena. Kmalu po ureditvi so se začeli prožiti manjši drobirski tokovi, ki jih je bilo okrog 20. Magnitude so bile od 100 m³ do 1000 m³.

Namen modeliranja je bila ocena ogroženosti prebivalcev zaradi delovanja drobirskih tokov. Na podlagi analize padavin in karakteristik povodja Brusnika so bili za merodajne izbrani naslednji scenariji. Potencialne magnitude so bile ocenjene na 1000 m³, 5000 m³, 15000 m³ in ekstremen primer z magnitudo 25.000 m³. Upoštevane so bile tudi različne koncentracije sedimenta. Ena možnost je bila maksimalna koncentracija $C_v = 0,55$ ki je bila upoštevana pri vseh magnitudah. Glede na izkušnje iz Loga pod Mangartom pa je bil dodan še scenarij z magnitudo 20.000 m³ in koncentracijo $C_v = 0,45$. Ta odločitev je bila sprejeta, ker je bila v Logu pod Mangartom vlažna mešanica ($C_v = 0,45$) bolj kritična od suhe ($C_v = 0,55$).

Zaradi pomanjkanja terenskih podatkov (zabeležene gladine drobirskih tokov) je bilo umerjanje oteženo. Izvedeno je bilo s pomočjo video posnetkov, ki so bili posneti med potovanjem drobirskih tokov skozi vas Koseč. Uporabljena sta bila posnetka dveh dogodkov in sicer tok A (suh tok) in tok B (razmeroma vlažen tok). Geometrija je bila povzeta po podatkih o geometriji struge, ki je bila preurejena tik pred proženjem prvih drobirskih tokov. Uporabljena vrednost koeficienta n_g je znašala 0,05 ms^{-1/3} (korito pravilne oblike, obloženo s skalami), medtem ko je bil padec struge 20%. Za določanje reoloških parametrov τ in η niso bili izvedene geomehanske raziskave, saj ni bil odvzet vzorec materiala s terena.

Iz video posnetka toka B je bila ocenjena globina toka 1,3 m in hitrost 1 m/s. To pomeni pretok 5,72 m³/s. Skupna magnituda dogodka je bila ocenjena na 140 m³. Iz posnetka

dogodka št. 7 pa je bilo ocenjeno sledeče: povprečna hitrost 0,35 m/s, globina 2,5 m in skupna magnituda 128 m³.

Na podlagi teh podatkov so bile za 1D model DEBRIF-1D umerjene naslednje vrednosti reoloških parametrov. Za tok B: $\tau = 20 \text{ N/m}^2$, $\eta = 20 \text{ Pa.s}$ in vrednost $K = 1000$. Volumska koncentracija sedimenta je bila ocenjena na $C_v = 0,40$. Za tok A pa naslednje vrednosti: $\tau = 2000 \text{ N/m}^2$, $\eta = 180 \text{ Pa.s}$ in vrednost $K = 1000$. V tem primeru je bila koncentracija $C_v = 0,50$.

Za 2D model Flo-2D so bile umerjene vrednosti reoloških parametrov nekoliko drugačne. Za tok B so bile umerjene sledeč vrednosti: $\tau = 100 \text{ N/m}^2$, $\eta = 24 \text{ Pa.s}$ in vrednost $K = 1000$. Volumska koncentracija sedimenta je bila ocenjena na $C_v = 0,55$. Razlika je posledica različnega zajema geometrije struge pri obeh modelih in različne numerične metode pri modelih. Model FLO-2D je imel računsko mrežo sestavljeno iz 65.239 celic velikosti 1 m x 1 m. Osnova za podatke o terenu je bil uporabljen geodetski posnetek iz leta 2002.

Občutljivostna analiza je pokazala, da sta pri modelu FLO-2D najpomembnejša parametra K in η . Manj pomemben je koeficient n_g , najmanj pa parameter τ . Tu je potrebno poudariti, da je bil pri modeliranju drobirskega toka v Logu pod Mangartom z modelom FLO-2D za najbolj pomembnega spoznan parameter n_g . Razlog za to razliko je v različnosti obeh pojavov. V Koseču so imeli drobirski tokovi nižje gladine in precej bolj grobo sestavo z zelo majhnim deležem drobnih delcev, zato so imeli večji vpliv trki med delci.

Za primerjavo je bil poleg zgoraj navedenih scenarijev z magnitudami 1000, 5000, 15.000 in 25.000 m³ in uporabo umerjenih parametrov, z modelom Flo-2D modeliran še scenarij z magnitudo 20.000 m³ in parametri $\tau = 10 \text{ Pa}$, $\eta = 5 \text{ Pas}$ in $C_v = 0,45$. Ta primer je bil obravnavan, saj daje večje vrednosti najvišjih pretokov, a se je izkazalo, da so gladine zaradi manjših izgub nižje kot pri magnitudi 25.000 m³ in umerjenih parametrih. Povprečne hitrosti pri pretoku 500 m³/s so znašale 8 m/s, v sredini profila 12-14 m/s, na robu pa 1-2 m/s. Natančnost modela pri magnitudi 25.000 m³ je bila ocenjena na 65 cm.

Primerjava rezultatov obeh modelov je pokazala, da je gladina toka izračunana z modelom DEBRIF-1D, mestoma višja kot gladina, izračunana z 2D modelom. Poleg razlike v

numerični metodi je glavni vzrok v tem, da model Flo-2D simulira tudi prelivanje toka preko bregov struge. Dodaten razlog je v tem, da je gladina pri 1D modelu horizontalna, medtem ko je pri FLO-2D gladina po prečnem prerezu struge različnih višin. Razen omenjenih razlik je bilo ponovno potrjeno, da je ujemanje obeh modelov dobro.

Na podlagi analize rezultatov modelov so bili za zmanjšanje ogroženosti naselja Koseč predlagani naslednji ukrepi:

- zid na desnem bregu v naselju, ki bo varoval stanovanjske objekte
- poglobitev struge skozi naselje in nov most
- pregrada za omejevanje pretoka drobirskih tokov
- ureditev razlívnege območja za drobirske tokove na desni brežini

Poleg predloga gradbenih ukrepov je bila izdelana tudi karta ogroženosti naselja Koseč zaradi delovanja drobirskih tokov.

5 OCENJEVANJE NEVARNOSTI IN OGROŽENOSTI

5.1. Zakonodaja s področja kartiranja oz. ocenjevanja nevarnosti in ogroženosti zaradi delovanja voda in erozije v Sloveniji

5.1.1 Uvod

V Sloveniji zakonodaja na področju varstva pred delovanjem drobirskih tokov še ni izdelana. Trenutno je izdelana za področje poplav in erozijske problematike. V določenih pogledih bi lahko problematiko drobirskih tokov navezali tudi na problematiko poplav in erozije, ki je že obdelana. Povod za pripravo slovenske zakonodaje s tega področja je bila poleg Zakona o vodah iz leta 2002, Direktiva 2007/60/ES Evropskega parlamenta in sveta z dne 23.10.2007. Na podlagi te Direktive sta bila v Sloveniji pripravljena in sprejeta Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti (UL RS 60/2007) 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 (UL RS 89/2008).

Pred tem je bil v Sloveniji sprejet Zakon o vodah (ZV-1, UL RS 67/02), kjer je sicer omenjena ogroženost zaradi poplav, erozije, zemeljskih plazov in snežnih plazov, ni pa predpisanih konkretnih ukrepov za varstvo oz. preventivo. V ZV-1 so podani opisi, kaj je poplavno območje, erozijsko območje, plazljivo območje in plazovito območje. Predvideno je tudi, da je potrebno sprejeti podrobno metodologijo za uvrščanje območij v razrede ogroženosti. Prav tako Zakon o vodah predvideva, da je potrebno sprejeti pogoje in omejitve za posege in dejavnosti na ogroženih območjih. Oboje prinašata Pravilnik in Uredba, omenjena v prejšnjem odstavku.

Zaradi določenih podobnosti drobirskih tokov in poplavne problematike ter erozije, ki bodo podrobneje obrazložene v nadaljevanju, je v tem delu pripravljen kratek pregled trenutno veljavne zakonodaje s področja poplav in erozije.

5.1.2 DIREKTIVA 2007/60/ES o oceni in obvladovanju poplavne ogroženosti (UL EU 2007)

Glavni cilj direktive je zmanjšanje škodljivih posledic poplav na zdravje ljudi, okolje, kulturno dediščino in gospodarske dejavnosti. Namen je vzpostaviti okvir za oceno in obvladovanje poplavne ogroženosti v EU. V direktivi sta natančno definirana dva pojma:

- a.) poplava- začasno prekritje zemljišča z vodo, ki običajno ni prekrita z vodo. To vključuje poplave, ki jih povzročijo reke, gorski hudourniki, občasni sredozemski vodotoki ter poplave, ki jih povzroči morje v obalnih območjih. Med poplave niso vključene poplave iz kanalizacijskih sistemov.

- b.) poplavna ogroženost- kombinacija verjetnosti nastopa poplavnega dogodka in morebitnih s poplavo povezanih škodljivih posledic za zdravje ljudi, okolja, kulturne dediščine in gospodarske dejavnosti.

Države članice morajo za vsako vodno območje ali del mednarodnega vodnega območja, ki leži na njihovem območju opraviti predhodno oceno poplavne ogroženosti. Ta predhodna ocena mora biti pripravljena na podlagi razpoložljivih informacij oziroma informacij, ki jih je mogoče neposredno uporabiti, kot so na primer obstoječi podatki o preteklih poplavah in raziskave o dolgoročnem razvoju, zlasti glede vpliva podnebnih sprememb na pojav poplav. Predhodna ocena poplavne ogroženosti se opravi zato, da se izdelata ocena morebitne ogroženosti.

Predhodna ocena mora vsebovati vsaj:

- karte vodnega območja v ustreznem merilu
- opis preteklih poplav, ki so imele škodljiv vpliv na zdravje ljudi, okolje, kulturno dediščino in gospodarske dejavnosti in za katere v prihodnosti obstaja še vedno velika verjetnost, da se bodo ponovile. Opis mora vsebovati njihov obseg, odtočne poti in oceno škodljivih posledic, ki jih bodo povzročile
- opis večjih poplav, ki so se v preteklosti zgodile in za katere se lahko pričakuje, da bi se lahko s podobnimi posledicami ponovile.

Na mednarodnih območjih mora biti zagotovljena izmenjava podatkov in informacij med zadevnimi pristojnimi organi. Rok za pripravo predhodne ocene poplavne ogroženosti je 22.12.2011. Na podlagi te ocene poplavne ogroženosti je potrebno določiti vsako vodno območje ali del mednarodnega vodnega območja, ki leži na območju posamezne države. Potrebno je določiti tista območja, za katera je ugotovljeno, da obstaja pomembna poplavna ogroženost ali verjetnost, da se bo poplava ponovila.

V nadaljevanju je potrebno za vsa območja, za katera je ugotovljeno, da obstaja pomembna poplavna ogroženost ali verjetnost, da se bo poplava ponovila, pripraviti karte poplavne nevarnosti in poplavne ogroženosti v najustreznejšem merilu.

Karte poplavne nevarnosti morajo zajemati geografska območja, kjer lahko pride do naslednje vrste poplav:

- poplave z majhno verjetnostjo oz. poplav, ki so posledica izrednega dogodka
- poplave s srednjo verjetnostjo (povratna doba 100 let)
- poplave z veliko verjetnostjo, kjer je to primerno

Za vsako vrsto poplav se prikažejo naslednji podatki:

- obseg poplav
- globina vode ali gladina vode
- hitrost toka ali ustrezni pretok vode, kjer je to primerno

Karte poplavne ogroženosti prikazujejo morebitne škodljive posledice, povezane z vrstami poplav, ki se jih opiše z naslednjimi kazalci:

- okvirno število prebivalcev, ki jih lahko poplava prizadane
- vrste gospodarskih dejavnosti na območju, ki jih lahko prizadane poplava
- obrati, ki lahko v primeru poplave povzročijo nenamerno onesnaženje in zavarovana območja, ki jih lahko prizadane poplava
- drugimi podatki, glede na presojo članic

Po presoji države članice se lahko za območja, kjer je zagotovljena ustrezna stopnja zaščite, obravnavajo samo poplave z majhno verjetnostjo. Podobno velja za območja, kjer je vzrok za poplave podzemna voda. Rok za pripravo kart nevarnosti in ogroženosti je 22.12.2013.

Na podlagi kart nevarnosti in ogroženosti pa morajo države članice oblikovati načrte za oblikovanje poplavne ogroženosti. Prav tako je potrebno določiti ustrezne cilje za obvladovanje poplavne ogroženosti na območjih določenih v predhodni oceni poplavne ogroženosti s poudarkom na zmanjšanju morebitnih škodljivih posledic poplav za zdravje ljudi, okolje, kulturno dediščino in gospodarske dejavnosti ter, če je to primerno, s poudarkom na ne gradbenih ukrepih in/ali na ukrepih za zmanjšanje verjetnosti nastopa poplavljanja. Načrti za oblikovanje poplavne ogroženosti morajo upoštevati tudi vidike, kot so stroški in koristi, obseg poplav ter odtočne poti poplavnih voda. Upoštevati morajo območja, kjer bi se poplavne vode lahko zadržale, okoljske cilje iz Direktive 2000/60/ES, upravljanje tal in voda, prostorsko načrtovanje, rabo tal, ohranjanje narave ter plovbo in pristaniško infrastrukturo.

V načrtih za obvladovanje poplavne ogroženosti morajo biti obravnavani vsi vidiki obvladovanja poplavne ogroženosti, s poudarkom na preprečevanju, varstvu, in pripravljenosti, vključno z napovedovanjem poplav in sistemi za zgodnje opozarjanje. Upošteviti morajo značilnosti posameznega povodja ali porečja. Načrti za obvladovanje poplavne ogroženosti lahko vključujejo tudi spodbujanje praks trajnostne rabe tal, izboljšanje zadrževanja vode ter nadzorovano poplavljanje nekaterih območij v primeru poplavnega dogodka. Načrti morajo biti pripravljene solidarno in ne smejo biti zasnovani tako, da bi poslabševali razmere v državah gorvodno ali dolvodno na istem porečju, razen če je tako dogovorjeno. Rok za izdelavo načrtov za obvladovanje poplavne ogroženosti je 22.12.2015.

Posodabljanje predhodne ocene poplavne ogroženosti, kart poplavne nevarnosti in kart poplavne ogroženosti je predvideno na 6 let. Posamezne države članice so zavezane sprejeti zakone in druge predpise potrebne za uskladitev s to direktivo do 26. novembra 2009.

5.1.3 PRAVILNIK o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti (UL RS 60/07)

Pravilnik določa za območja, ogrožena zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja:

- način določanja poplavnih in erozijskih območij
- način razvrščanja zemljišč v razrede poplavne in erozijske ogroženosti
- merila za določanje razredov poplavne in erozijske ogroženosti.

Pravilnik določa tudi način priprave kart poplavnih in z njimi povezanih erozijskih območij in enotne oznake vsebin, ter s tem povezane naloge.

5.1.3.1 Pomembnejši izrazi

Pomembnejši izrazi, ki so definirani v pravilniku in bodo pomembni tudi pri nadaljevanju te naloge so sledeči:

poplava: naravni pojav začasne preplavljenosti zemljišč, ki z vodo običajno niso preplavljena;

erozija: naravni pojav odplavljanja in odlaganja prepererelega kamninskega materiala vodnih in priobalnih zemljišč celinskih voda in morja;

poplavna in erozijska nevarnost: možnost nastanka poplav in z njimi povezanih erozijskih procesov, predvsem kot posledice naravnih dejavnikov, vključuje pa tudi posledice človekovega delovanja

poplavna in erozijska ogroženost: možnost škodnih posledic, predvsem za življenje in zdravje ljudi, okolje, gospodarske in negospodarske dejavnosti ter kulturno dediščino zaradi njihove izpostavljenosti poplavni in erozijski nevarnosti

elementi ogroženosti: predvsem ljudje, okolje, gospodarske in negospodarske dejavnosti ter kulturna dediščina; ranljivost elementov ogroženosti pomeni njihovo izpostavljenost in dovzetnost za poškodbe zaradi poplav in z njimi povezane erozije in je odvisna od fizičnih, socialnih in gospodarskih elementov in procesov (npr. prostorske lege, strukturne odpornosti, časovne izpostavljenosti)

območje poplavne in erozijske nevarnosti: območje, na katerem je na podlagi analize geografskih in geoloških značilnosti prostora, hidroloških podatkov in značilnosti

- vodnega toka določena verjetnost nastanka naravnega pojava, lahko pa tudi njihova moč;
- območje razreda poplavne in erozijske nevarnosti: del območja poplavne in erozijske nevarnosti, določeno na podlagi meril, ki razvrščajo poplavno nevarnost glede na verjetnost nastanka in moč naravnega pojava;
- območje poplavne in erozijske ogroženosti: območje poplavne nevarnosti ali njegov del, na katerem je zaradi različne stopnje ranljivosti elementov ogroženosti in različne moči naravnega pojava različno ogroženo življenje in zdravje ljudi, kakovost okolja, gospodarske in negospodarske dejavnosti in kulturna dediščina
- razred poplavne nevarnosti: določen je z verjetnostjo nastanka poplavnega dogodka in njegovo močjo
- razred erozijske nevarnosti: določen je z verjetnostjo nastanka poplavnega dogodka in z njim povezane erozije in močjo naravnega pojava erozije
- razred ranljivosti: določen je na podlagi meril, ki razvrščajo elemente ogroženosti v skupine po velikosti in pomembnosti možnih škodnih posledic;
- razred poplavne in erozijske ogroženosti: določen je na podlagi meril za razvrščanje poplavne in erozijske ogroženosti in je odvisen od razreda nevarnosti in razreda ranljivosti elementov ogroženosti
- opozorilna karta poplav in erozije: karta natančnosti v merilu 1:50.000 ali manjšem, ki z različnimi grafičnimi znaki opozarja na poplavne in erozijske razmere na določenem območju na podlagi prve ocene poplavne nevarnosti
- karta poplavne in erozijske nevarnosti: detajlna karta v merilu 1:5.000 ali večjem, ki določa območja poplavne in erozijske nevarnosti na podlagi analiz verjetnosti za nastanek naravnega pojava
- karta razredov poplavne in erozijske nevarnosti: detajlna karta v merilu 1:5.000 ali večjem, ki prikazuje notranja območja poplavne in erozijske nevarnosti in je izdelana na podlagi meril za razvrščanje poplavne in erozijske nevarnosti v razrede glede na moč naravnega pojava
- karta poplavne in erozijske ogroženosti: je detajlna karta v merilu 1:5.000 ali večjem in prikazuje stopnjo ogroženosti za skupine elementov ogroženosti glede na moč naravnega pojava. Izdelana je na podlagi meril za določanje razredov poplavne in

erozijske ogroženosti in analize ranljivosti na območjih posameznih razredov nevarnosti

moč poplavne nevarnosti: določena z globino ali zmnožkom globine in hitrosti toka

moč erozijske nevarnosti: določena z debelino odplavljenega sloja ali debelino odloženega sloja preperelega kamninskega materiala

verjetnost nastanka poplavne nevarnosti: verjetnost nastanka pretokov Q_{10} , Q_{100} ali Q_{500} oziroma verjetnost nastopa gladin G_{10} , G_{100} ali G_{500} , ki povzročijo poplavo

pretok Q_{500} : vrednost pretoka vode, ki je v določenem letu lahko dosežen ali presežen z verjetnostjo 0,2% in se lahko določi tudi na naslednji način:

– za površino povodja, ki je večja od 1000 km²:

$$Q_{500} = 1,2 * Q_{100}$$

– za površino povodja od 100 km² do 1000 km²:

$$Q_{500} = 1,3 * Q_{100}$$

– za površino povodja, ki je manjša od 100 km²:

$$Q_{500} = 1,4 * Q_{100}$$

pomembnejša območja poplavne in erozijske ogroženosti:

- območja na katerih je gostota ogroženih prebivalcev več kot 500 na km², pri čemer je skupna površina območja s tako gostoto znotraj poplavnega območja večja kot 1,25 km²
- območja, ki so razvrščena v razred velike poplavne nevarnosti, na njih pa obratuje obrat ali naprava zaradi katere lahko pride do onesnaženja velikega obsega ali obstajajo občutljivi objekti

pomembnejša območja poplavne in erozijske nevarnosti:

- območja, kjer se poplavna voda lahko brez škode razliva in so večja od 25% površine prvega dol vodnega območja ogroženega zaradi poplav, ter kot taka pomembna za uravnavanje (zmanjševanje in ne poslabševanje) poplavne ogroženosti na dolvodnih območjih poselitve
- območja, kjer se na njih nahaja območje s posebnimi zahtevami po predpisih, ki določajo način priprave načrtov upravljanja voda, na katerih bi v primeru poplav in erozije lahko prišlo do onesnaženja pomembnih zavarovanih habitatov in vrst, onesnaženja virov pitne vode, območij kopalnih voda

5.1.3.2 Cilji in način določanja poplavnih in erozijskih območij

Cilji določanja poplavnih in erozijskih območij in z njimi povezane ogroženosti so sledeči:

- ocena poplavnih in erozijskih razmer na določenem območju
- načrtovanje ukrepov za zmanjševanje poplavne in erozijske ogroženosti
- načrtovanje rabe prostora
- načrtovanje ukrepov zaščite in reševanja ob poplavah
- ozaveščanje javnosti glede poplavne in erozijske nevarnosti oziroma ogroženosti in izvajanje mednarodnih obveznosti

Določanje poplavnih in erozijskih območij temelji na analizi geografskih in geoloških značilnosti prostora, hidroloških podatkov in značilnosti vodnega toka ob upoštevanju:

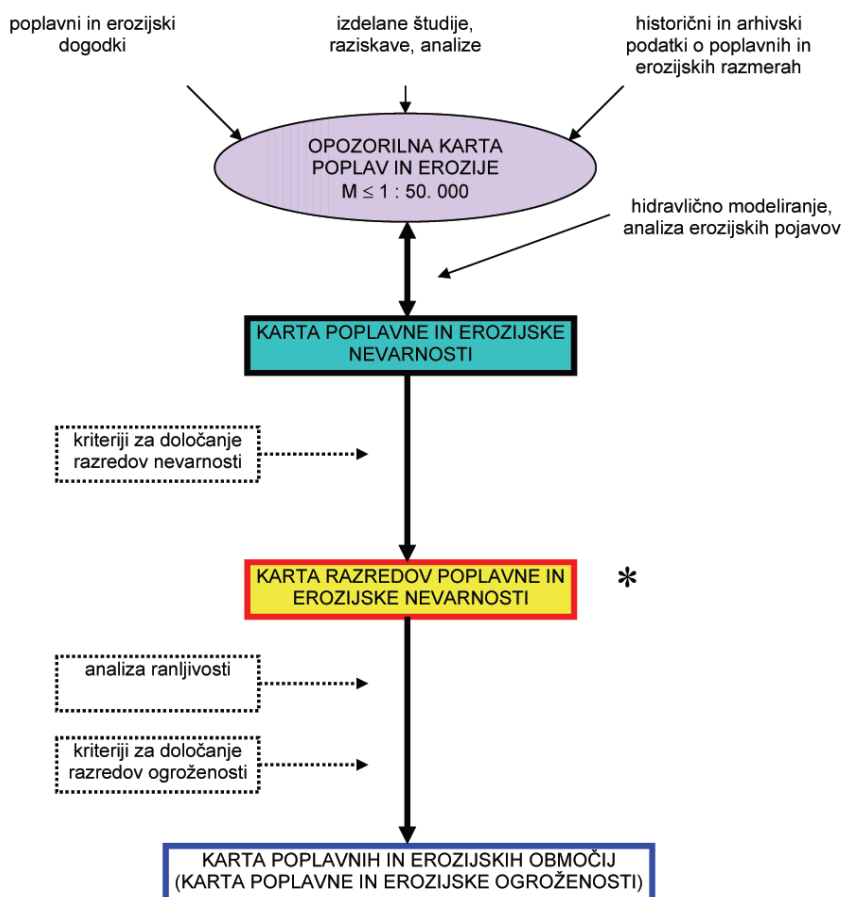
- naravnih in antropogenih dejavnikov vodotoka in njegovega povodja ali porečja
- historičnih in arhivskih podatkov o preteklih poplavnih in erozijskih dogodkih
- že izdelanih študij, raziskav in analiz poplavnih in erozijskih pojavov
- meteoroloških in hidroloških podatkov
- podatkov o škodnih posledicah poplavnih in erozijskih pojavov
- presoj tveganja za okolje
- bodočih vplivov na pojav poplav in erozije z upoštevanjem dolgoročnega razvoja in podnebnih sprememb
- ter drugih značilnosti, pomembnih za poplavne in erozijske dogodke.

Predpisan postopek za določanje poplavnih in erozijskih območij ter razvrščanje v razrede ogroženosti, je opisan v nadaljevanju. Poplavna in erozijska območja se določijo na podlagi:!

- ocene poplavne in erozijske nevarnosti (opozorilna karta poplav in erozije)
- določitve območij poplavne in erozijske nevarnosti (karta poplavne in erozijske nevarnosti)
- določitve razredov poplavne in erozijske nevarnosti (karta razredov poplavne in erozijske nevarnosti)
- ocene ranljivosti na območjih poplavne in erozijske nevarnosti

Predpisano je tudi, da se poplavna in erozijska območja določijo v vodnem katastru in da se po potrebi obnovijo in dopolnijo vsaj na vsakih 6 let (UL RS 60/2007).

5.1.3.3 Vrste poplavnih in erozijskih kart



Slika 14: Shema postopka določitve poplavnih in erozijskih območij (UL RS 60/07).
Fig. 14: Procedure of determining flooding and erosion areas.

5.1.3.3.1 Opozorilna karta poplav in erozije

Območja poplavne in erozijske ogroženosti se na podlagi ocene stanja prikažejo na opozorilni karti poplav in erozije. Opozorilna karta poplav in erozije se prvič izdela na podlagi analize historičnih in arhivskih podatkov o poplavnih in erozijskih dogodkih in na podlagi že izdelanih študij, raziskav, analiz ter drugih podatkov. V nadaljevanju se opozorilna karta dopolnjuje z novimi podatki o poplavnih in erozijskih razmerah in, če je zaradi tega pomembno spremenjena, najmanj vsakih šest let obnovi. Na območjih, kjer imajo lahko poplave čezmejni vpliv, je potrebno karte uskladiti s sosednjimi državami.

Vsebina opozorilne karte je sledeča:

- topografija in raba tal

- mejna črta možnega dosega poplav oziroma del tekočih in stoječih voda ali del obale morja, kjer je znano, da prihaja do poplav, vključno z oznako smeri poplavljanja
- mejna črta možnega obsega erozijskih pojavov oziroma del tekočih in stoječih voda ali dela obale morja, kjer je znano, da prihaja do erozije
- mesta posameznih poplavnih dogodkov s točkovnimi oznakami in s točkovnimi ali linijskimi oznakami posameznih vodnih objektov, kjer lahko nastanejo poplave in erozija zaradi napačnega obratovanja ali porušitve
- besedilni del, ki obsega opis poplavnih in erozijskih dogodkov, predvsem tistih, ki bi se lahko v prihodnosti ponovili. V zvezi z njimi obsega opis predvsem datum, vir podatkov, opis dogodka in posledic na življenje in zdravje ljudi, okolje, gospodarske in negospodarske dejavnosti, kulturno dediščino ter druge pomembne informacije o razmerah na določenem območju
- kjer je to smiselno, vsebuje tudi ocene bodočih poplav in erozije ter njihovih posledic na življenje ljudi, okolje, razvoj gospodarskih in negospodarskih dejavnosti z upoštevanjem dolgoročnega načrtovanega razvoja in podnebnih sprememb

5.1.3.3.2 Karta poplavne in erozijske nevarnosti

Na podlagi opozorilne karte se določi območja poplavne in erozijske ogroženosti, prednostno za območja, kjer lahko pride do večje ogroženosti. Določitev območij iz prejšnjega odstavka se izvaja z metodami modeliranja in analiziranja, ki morajo ustrezati priznanemu stanju znanosti na podlagi hidroloških, geoloških, geomorfoloških in geodetskih podatkov ter podatkov o rabi tal in pokrovnosti. Izbira metod mora ustrezati dejanskim razmeram na območju in pričakovani natančnosti rezultatov.

Na kartah poplavne in erozijske nevarnosti se območja poplavne in erozijske nevarnosti ob tekočih vodah prikažejo v grafični obliki, ki vsebujejo podatke o mejah območij poplavne nevarnosti pri pretoku Q_{10} , Q_{100} in Q_{500} ter podatke o mejah območij erozijske nevarnosti pri pretoku Q_{100} . Območja poplavne in erozijske nevarnosti ob stoječih vodah in morju se prikažejo v grafični obliki, ki vsebuje podatke o mejah poplavne nevarnosti morja in jezer pri gladini G_{10} , G_{100} , G_{500} in podatke o mejah območij erozijske nevarnosti pri gladini G_{100} .

Meje območij poplavne in erozijske nevarnosti se označuje z različnimi tipi in barvami črt. Ob vsaki črti mora biti jasno napisano za katero območje gre (Q_{100} , G_{100} ...). Pri poplavni karti je označeno Q_{100} pri erozijski karti pa E_{100} .







Merila za določitev razredov poplavne nevarnosti

Območja poplavne nevarnosti se na podlagi meril, ki razvrščajo moč poplavnega toka pri enaki verjetnosti nastanka dogodka, razvrstijo v razrede poplavne nevarnosti, pri čemer je odločilno tisto merilo, ki izkazuje največji razred nevarnosti.




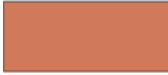


V karti poplavne nevarnosti se določijo naslednji razredi poplavne nevarnosti:

- *razred velike nevarnosti*, kjer je pri pretoku Q_{100} ali gladini G_{100} globina vode enaka ali večja od 1,5 m oziroma zmnožek globine in hitrosti vode enak ali večji od $1,5 \text{ m}^2/\text{s}$
- *razred srednje nevarnosti*, kjer je pri pretoku Q_{100} ali gladini G_{100} globina vode enaka ali večja od 0,5 m in manjša od 1,5 m oziroma zmnožek globine in hitrosti vode enak ali večji od $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ in manjši od $1,5 \text{ m}^2/\text{s}$ oziroma, kjer je pri pretoku Q_{10} ali gladini G_{10} globina vode večja od 0,0 m
- *razred preostale nevarnosti*, kjer je pri pretoku Q_{100} ali gladini G_{100} globina vode manjša od 0,5 m oziroma zmnožek globine in hitrosti vode manjši od $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$
- *razred zelo majhne nevarnosti*, kjer poplava nastane zaradi izrednih naravnih ali od človeka povzročenih dogodkov (npr. izredni meteorološki pojavi ali poškodbe ali porušitve proti poplavnih objektov ali drugih vodnih objektov).

Podana je predpisana oblika označevanja poplavne in erozijske nevarnosti

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

Slika 15: Legenda oznak na kartah poplavne nevarnosti (UL RS 60/07).
Fig.15: Flooding hazard map legend.

debelina sloja (pri pretoku Q_{100})	debelina sloja (pri pretoku Q_{100})
 < 0,5 m	 < 0,3 m
 0,5 m do 2,0 m	 0,3 m do 1,0 m
 > 2,0 m	 > 1,0 m
odplavljeni prepereli kamninski material	odloženi prepereli kamninski material

Slika 16: Legenda oznak na kartah erozijske nevarnosti (UL RS 60/07).
Fig. 16: Erosion hazard map legend.


Merila za določitev razredov erozijske nevarnosti

Območja erozijske nevarnosti se na podlagi meril, ki razvrščajo erozijo glede na njeno moč pri enaki verjetnosti nastanka dogodka, razvrstijo v razrede erozijske nevarnosti.

V karti erozijske nevarnosti se določijo naslednji razredi erozijske nevarnosti:

- *razred velike erozijske nevarnosti*, kjer je pri pretoku Q_{100} ali gladini G_{100} debelina odplavljenega sloja večja od 2,0 m oziroma debelina odloženega sloja večja od 1,0 m,
- *razred srednje erozijske nevarnosti*, kjer je pri pretoku Q_{100} ali gladini G_{100} debelina odplavljenega sloja od 0,5 m do 2,0 m oziroma debelina odloženega sloja od 0,3 m do 1,0 m
- *razred majhne erozijske nevarnosti*, kjer je pri pretoku Q_{100} ali gladini G_{100} debelina odplavljenega sloja manjša od 0,5 m oziroma debelina odloženega sloja manjša od 0,3 m.

Predpisane so tudi šrafure za oznako meja različnih razredov poplavnne in erozijske nevarnosti:

Karta razredov poplavnne in erozijske nevarnosti	
 Em	območje majhne nevarnosti
 Es	območje srednje nevarnosti
 Ev	območje velike nevarnosti
 Pp	območje preostale nevarnosti
 Pm	območje majhne nevarnosti
 Ps	območje srednje nevarnosti
 Pv	območje velike nevarnosti

Slika 17: Oznaka razredov nevarnosti na karti razredov poplavnne ali erozijske nevarnosti (UL RS 60/07).
Fig. 17: Flooding and erosion hazard map classes legend.

5.1.3.3.3 Karta poplavnne in erozijske ogroženosti

Za potrebe ocene ogroženosti, je potrebno za posamezna območja nevarnosti izdelati oceno ranljivosti, ki mora obsegati predvsem:

- oceno števila izpostavljenih prebivalcev
- določitev vrste in števila izpostavljenih gospodarskih in ne gospodarskih dejavnosti,
- prikaz lokacije in opis obratov in naprav zaradi katerih lahko pride do onesnaženja velikega obsega
- določitev lokacij in opis občutljivih objektov
- prikaz in opis območij s posebnimi zahtevami po predpisih, ki določajo način priprave načrtov upravljanja voda, na katerih bi ob poplavih in eroziji lahko prišlo do onesnaženja pomembnih zavarovanih habitatov in vrst, virov pitne vode in območij kopalnih voda
- tudi podrobnejšo analizo rabe prostora in oceno možnih škodnih posledic, kadar je to potrebno zaradi načrtovanja ukrepov ali drugih pomembnih dejavnosti v zvezi s poplavno in erozijsko ogroženostjo

Preglednica 9: Merila za določitev razredov ranljivosti (UL RS 60/07).

Table 9: Criterion for vulnerability classes assesment.

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

Na podlagi analize ranljivosti in meril ranljivosti v preglednici 9 se elementi ogroženosti razvrščajo v naslednje razrede:

- razred velike ranljivosti
- razred srednje ranljivosti
- razred majhne ranljivosti
- razred zelo majhne ranljivosti




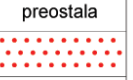
Za vsak razred je predpisano označevanje različnih razredov z različnimi šrafurami. V grafičnih prilogah se ranljivost dodatno označi s črko »R«.

Razredi ranljivosti	
	območje zelo majhne ranljivosti
	območje majhne ranljivosti
	območje srednje ranljivosti
	območje velike ranljivosti

Slika 18: Oznake razredov ranljivosti (UL RS 60/07).
Fig. 18: Vulnerability classes legend.

Poplavna in erozijska ogroženost se določita na podlagi analize ranljivosti na območjih poplavne in erozijske nevarnosti. Poplavna in erozijska ogroženost se razvrstita v naslednje razrede:

- razred velike ogroženosti
- razred srednje ogroženosti
- razred majhne ogroženosti

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

Slika 19: Kriteriji za določitev razredov ogroženosti (UL RS 60/07).
Fig. 19: Criterion for risk classes assesment.

Sistem dela, oz. postopek izdelave posameznih tipov kart je sledeč. Opozorilno karto poplav in erozije za območje RS pripravi ministrstvo pristojno za vode. Na podlagi opozorilne karte

poplav in erozije ministrstvo, pristojno za vode, določi pomembnejša območja poplavne in erozijske nevarnosti in pomembnejša območja poplavne in erozijske ogroženosti. Za območja iz prejšnjega odstavka ministrstvo, pristojno za vode, v skladu s tem pravilnikom pripravi karte poplavne in erozijske nevarnosti oziroma karte poplavne in erozijske ogroženosti. Vsi podatki o kartah morajo biti objavljeni v vodnem katastru. (UL RS 60/2007)

5.1.4 UREDBA o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja (UL RS 89/08)

Uredba v skladu z Direktivo 2007/60/ES določa pogoje in omejitve za posege v prostor in izvajanje dejavnosti na območjih, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja. Prav tako določa pogoje za posege v okolje, ki v primeru poplav in z njimi povezane erozije, lahko ogrožajo vodno okolje, ter za načrtovanje rabe prostora in preventivnih ukrepov za zmanjševanje poplavne ogroženosti.

Namen pogojev in omejitev te uredbe je:

- zmanjševanje poplavne in erozijske ogroženosti prebivalcev, gospodarskih dejavnosti in kulturne dediščine, v skladu s predpisi o vodah in s predpisi o varstvu pred naravnimi in drugimi nesrečami
- ohranitev vodnega in obvodnega prostora, potrebnega za poplavne in erozijske procese,
- zagotavljanje okoljskih ciljev na območjih poplav in erozije v skladu s predpisi o varstvu okolja in s predpisi vodah

V Uredbi je vpeljanih nekaj izrazov, ki niso definirani v Pravilniku in so zato v nadaljevanju obrazloženi.

5.1.4.1 Pomembnejši izrazi

Načrt za zmanjševanje poplavne ogroženosti: podrobnejši načrt v skladu s predpisi o vodah, pripravljen v skladu s predpisom o podrobnejši vsebini načrta za zmanjševanje poplavne ogroženosti

Celoviti ukrepi: gradbeni in negradbeni ukrepi za zmanjšanje stopnje ogroženosti, ki obravnavajo vse vidike obvladovanja poplavne ogroženosti, s poudarkom na preprečevanju, varstvu, pripravljenosti, vključno z napovedovanjem poplav in sistemi za zgodnje opozarjanje. Vključujejo tudi spodbujanje praks trajnostne rabe prostora, izboljšanja zadrževanja voda ter nadzorovanega poplavljanja območij.

Omilitveni ukrepi: del celovitih ukrepov, ki jih je treba načrtovati in izvajati skupaj z načrtovanjem namenske rabe prostora in z gradnjo novih objektov ali rekonstrukcij na območjih poplav in z njimi povezane erozije

Sprejemljiva stopnja ogroženosti: stopnja tveganja, ki jo odtehtajo ustrezne koristi.

Uredba deli ogrožena območja na območja pomembnega vpliva poplav in erozije in na ostala ogrožena območja. Za vsako od njih je v nadaljevanju podana obrazložitev omejitev posegov in dejavnosti.

5.1.4.2 Območja pomembnega vpliva poplav in erozije

V prilogah uredbe so navedene omejitve za posege in dejavnosti na območjih pomembnega vpliva poplav in erozije. Pomemben vpliv poplav je tisti vpliv preteklih ali možnih prihodnjih poplav, ki ogroža:

- območja, na katerih je gostota ogroženih prebivalcev večja od 500 prebivalcev na km², pod pogojem, da je skupna površina območja s takšno gostoto ogroženih prebivalcev znotraj območja zelo redkih poplav večja kakor 1,25 km²
- obrate in naprave, ki lahko povzročajo onesnaženje večjega obsega, ali druge obrate in naprave, ki pomenijo tveganje za okolje po predpisih o varstvu okolja, in tiste, ki pomenijo nevarnost za nastanek nesreč po predpisih o naravnih in drugih nesrečah
- objekte kulturne dediščine po predpisih o varstvu kulturne dediščine ali za družbo pomembne gospodarske dejavnosti

Glede na določbe Pravilnika in Uredbe bodo v prihodnosti vsa območja pomembnega vpliva poplav in erozije pokrita s kartami poplavne in erozijske nevarnosti in kartami poplavne in erozijske ogroženosti. Pogoji in omejitve za izvajanje posegov in dejavnosti na območjih pomembnega vpliva je sorazmerno razredu poplavne ali erozijske nevarnosti. Pogoji in

omejitve veljajo tudi za prostorske ukrepe za preprečitev oziroma zmanjšanje škodljivih vplivov poplav.

5.1.4.3 Ostala ogrožena območja (niso določena kot območja pomembnega vpliva poplav in erozije)

Na teh območjih, kjer poplavna območja niso določena oz. karte nevarnosti in ogroženosti niso izdelane, veljajo določena poenostavljena merila za omejevanje posegov in dejavnosti. Pogoji in omejitve se določijo na podlagi podatkov o globini vode, debelini nanosov ali globini odplavljenega materiala. Pogoji so sledeči:

- pri globini vode
 - <0,5 m , veljajo pogoji in omejitve srednjega razreda nevarnosti
 - >0,5 m, veljajo pogoji in omejitve velikega razreda nevarnosti
- pri debelini naplavljenega ali odplavljenega materiala
 - <0,5 m , veljajo pogoji in omejitve srednjega razreda nevarnosti
 - >0,5 m, veljajo pogoji in omejitve velikega razreda nevarnosti

5.1.4.4 Vsebina priloge uredbe

V prilogi uredbe so navedeni posegi in dejavnosti, ter omejitve za posamezne od njih, glede na to v katerem razredu nevarnosti je območje, kjer je predviden poseg ali dejavnost.

Oznake pri pogojih in omejitvah posegov so sledeče:

- + : poseg dovoljen pod pogoji vodnega soglasja
- : poseg prepovedan
- 1: poseg prepovedan, dovoljen samo na področju strnjene naselja enakovrstnih objektov ali pod pogoji, da se da z omilitvenimi ukrepi in skladno s smernicami vodnega soglasja predhodno zagotoviti, da vpliv posega v prostor ni bistven
- 2: poseg prepovedan, dovoljen samo, če ugotovitve celovite presoje vplivov na okolje ali presoje na okolje niso ocenjene kot uničujoče ali bistvene, ali če je možno z omilitvenimi ukrepi in skladno s smernicami vodnega soglasja ali naravovarstvenega soglasja predhodno zagotoviti, da vpliv posega v prostor ni bistven.

5.1.4.5 Pogoji in omejitve za posege in dejavnosti

V uredbi so določeni pogoji in omejitve za tiste dejavnosti, ki imajo lahko vpliv na nedoseganje okoljskih ciljev v povezavi z ogroženostjo zaradi poplav in erozije. Pogoji in omejitve so postavljene za naslednje dejavnosti:

- dejavnosti v obratih in napravah, ki imajo v skladu s predpisi o varstvu okolja lahko vpliv na doseganje okoljskih ciljev
- dejavnosti v občutljivih objektih, določenih s predpisi, ki predpisujejo metodologijo za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, in način razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti.

Oznake pri pogojih in omejitvah dejavnosti so sledeče:

√ : dovoljeno v skladu s pogoji okoljevarstvenega dovoljenja oziroma vodnega soglasja, ker je v postopku celovite presoje vplivov na okolje ali presoje vplivov na okolje vpliv dejavnosti ocenjen kot nebitven oziroma ga ni ali pa je pozitiven

X : prepovedano, ker je v postopku celovite presoje vplivov na okolje vpliv dejavnosti ocenjen kot uničujoč glede na okoljske cilje po predpisih o varstvu okolja in lahko ogrozi dobro stanje voda po predpisih o vodah ali cilje zmanjševanja škodljivega delovanja voda po predpisih o vodah in varstvu pred naravnimi in drugimi nesrečami

? : prepovedano. Dovoljeno je le, kadar ugotovitve celovite presoje vplivov na okolje ali presoje vplivov na okolje po predpisih o varstvu okolja niso ocenjene kot uničujoče ali bistvene in je mogoče s poprejšnjo izvedbo omilitvenih ukrepov v skladu z okoljevarstvenim dovoljenjem po predpisih o varstvu okolja ali vodnim soglasjem po predpisih o vodah zagotoviti, da njihov vpliv ni bistven

Uredba za načrtovanje novih prostorskih ureditev predpisuje naslednje usmeritve:

- pogoji in omejitve iz te uredbe se v prostorskih aktih upoštevajo kot smernice k načrtovanim prostorskim ureditvam v skladu s predpisi o prostorskem načrtovanju
- načrtovanje novih prostorskih ureditev na območjih poplav in z njimi povezane erozije, kjer že obstajajo elementi ogroženosti, mora upoštevati pogoje in omejitve te uredbe, pri tem pa zagotoviti tudi, da se z načrtovanjem ne povečajo obstoječe stopnje

ogroženosti na območju in izven njega. V ta namen je treba skupaj z načrtovanjem gradnje novih objektov načrtovati celovite ukrepe za zmanjšanje poplavne ogroženosti, njihovo izvedbo pa končati pred začetkom gradnje novih objektov.

- na območju poplavne in z njo povezane erozijske nevarnosti, kjer še ni elementov ogroženosti, je treba skupaj z načrtovanjem prostora in ob upoštevanju pogojev in omejitev iz te uredbe načrtovati in zagotoviti tudi poprejšnjo izvedbo ustreznih omilitvenih ukrepov za doseganje sprejemljivega razreda ogroženosti na območju in izven njega.
- če se ob pripravi prostorskih aktov ali pri posegih v prostor zaradi zagotavljanja varnosti novih gradenj načrtujejo tudi omilitveni ukrepi, je treba upoštevati učinke teh gradenj in načrtovanih omilitvenih ukrepov pri določitvi razredov nevarnosti oziroma ogroženosti na način, kakor ga določa predpis o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, in način razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti.
- omilitveni ukrepi so:
 - a) varovalni ukrepi: ukrepi za zmanjšanje stopnje ogroženosti prebivalcev, gospodarskih dejavnosti in kulturne dediščine na posameznem območju
 - b.) varstveni ukrepi: ukrepi za zmanjšanje stopnje ogroženosti obratov in naprav, zaradi katerih lahko nastopi onesnaženje večjega obsega, ali drugih objektov, ki ob poplavah in z njimi povezani eroziji pomenijo tveganje za okolje
 - c.) izravnalni ukrepi: ukrepi za izravnavo negativnega vpliva načrtovanega posega v prostor na obstoječo poplavno in z njo povezano erozijsko ogroženost na obstoječem območju ogroženosti in zunaj njega (UL RS 89/2008)

5.2 Dosedanje delo na področju ocenjevanja ogroženosti in nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov v Sloveniji

Kot je bilo že večkrat omenjeno, je bilo do danes na področju drobirskih tokov izvedenih razmeroma malo raziskav in študij. V nadaljevanju bo opisano tisto delo oz raziskave, ki se neposredno dotikajo teme te naloge, torej ocenjevanja nevarnosti in ogroženosti zaradi delovanja drobirskih tokov v Sloveniji.

5.2.1 CRP: Ocena ogroženosti zaradi delovanja drobirskih tokov (CRP, 2008)

Prva predstavljena raziskava je bila izvedena v letih 2006 - 2008 in sicer, CRP: Ocena ogroženosti zaradi delovanja drobirskih tokov, katere nosilca sta bila Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani in Geološki Zavod RS. Pri tem projektu je šlo za sodelovanje gradbenikov hidrotehnikov, gradbenikov geomehanikov, geografov in geologov. Moja glavna naloga pri tem projektu je bilo matematično modeliranje drobirskih tokov na obravnavanih vršajih. Ta široka interdisciplinarnost še dodatno kaže na kompleksnost pojava drobirskih tokov.

Glavna ideja tega projekta je bila ocena ogroženosti zaradi delovanja drobirskih tokov na štirih hudourniških pritokih Save Dolinke in sicer na hudournikih Suhelj, Presušnik, Bela in Trebiža. Na teh hudournikih so bile izvedene podrobne terenske in laboratorijske raziskave. Poleg tega pa je bil v okviru tega projekta izdelan tudi GIS model, ki je pokazal izpostavljenost nastanku drobirskim tokovom v Sloveniji. V nadaljevanju je podan pregled aktivnosti v okviru raziskave in povzetek zaključkov posameznih delov raziskav.

5.2.1.1. Opis pojava drobirskih tokov

V tem delu je bil podan splošen opis nastanka in dinamike drobirskih tokov. Več o tej temi je napisanega že v uvodnem poglavju naloge o drobirskih tokovih (poglavje 3), zato dodatnega povzetka o tej tematiki v tem delu ni.

5.2.1.2. Metode za izračun magnitude drobirskih tokov

V tem delu raziskave so opisane različne metode za izračun magnitude drobirskih tokov, ki omogočajo oceno magnitude drobirskega toka na hudourniku. Za izbrane štiri hudournike so bile z uporabo teh metod izračunane magnitude potencialnih drobirskih tokov. Samostojna raziskava teh metod in njihova uporaba na slovenskih hudournikih je bila izvedena leta 2005 (Sodnik 2005, Sodnik in Mikoš, 2006) in je podrobneje predstavljena v nadaljevanju.

5.2.1.3. Raziskava obravnavanih hudourniških vršajev

V tem delu je bila izvedena podrobna raziskava obravnavanih hudourniških vršajev. Izvedeni so bili, do 5 m globoki, sondažni izkopi materiala, ki je bil nato litološko in sedimentološko opredeljen. S pomočjo analize starosti so geologi poizkušali izvesti interpretacijo dogajanja na teh vršajih v preteklosti. Dodatno je bil opravljen tudi terenski ogled zaledja vseh izbranih hudournikov in pripravljen litološki opis zaledja z opredelitvijo mest možnega nastanka drobirskih tokov v teh hudourniških območjih.

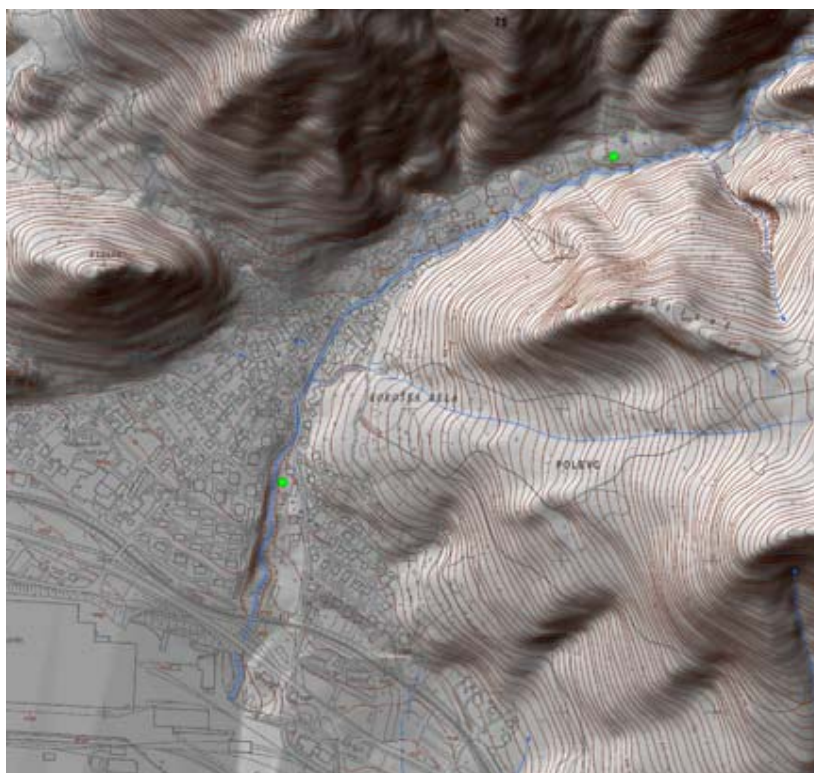
Na vsakem vršaju so bili izvedeni dva do trije izkopi, pri čemer je analiza zajemala naslednje postopke:

- detajlni terenski popis sedimenta v izkopu
- odvzem vzorcev za litološke analize
- odvzem vzorcev za datacije z OSL
- odvzem vzorcev za datacije s ^{14}C
- analize usmerjenosti klastov
- litološke analize
- datacija

Cilj omenjenih raziskav je bila rekonstrukcija dogodkov v preteklosti, ki so nanašali sedimente na vršaj. Med takimi dogodki so lahko tudi drobirski tokovi. V nadaljevanju je prikazan postopek dela na hudourniku Bela, ki je v tej nalogi v nadaljevanju tudi najbolj podrobno obravnavan.

5.2.1.3.1 Sondažni izkopi na vršaju

Na vršaju Bele sta bila izvedena dva izkopa, katerih pozicija je prikazana na sliki v nadaljevanju. V obeh izkopih je bil popis material, na podlagi katerega so bili zapisani nekateri zanimivi in pomembni zaključki.



Slika 20 : Prikaz mest izkopov na vršaju hudournika Bela (CRP 2008).
Fig. 20: Survey excavation points on Koroška Bela fan.

Zgornji sondažni izkop:

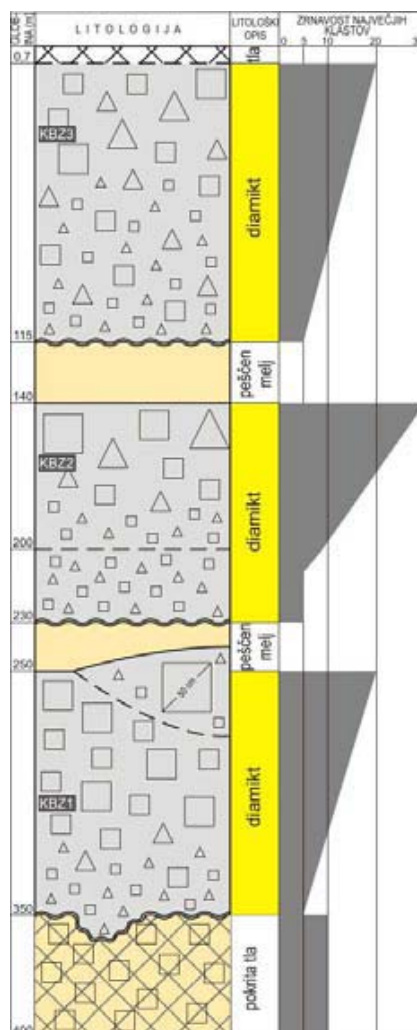
Zgornji izkop na vršaju Bele je globok 4 m. Izkopan je bil v proksimalnem delu vršaja v že nekoliko razširjeni strugi Bele. V spodnjem delu se profil začneja z do 50 cm debelim pedogeniziranim diamiktom. Pokrita tla pokriva nad erozijsko mejo približno 1 m debela diamiktna plast z inverzno gradacijo, ki na vrhu z jasno mejo preide v peščen melj. Enako zaporedje se ponovi še enkrat nad tem, profil pa se na vrhu zaključuje s tretjo plastjo inverzno gradiranega diamikta. Tipični klasti v spodnji in zgornji diamiktni plasti dosegajo velikost 20 cm, v srednji pa do 30 (CRP, 2008).

Zaključek na podlagi analiza popisanih sedimentov v zgornjem izkopu je bil sledeč:

V primeru opisanega sedimenta Bele gre po našem mnenju za tri zelo podobne dogodke drobirskih tokov, ki so se v dveh primerih po umiritvi dogajanja končali z odlaganjem melja v manjši zaježitvah, ki so ob tem nastale. Ocenjujemo, da so si trije dogodki sledili sorazmerno hitro, saj med njimi ni nobenih znakov pedogeneze. Pod opisanimi tremi dogodki leži sled najstarejšega dogodka. Na sedimentu slednjega so nastala dobro razvita tla, kar priča o

daljšem obdobju, ki je potekel preden, ga je pokrila sediment naslednjega dogodka. Ocenjujemo, da gre vsaj za nekaj 10.000 let, najverjetneje pa celo za nekaj 100.000 let brez sedimentacije na tej točki. Ker je dolina tu sorazmerno ozka in bi se večji drobirski tok skoraj zagotovo razlil po vsej širini doline ocenjujemo, da se v tem časovnem obdobju drobirski tokovi vzdolž Bele niso dogajali (CRP, 2008).

V nadaljevanju je za primer podan prerez zgornjega sondažnega izkopa, kjer so označene in poimenovane vse plasti v tem prerezu.



Slika 21: Profil zgornjega izkopa na hudourniškem vršaju Bela (CRP, 2008).
Fig. 21: Upper excavation sideview.

Spodnji sondažni izkop:

Globina spodnjega izkopa je 3.90 m. Izkopan je bil v osrednjem delu vršaja v Koroški Beli. Celoten profil je sestavljen iz diamikta, izjema je plast meljastega peska nad drugo diamiktno

plastjo. V diamiktu ni opazne gradacije, osnova pa se spreminja od glinasto meljaste, preko peščeno meljaste in peščene do diamikta brez osnove. Razlika med plastmi se pojavlja tudi v litološki sestavi klastov, kar nedvoumno kaže na različna izvorna območja drobirskih tokov, iz katerih so se posamezne plasti odložile. Plast meljastega peska kaže na manjšo zaježitev Bele po drugem dogodku. Večja prisotnost drobnozrnate komponente, sorazmerna kompaktnost sedimenta ter geografski položaj izkopa so dopuščali možnost, da gre za glacialni sediment. Takšno interpretacijo smo ovrgli z analizo usmerjenosti klastov. Dopuščamo pa možnost da gre predvsem pri diamiktih plasteh med 220 in 290 cm ter 130 in 200 cm za remobiliziran glacialni material iz zaledja Bele (CRP, 2008).

5.2.1.3.2 Pregled zaledja hudournika

Poleg sondažnih izkopov na vršajih pa je bil izveden tudi podroben pregled zaledja posameznih hudournikov. Geološka zgradba Karavank je odraz njihove lege med največjo alpsko prelomno cono – Periadriatskim lineamentom na severu in Savskim prelomom na jugu. Zaradi velikih horizontalnih premikov ob obeh prelomnih conah so se ustvarile ozke, več kilometrov dolge in strmo ležeče tektonske enote iz paleozojskih, mezozojskih in v manjši meri terciarnih klastičnih in karbonatnih kamnin, ki na preiskovanem prostoru potekajo v smeri vzhod – zahod. Paleozojske kamnine zaradi tektonske porušnosti globoko preperevajo, zato jih pokriva več metrov debel zaglinjen preperinski pokrov, ki pogosto plazi. Voda iz triasnih kamnin razmaka preperino paleozojskih klastitov ter na njih ležeča melišča in morene ter povečuje verjetnost proženja drobirskih tokov (CRP, 2008).

Podrobno so bila raziskana zaledja vseh štirih hudournikov, v nadaljevanju pa je podan povzetek rezultatov terenskega ogleda zaledja hudournika Bela.

Zaledje hudournika Bela sestavljajo paleozojski klastiti in karbonati ter triasne, pretežno karbonatne kamnine. Omenjene kamnine nastopajo v večih pasovih, ki so na obravnavanem območju široki do enega kilometra in usmerjeni v smeri severozahod – jugovzhod.

Hudournik Bela izvira zahodno od Potoške planine pri izviru Urbas na nadmorski višini 1290 m. Potoška planina se nahaja na strukturalni polici, ki jo sestavljajo zgornjekarbonsko – spodnjepermijski klastiti, pokriti z debelo plastjo zaglinjene preperine. Glavni greben

Karavank, severovzhodno nad paleozojskimi klastiti, je iz dachsteinskega apnenca. Iz apnenčevih sten se lomi in kotali drobir, ki se akumulira ob vznožju sten, na tektoniziranem črnem glinastem skrilavcu. Paleozojski klastiti so neprepustni. Na stiku z dachsteinskim apnencem se pojavljajo vodni izviri, ki namakajo stik med grušči in zaglinjene kamnine, kar pa povzroča plazenje gruščev in zgornjega dela zaglinjene kamnine. Na ta način sta na tem območju nastala dva večja plazova in sicer plaz na Potoški planini in plaz pod izviro Urbanas.

Plaz na Potoški planini je aktiven plitev plaz, širok okoli 100 metrov ter po padnici dolg vsaj 100 metrov. Debelina plazu, ki se je ponovno sprožil po ravnanju površine z buldožerjem pred nekaj leti, znaša nekaj metrov. Plaz se izteka v strugo potoka Sevnik, ki se zahodno od vasi Potoki izliva v akumulacijsko jezero Moste. Drobirski tok, ki bi se lahko sprožil iz tega plazu, bi bil verjetno manjših dimenzij (nekaj 10.000 m^3) in bi se izlil preko neposeljenih pobočij v akumulacijsko jezero HE Moste.

Veliko resnejši problem predstavlja aktiven plaz pod izviro Urbanas. Velikost omenjenega plazu je ocenjena na tri hektare, debelina le-tega pa na vsaj nekaj metrov. Drevje, ki je precej nagnjeno, kaže na aktivnost plazu. Ob ekstremnih padavinah bi lahko ob zdrsu dela ali celotnega plazu v dolino, splazelo preko 100.000 m^3 materiala, ki bi pobral s seboj še tistega, ki se nahaja v strugi. Drobirski tok bi po dveh kilometrih udaril v gosto naseljeno območje Koroške Bele, ki leži na vršaju hudournika Bela.

5.2.1.4. Geotehnične raziskave materiala izkopanega v sondažnih izkopih

Izkop sondažnih jam na hudourniških vršajih je bil poleg geološkega popisa sestave tal namenjen tudi odvzemu vzorcev za raziskave v geomehanskem laboratoriju. Osnovni namen geomehanskih raziskav je bila določitev lastnosti materiala, ki bi pomagale določiti reološke značilnosti drobirskih tokov na posameznem hudourniku, ki bi bile lahko uporabljene pri matematičnem modeliranju le-teh.

Z raziskavami so bili določeni naslednji parametri:

- naravna vlaga
- granulometrična sestava v celotnem zrnastnem območju,
- plastičnost finih zrn

- relacija strižna trdnost – vlaga (cu (kPa) – w (%)) na umetno pripravljenih kompozitih

Kmalu je bilo ugotovljeno, da na osnovi opravljenih analiz ni mogoče določiti reoloških lastnosti materiala v času nastanka drobirskega toka, saj je del trdnih delcev, ki so potovali s tokom, odplavilo dalje v smeri dolvodno in niso več prisotni na mestu sedanjih vršajev, kjer so bili izvedeni sondažni izkopi. Tudi zaradi same časovne razlike so se nekatere lastnosti materiala spremenile. Zaradi časovne odmaknjenosti dogodkov, so se spremenile tudi lastnosti materialov. Kljub temu, da niso bili izrednoteni eksaktni podatki za modeliranje, pa so bile z raziskavami pridobljene pomembne informacije, ki so predvsem v primerjavi z lastnostmi drobirskega toka v Logu pod Mangartom (Petkovšek 2002) zelo pripomogle k razumevanju problematike drobirskih tokov.

Najpomembnejši zaključki raziskav na hudournikih so bili sledeči:

Suhelj:

- glavnina materiala v vršaju Suhlja je po poreklu iz geološkega zaledja v karbonskih klastičnih kamninah
- zelo verjetno so bili sedimenti, odloženi ob potoku zgoraj, na globinah pod 2,5 m, odloženi iz plastičnega drobirskega toka
- zelo verjetno so bili sedimenti, odloženi ob potoku zgoraj, na globinah do 2,5 m odloženi z običajno hudourniško – potočno sedimentacijo
- material v spodnjem izkopu je tipičen predstavnik sedimenta, ki se odlaga v razlivnem območju drobirskega toka
- zrnavostna sestava materiala v vršaju zgoraj je taka, da bi se ob izrednih dogodkih, ta material lahko preobrazil v hitro tekoči drobirski tok

Koroška Bela:

- glavnina materiala v vršaju Koroška Bela je po poreklu iz geološkega zaledja v karbonatnih kamninah, dolomitu in apnencu.
- sedimente v spodnjem izkopu težko povežemo s pojavom drobirskega toka. Vsa debela karbonatna zrna so dobro zaobljena, površine zrn pa malo hrapave. Zgradba in značaj materiala v stenah izkopa ne kažejo na to, da bi sediment nastal iz enega ali več zaporednih drobirskih tokov. Značaj in plastičnost finih zrn kažejo bolj na to, da imamo opravka s presedimentiranimi ledenišskimi sedimenti.

- sedimenti v zgornjem izkopu so zelo verjetno – skoraj gotovo - nastali iz več manjših drobirskih tokov, za katere je bilo ustje pred vstopom v ožjo dolino že tudi razlivno območje. Debela zrna so primerljivo - glede na spodnje - območje veliko bolj oglata, tudi petrografska sestava je bolj pisana, predvsem je višja vsebnost zrn iz klastičnih kamnin. Mastna glina, ki so jo prekrili gruščnati sedimenti, bi lahko bila deluvijalnega izvora. Da smo v jašku zgoraj na sledi večjemu številu manjših drobirskih tokov, sklepamo tudi po tem, da ni prave povezave s sedimenti v spodnjem jašku. Morda so bili sedimenti iz toka na spodnjem delu odnešeni ob kakem drugem dogodku.

Presušnik:

- material v osrednjem delu vršaja Presušnik je tipična odkladnina zelo velikega hitrega plastičnega drobirskega toka. Po indicih bi to lahko bil del stranskih »nasipov« ki se izločajo iz toka vzdolž poti, še nad razlivnim območjem.
- material v izkopu spodaj je odkladnina, ki je po zrnivosti značilna za razlivno območje plastičnih drobirskih tokov.

Javorniški Rovt:

Spodnji del izkopa na Javorniškem Rovtu je izjemen kazalnik velikega, hitrega plastičnega drobirskega toka, odloženega v zgornjem ali srednjem delu svoje rušilne poti. Podobnost s sedimenti na plazu Stovže, severno od Mangartskega potoka, je izjemna.

V zaključku geotehnične raziskave so bili poleg pregledne primerjave materialnih lastnosti drobirskih tokov Log pod Mangartom, Slano Blato, Strug in Macesnik podani tudi naslednji zaključki.

Glede na rezultate raziskav sta potencialno najbolj nevarna Javorniški Rovt in Suhelj. Na tem mestu je potrebno ponovno poudariti, da so bili raziskani materiali odvzeti na vršajih, kjer so bili v preteklosti odloženi. Za bolj realne rezultate, predvsem pa za bolj uporabne z vidika matematičnega modeliranja, bi bilo bolj primerno analizirati materiale v zaledju obravnavanih hudournikov, ki bi podali rezultate za material, ki je res potencialno nevaren.

Z vidika potencialne nevarnosti, ocenjene na podlagi terenskega ogleda, pa je bil za najbolj nevarnega spoznan hudournik Bela, kjer je na višini nad 1000 m aktiven plaz. Karbonatni grušči s fino kameno moko, zelo dovzetni za vodo, drsijo po podlagi iz karbonskih klastičnih kamnin, ki so zaradi bližine prelomne cone močno tektonsko zgetene in porušene. Situacijo bi v geološkem smislu lahko primerjali s plazom – drobirskim tokom Macesnik, vendar je situacija nad Koroško Belo veliko bolj nevarna zaradi večjih padcev pobočja in velike ranljivosti razlivnega območja (CRP, 2008).

5.2.1.5. Matematično modeliranje drobirskih tokov na izbranih vršajih

Del raziskave je bilo tudi matematično modeliranje drobirskih tokov na izbranih hudourniških vršajih. Uporabljen je bil komercialni 2D matematični model Flo-2d, ki je podrobno predstavljen v poglavju 4. Glavni namen modeliranja je bila groba ocena ogroženosti obravnavanih vršajev zaradi delovanja drobirskih tokov in ugotovitev, da je možno z javno dostopnimi podatki o terenu in padavinah, dovolj natančno predvideti morebitne posledice delovanja drobirskih tokov. Več o samem postopku modeliranja in rezultatih bo napisanega v poglavjih o modeliranju in možnostih uporabe rezultatov za pripravo podrobnejših kart nevarnosti (poglavji 6 in 7).

5.2.1.6 Izdelava modela izpostavljenosti nastanku drobirskim tokovom v Sloveniji

V okviru raziskovalne naloge CRP je bil izdelan tudi model izpostavljenosti nastanku drobirskim tokovom v Sloveniji. Model je bil izdelan s programskim orodjem ArcGIS 9.2. Modelna celica je bila velikosti 25 m x 25 m. Rezultat tega dela raziskave je bila karta verjetnosti pojavljanja drobirskih tokov v Sloveniji in Karta izpostavljenosti drobirskim tokovom po slovenskih občinah.

Namesto statistično osnovanega pristopa je bila izbrana strokovno – ekspertna ocena in sicer so bila določena hudourniška območja, ki so potencialno nevarna za nastanek drobirskih tokov ob neugodnih razmerah. Pri tem ne gre toliko za napoved, kdaj se bo lahko drobirski tok sprožil, kolikor, kje sploh lahko nastane. Za izvedbo kvalitetne statistične analize v Sloveniji, žal, ne razpolagamo z reprezentativnostjo podatkov o pojavih drobirskih tokov, zato je bil edini možen pristop s strokovno oceno.

Dejavniki proženja so bili razdeljeni v inicialne in transportne. Inicialni so tisti dejavniki, ki so povzročilni: litološka zgradba terena, naklon terena, naklonski potencial in padavine. Transportni pa so tisti dejavniki, ki določajo gibanje: konkavnost oblike pobočja, energetski potencial vodotokov in razdalja od površinskega vodotoka.

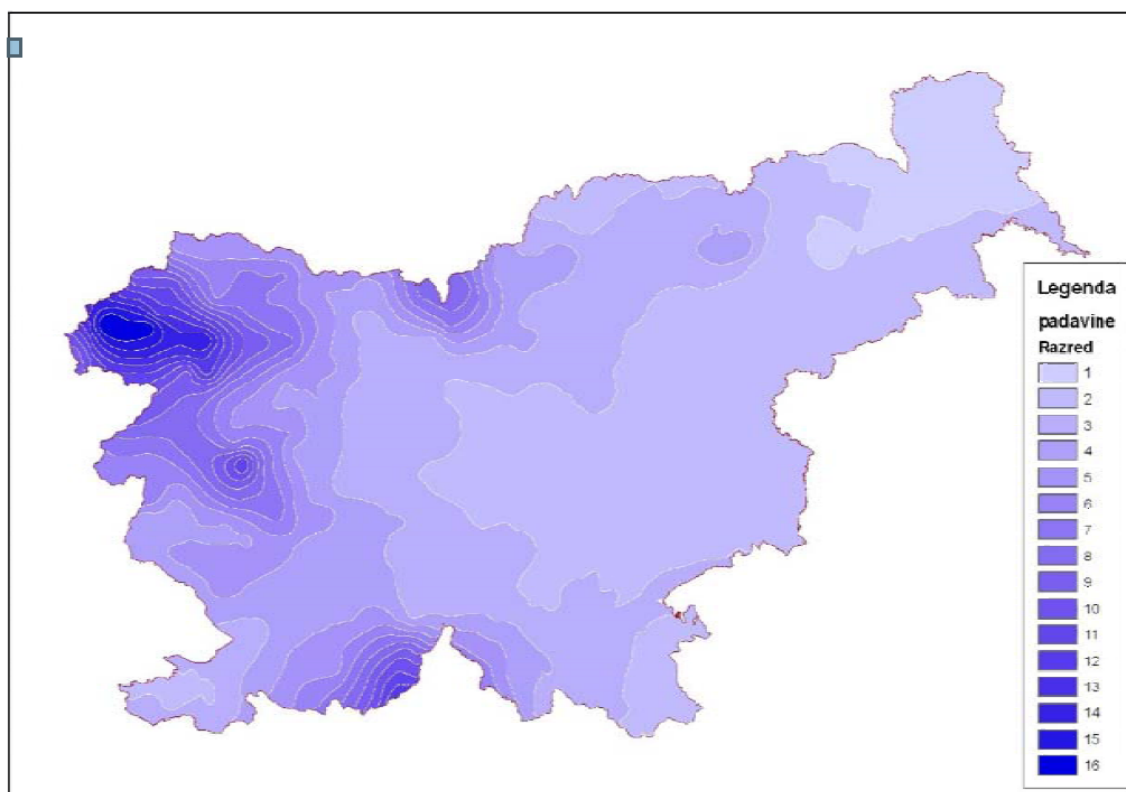
Na osnovi opravljenih prostorskih analiz na območju štirih pilotnih primerov in predhodnih izkušenj pri dosedanjih analizah ogroženosti je bil določen posamičen vpliv prostorskih dejavnikov na verjetnost pojavljanja drobirskih tokov. Posamezen prostorski dejavnik je bil razdeljen na razrede, ti pa so bili normalizirani. Z normalizacijo je bila zagotovljena enakost podatkov pred postopkom samega modeliranja. Kvaliteta modelov je bila preverjena s kontrolnim nizom desetih pojavov drobirskih tokov, ki so se že zgodili. Na koncu raziskave je bila pripravljena analiza, ki je pokazala, kolikšen odstotek površine posamezne slovenske občine je izpostavljen nastanku drobirskih tokov.

5.2.1.6.1 Opis sestave modela – izbira dejavnikov:

V nadaljevanju so naštet in na kratko opisani dejavniki, obravnavani v modelu. Pri vsakem dejavniku je bil izdelan grafični prikaz razredov posameznega dejavnika v Sloveniji. Za prikaz vpliva posameznega dejavnika so bile izdelane karte vplivov posameznih dejavnikov. V nadaljevanju je za primer take karte prikazana karta 48-urnih padavin, vse karte pa so podane v končnem poročilu raziskave (CRP, 2008).

- 48 urne padavine

Drobirski tokovi se pogosteje pojavljajo na območjih Slovenije, kjer nastopajo intenzivnejše padavine. Med kartami padavin je bila za nadaljnjo obdelavo in analizo izbrana karta 48-urnih maksimalnih padavin na območju Slovenije (50-letna povratna doba; obdobje izvornih podatkov 1961 – 2000). Ekstremne padavine z izjemno močnimi intenzitetami, ki so potrebne za nastanek drobirskega toka, so vezane na alpska in hribovita območja, kjer prihaja do intenzivnega dviganja vlažnega zraka in drugih učinkov konvekcije zračnih mas, kar povzroča povečanje intenzitete padavin. Padavine so bile razdeljene v 16 razredov in sicer glede na količino padavin v mm. Po normalizaciji razredov je bil določen vpliv posameznega razreda padavin (od 0 do 1).



Slika 22: Prikaz razredov padavin s 50 letno povratno dobo (CRP, 2008).
Fig. 22: 50-year return period precipitation classes.

- naklon pobočja

Naklon pobočja, na katerem se začne zemljinska masa gibati, je zelo pomemben faktor. Številne raziskave zemeljskih plazov so pokazale, da se zemeljski plazovi na naklonih 9° ali manjših, ne prožijo. Prav tako pa zgornjo mejo predstavlja kot 45° , saj se nad tem naklonom ne more nakopičiti dovolj preperelega materiala, da bi predstavljal grožnjo za proženje. Pri obravnavi tega dejavnika je bilo formiranih 7 razredov po stopnjah 6° .

- litološka zgradba območja

Za oceno vpliva litološke zgradbe terena oziroma za oceno občutljivosti kamnin na nastanek drobirskih tokov je bila kot osnovna karta privzeta geološka karta Slovenije v merilu 1 : 250 000. Ta karta deli slovensko ozemlje na 114 litostratigrafskih členov. Vsaka od litostratigrafskih enot je bila razvrščena v enega od 8 razredov. Pri določanju razredov tega dejavnika je bilo upoštevano, katere kamnine pogojujejo nastanek drobirskih tokov. Na potencialnem območju za nastanek drobirskega toka morajo biti izpolnjeni trije pogoji:

- obstajati morajo kamnine, ki dajejo grob kamninski material (drobir)

- kamnine, ki dajejo komponento drobne frakcije – to so gline, melji in peski
- ne sme prevladovati glinasta frakcija.

- naklonski potencial po višinskih pasovih

Pojavljanje drobirskih tokov v svetu je vezano na visoka skalna pogorja. Najbolj pogosti in največji nastopajo v območju Himalaje, v Andih in Alpah, pojavljajo pa se tudi v nižjih gorovjih. Podobno velja za Slovenijo, kjer pogostost in velikost drobirskih tokov pada z nadmorsko višino. Zato je bil kot eden od dejavnikov vpliva, ki je bil upoštevan v modelu napovedi, izdelan naklonski potencial terena glede na višinske pasove. Sloj nadmorskih višin, razdeljen v stometrske pasove, je bil prekrit s slojem naklonov pobočij. Presek dveh dejavnikov vpliva je podal nov generično pridobljen dejavnik, imenovan naklonski potencial po višinskih pasovih.

Povprečni naklon po višinskih pasovih 100 m je bil razdeljen v 8 razredov glede na standardni odklon in oceno vpliva razrednih razponov na izbranih lokacijah v Karavankah. Največja vplivna vrednost je bila pripisana razredu razpona med 21° do 46° , ki pa predstavlja najmanjši delež površine Slovenije.

- energetski potencial vodotokov

Ker so vodotoki pomemben transportni dejavnik pri pojavu drobirskih tokov, je bil energetski potencial izbran za enega izmed dejavnikov obravnavanega modela. Energetski potencial posameznega vodotoka je določen z razmerjem med njegovo višino in dolžino. Večja ko je vrednost tega razmerja, večja je možnost nastanka oziroma transporta materiala po nastanku drobirskega toka na inicialnem območju. Za vsak segment površinskega vodotoka je bil izračunan njegov povprečni naklon. Z uporabo metode gostote jedra (angl. Kernel Density) je bila glede na vrednost povprečnega naklona izračunan energetski potencial vodotokov, kar pomeni, da je bila vsakemu segmentu pripisana določena površina glede na vrednost povprečnega naklona. Vrednosti izračunanega rastrskega sloja so bile razdeljene v 9 slojev, ki so imeli predpisane vrednosti od 0 do 1.

- oddaljenost od površinskih vod

Potencialna možna žarišča drobirskih tokov morajo gravitirati v vodotok, da se lahko zgodi transport drobirskega materiala po njem v dolino. Čim bližje vodotoku je žarišče, tem večja je možnost, da material iz žarišča zdrsne v strugo po kateri lahko potuje kot drobirski tok. Glede na velikost celice rastrskih slojev modela, poznavanje dinamike drobirskih tokov ter izkušenj iz že znanih pojavov, so bili določeni razredi oddaljenosti 25 metrov od površinskih vodotokov. Vpliv oddaljenosti od površinskih vod je bil razdeljen v 4 razrede. Največji vpliv imajo območja oddaljena do 25 m, najmanjši pa območja oddaljena več kot 75 m,

- konkavnost površja

Morfološka oblikovanost terena je zelo pomemben dejavnik za možnost potovanja drobirskega toka v nižje lege. Na osnovi digitalnega modela višin je mogoče izločiti konkavne oblike terena, kot primerne oblike za potovanja drobirskih tokov. Dejavnik konkavnost površja je bil izvrednoten v dveh razredih z vrednostima 0 in 1.

5.2.1.6.2 Izdelava modela – izbor optimalnih kombinacij posameznih dejavnikov:

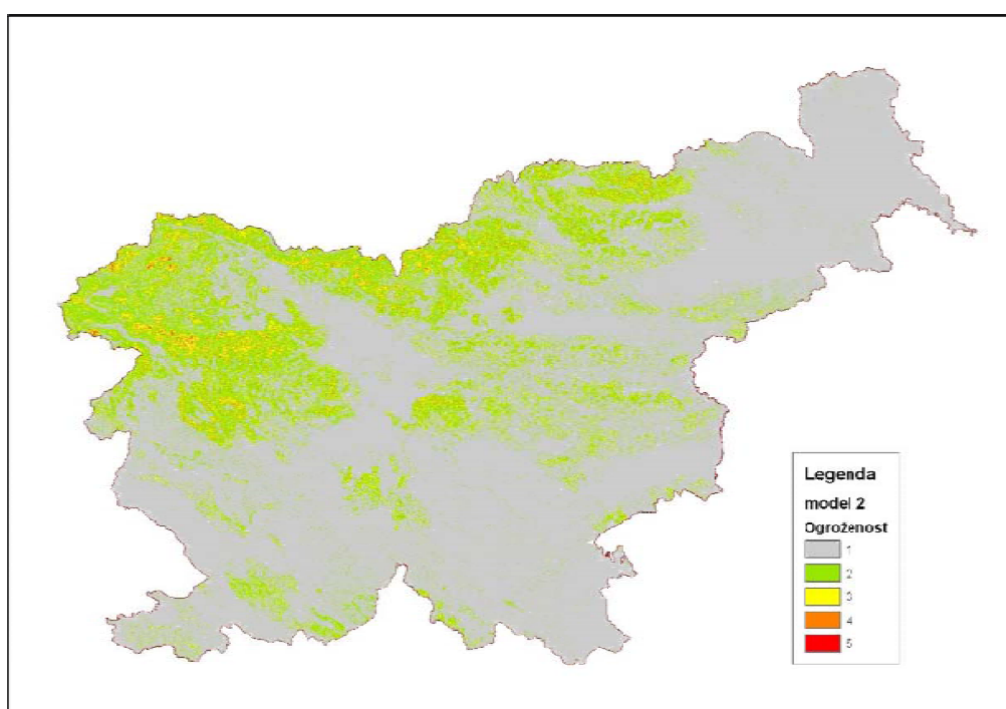
Cilj izdelave modela je bila karta verjetnosti ponavljanja drobirskih tokov v merilu 1:250 000. Vsakemu izmed dejavnikov je bila na strokovni podlagi predpisana utež. Vsota uteži je bila vedno enaka 1. Cilj je bil izdelava optimalnega modela napovedi pojavljanja drobirskih tokov.

S tem namenom je bil izdelanih več variant modela, ki so bili preizkušeni na 10 zabeleženih pojavih drobirskih tokov v Sloveniji. Za preverjanje modelov so bili uporabljeni naslednji primeri preteklih drobirskih tokov:

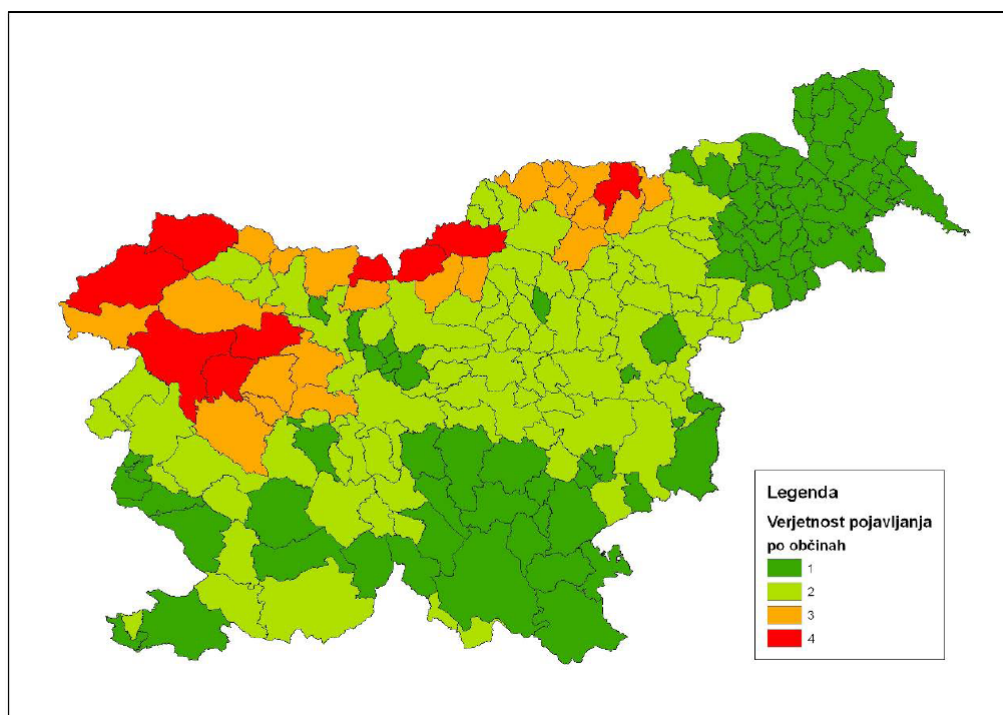
- Log pod Mangartom
- Čedca
- Ciprnik
- Kropa
- Lokavec (Slano Blato)
- Koseč
- Koroška Bela (Bela)
- Presušnik
- Suhelj

- Trebiža

Na podlagi primerjav modelov in zabeleženih dogodkov je bil izbran optimalen model (Model 2) in izdelani Karta verjetnosti pojavljanja drobirskih tokov v Sloveniji in Karta izpostavljenosti drobirskim tokovom po slovenskih občinah. Obe karti sta bili izdelani v merilu 1:250 000 in sta predstavljeni v nadaljevanju.



Slika 23: Karta verjetnosti nastajanja drobirskih tokov v Sloveniji M 1:250 000 (CRP, 2008).
Fig. 23: Debris flows triggering probability map M 1: 250 000.



Slika 24: Karta izpostavljenosti drobirskim tokovom v slovenskih občinah (CRP, 2008).
Fig. 24. Slovenian communes debris flow exposure map.

5.2.2 Metode za ocenjevanje ogroženosti z drobirskimi tokovi (povzeto po Sodnik, 2005, Sodnik in Mikoš, 2006)

Raziskava je bila izvedena v okviru izdelave diplomske naloge na dodiplomskem univerzitetnem študiju gradbeništva, hidrotehnična smer. Namen raziskave je bil pregled in predstavitev metod za izračun magnitude drobirskih tokov in raziskava možnosti uporabe le-teh na slovenskih hudournikih. Poleg predstavitve in uporabe metod na 24 slovenskih hudournikih, je bila izdelana tudi klasifikacija obravnavanih vršajev.

5.2.2.1 Metode za izračun magnitude

Raziskava je obsegala pregled metod za izračun magnitude drobirskih tokov. Kratek pregled teh metod je podan v nadaljevanju. Metode za ocenjevanje magnitude drobirskih tokov, ki so osnova za ocenjevanje nevarnosti in ogroženosti zaradi tega pojava, delimo na:

- empirične metode (npr. Takei, 1984; Kronfellner & Kraus, 1984; Marchi in D'Agostino, 2002), ki so namenjene oceni magnitude drobirskega toka
- morfološke metode (npr. Jackson et al., 1987; Marchi et al., 1993; Marchi in D'Agostino, 2002; Jakob, 2005), ki jih delimo na tiste, ki ocenjujejo magnitudo, in na

tiste, ki so namenjene določanju nevarnosti delovanja drobirskega toka na hudourniškem vršaju

- kombinirane metode (npr. Ceriani et al., 2000), ki so kombinacija različnih drugih metod, ki na podlagi statistične obdelave določijo odločilne parametre hudourniškega območja v obliki empirične enačbe za izračun magnitude drobirskega toka
- računalniške metode (npr. Schöberl et al., 2004), ki so računalniški programi, ki upoštevajo zalogo erozijskega drobirja v obravnavanem prispevnem območju in premestitveno zmogljivost hudournika z upoštevanjem odlaganja materiala v strugi hudournika.

Med različnimi metodami so bile izbrane najbolj primerne za slovenske hudournike. Za najbolj primerni sta se izkazali 2. metoda Marchi in D'Agostino 2002 in metoda Ceriani et al. 2000. Za nekatere izmed metod, ki zahtevajo za izračun magnitude tudi podatke o količinah vode, so bile potrebe dodatne hidrološke raziskave povodja. Izdelan je bil hidrološki model HEC-HMS, s katerim je bil na podlagi podatkov o 100-letnih padavinah izračunan celotni volumen odtoka vode. Metode so bile testirane tudi na že znanih preteklih primerih drobirskih tokov v Sloveniji (Log pod Mangartom in Koseč), kjer so se z določenimi prilagoditvami izkazale za uporabne. Sicer so bile metode uporabljene na 18 hudourniških pritokih Save Dolinke, dveh hudournikih na Pohorju ter hudournikih Brusnik, Ročica in Predelica, kjer so bili rezultati primerjani z realnimi dogodki.

Za hitro oceno magnitude so bile razvite tudi nove empirične zveze, ki omogočajo izračun magnitude ali specifičnega prispevka drobirja na km² povodja, samo na podlagi podatka o naklonu vršaja ali padcu struge hudournika.

Pri vseh metodah se je pokazala nujnost podrobnega pregleda zaledja hudournika in njegovega vršaja, saj so posamezni hudourniki lahko zelo specifični in prav te posebnosti lahko bistveno vplivajo na nastanek drobirskih tokov in njihovo magnitudo.

5.2.2.2 Klasifikacija obravnavanih vršajev

Poleg predstavitve in uporabe metod za izračun magnitude drobirskih tokov je bila v raziskavi predlagana tudi klasifikacija hudourniških vršajev glede na ogroženost zaradi delovanja

drobirskih tokov. Klasifikacija vršajev je podana glede na pogoje podane s strani več avtorjev (Marchi et al., 1993; Jackson et al., 1987).

Za klasifikacijo so bile izbrane sledeče meje: Meltonovo število = 0,3
naklon vršaja = 4° (7%)

pri čemer se Meltonovo število izračuna:

$$Mel = H * A_d^{-0,5} [-], \quad (Melton, 1965) \quad (12)$$

in je A_d površina prispevnega območja hudournika [km^2] in H višinska razlika le-tega [km].

Meje klasifikacije so bile določene na podlagi obdelave podatkov iz dogodkov v preteklosti. Dokazano je bilo tudi, da sta ti dve meji dovolj dober kriterij za klasifikacijo hudournikov na tri vrste. Hudourniki, ki so ustrezali obema kriterijema, so bili označeni kot hudourniki, katerih vršaj je ogrožen z drobirskimi tokovi. Hudourniki, katerih parametri niso presegli nobene od teh mej, so bili označeni za hudournike, katerih vršaji niso ogroženi. Hudourniki, ki ustrezajo samo enemu kriteriju, so bili označeni kot prehodni primer. To pomeni, da je nastanek drobirskih tokov možen, vendar je verjetnost tega dogodka relativno majhna.

Taka klasifikacija lahko služi kot pomoč pri določevanju, katere hudournike je potrebno bolj podrobno in prednostno obravnavati. Parametri za to klasifikacijo so enostavno določljivi bodisi iz topografskih kart, še bolj natančno pa je seveda določanje na terenu, ki pa ni vedno mogoče. Če hudourniški vršaj ni ogrožen z drobirskimi tokovi, je še vedno izpostavljen ostalim hudourniškim pojavom. Torej je razdelitev, ki je bila podana, namenjena izključno ocenjevanju ogroženosti z drobirskimi tokovi.

Rezultati klasifikacije 24 hudourniških vršajev, obravnavanih v tej raziskavi, so podani v preglednici 10, kjer so z odebeljeno pisavo označene vrednosti, ki so presegle izbrane mejne vrednosti posameznih parametrov.

Preglednica 10: Klasifikacija obravnavanih vršajev v tri razrede ogroženosti (Sodnik, 2005).
Table 10: Torrential fan classification (three risk classes).

povodje in hudourniki	Mel (-)	vršaj (%)	klasifikacija
SAVA			
Trebiža	0,298	4,157	prehodni primer
Krotnjek do Save	0,308	5,024	prehodni primer
Suhelj do Save	0,527	11,828	ogrožen vršaj
Velika Pišnica do Save	0,244	2,218	ni ogroženosti
Jurežev Graben do Save	0,613	11,842	ogrožen vršaj
Martuljek do Save	0,316	4,211	prehodni primer
Hladnik do Save	0,293	6,496	prehodni primer
Beli potok do Save	0,594	10,010	ogrožen vršaj
Belca do Save	0,254	5,182	ni ogroženosti
Bistrica do Save	0,250	1,448	ni ogroženosti
Mlinca do Save	0,438	8,100	ogrožen vršaj
Presušnik do Save	0,530	12,261	ogrožen vršaj
Dobršnik do Save	0,723	10,000	ogrožen vršaj
Jesenica do Save	0,241	3,382	ni ogroženosti
Ukova do Save	0,356	9,348	ogrožen vršaj
Javornik do Save	0,302	5,900	prehodni primer
Bela do Save	0,229	9,058	prehodni primer
Sevnik do Save	0,348	14,500	ogrožen vršaj
POHORJE			
Lobnica	0,150	5,607	ni ogroženosti
Lobničica	0,520	20,000	ogrožen vršaj
PREDELICA			
Predelica	0,672	9,200	ogrožen vršaj
KOSEČ			
Brusnik do Koseča	0,969	23,333	ogrožen vršaj
Brusnik do Ročice	1,038	30,769	ogrožen vršaj
Ročica	0,309	7,700	ogrožen vršaj

5.3 Karte območij delovanja drobirskih tokov

5.3.1 Predlog koncepta izdelave kart

V Sloveniji je bil sprejet Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti (UL RS 60/2007; v nadaljevanju Pravilnik), ki obravnava tudi poplavno in erozijsko problematiko hudournikov. Ker v to tematiko delno spadajo tudi drobirski tokovi, je na mestu, da se opravi pregled teh podobnosti, in se poišče možne podobnosti pri pripravi kart nevarnosti in območij delovanja drobirskih tokov. V tem delu naloge bo predlagan način izdelave različnih tipov kart območij delovanja drobirskih tokov.

Najprej je napisan kratek povzetek sprejetega določanja območij ogroženosti pri poplavah in eroziji. Postopek pri določanju območij in razredov ogroženosti je pri poplavah in erozijski problematiki sledeč. Najprej se pripravi opozorilna karta, kjer so označena območja, kjer je na podlagi prvih ocen možnost nastanka poplav in/ali erozije. Nato so določena območja pomembnega vpliva poplav in erozije, kjer je nato izdelana karta poplavne nevarnosti. Na podlagi karte nevarnosti je potrebno, na podlagi dogovorjenih mejnih vrednosti, določiti razrede nevarnosti. Za ta območja je izvedena analiza ranljivosti in so določeni razredi ranljivosti. S kombinacijo razredov nevarnosti in razredov ranljivosti so določeni razredi ogroženosti, za katere so v Uredbi o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja (UL RS 89/2008) določeni pogoji za dejavnosti in posege v prostor.

V tej nalogi so obdelani predlogi za izdelavo opozorilnih kart za različne tipe drobirskih tokov (pobočni in hudourniški) in podrobnejših kart nevarnosti za hudourniške drobirske tokove. Več o podrobnejši razdelitvi drobirskih tokov na oba tipa bo opisano v nadaljevanju tega poglavja. Karte ogroženosti v tej nalogi niso obdelane, saj je potrebno za oceno ogroženosti predhodno izdelati oceno ranljivosti, ki pa je pri drobirskih tokovih drugačna kot pri poplavah. Pri drobirskih tokovih so zelo pomembne udarne sile in pritisk na objekte oz. ogrožene subjekte. Analiza ranljivosti območij je bolj pravno kot pa gradbeno in geološko vprašanje, saj se je potrebno pri razredih ranljivosti odločiti, katera gostota prebivalcev na km² je tista mejna, in kateri tip objektov je za družbo bolj pomemben.

Glavni poudarek v tem delu naloge je na uporabi dvodimenzijskega matematičnega modela in možnosti uporabe rezultatov pri pripravi podrobnejših kart nevarnosti, kjer so določena območja nevarnosti. Med drugim uporabo matematičnega modeliranja za pripravo kart nevarnosti predvideva tudi Pravilnik za poplave in erozijo, medtem ko je za opozorilne karte delovanja drobirskih tokov podan samo okvirni predlog z rešitvami. Te so podrobneje opisane v nadaljevanju.

5.3.2 Delitev drobirskih tokov glede na mesto proženja

Kot je bilo napisano že pri delitvi drobirskih tokov glede na mesto nastanka (proženja), je prva delitev drobirskih tokov na hudourniške in pobočne. Podobna delitev je predlagana pri pripravi kart, vendar z določenimi dopolnitvami.

Glede na mesto proženja se torej delijo drobirski tokovi na pobočne in hudourniške. Glede na to, da se v tej nalogi ukvarjamo z ocenjevanjem nevarnosti na hudourniških vršajih, je pomemben dejavnik poleg nastanka še način gibanja drobirskega toka. Hudourniški drobirski tokovi so že zaradi mesta proženja vedno vezani na hudourniško strugo, medtem ko sta pri pobočnih drobirskih tokovih dve možnosti. Ena je, da se drobirski tok sproži, potuje in ustavi na pobočju in gre za podoben potek dogodkov kot pri zemeljskih plazovih, le da je gibanje hitrejše. Zaradi večje hitrosti je običajno doseg tega pojava, v primerjavi z drugimi oblikami plazenja tal, daljši. Druga možnost pa je, da se pobočni drobirski tok sproži na pobočju, potuje v strugo hudournika in nato podobno kot hudourniški drobirski tok potuje po strugi. Zato je predlagana delitev drobirskih tokov na dve skupini – na tiste, ki se gibljejo po hudourniških strugah in na tiste, ki se gibljejo po pobočjih.

5.3.2.1 Hudourniški drobirski tokovi

nastanejo ob visokih pretokih, ko voda mobilizira oz erodira erozijski material, ki se v obliki drobirskega toka giblje po hudourniški strugi in se razlije na vršaju na prehodu hudourniške struge v položnejše dolinsko dno reke ali večjega potoka. Pri pripravi kart spadajo v skupino hudourniških drobirskih tokov tudi tisti pobočni drobirski tokovi, ki zaradi bližine hudournika svojo prvotno pot po pobočju nadaljujejo po strugi in se podobno kot originalni hudourniški drobirski tokovi razlivajo na hudourniških vršajih. Ta skupina tokov bo v nadaljevanju naloge imenovana pobočno-hudourniški drobirski tokovi in bo pri predlogu priprave kart nevarnosti obravnavana skupaj s hudourniški drobirski tokovi, upoštevajoč specifične lastnosti (večji maksimalni pretoki in krajši čas trajanja dogodka). Pobočno-hudourniški drobirski tokovi spadajo v skupino hudourniških drobirskih tokov predvsem zaradi vpliva na hudourniške vršaje, ki so središče zanimanja te naloge.

5.3.2.2 Pobočni drobirski tokovi

so tokovi, ki se prožijo na pobočjih in se gibljejo po pobočjih in ne končajo v hudourniških strugah, kjer bi lahko nadaljevali pot do vršaja. Taki drobirski tokovi ne predstavljajo neposredne nevarnosti za morebitno poselitev in infrastrukturo na vršaju, lahko pa seveda povzročijo težave na pobočju oziroma vznožju pobočja, če ga dosežejo.

V tej nalogi je osrednja pozornost namenjena skupini hudourniških drobirskih tokov, ki ogrožajo poselitev in infrastrukturo na hudourniških vršajih, zaradi katere bi bilo treba z uporabo matematičnega modeliranja pripraviti karte nevarnosti.

V nadaljevanju so predstavljeni predlogi za pripravo opozorilnih kart in kart nevarnosti za vsak tip drobirskega toka posebej, pri čemer je za opozorilne karte podan samo okvirni predlog rešitve, za pripravo kart nevarnosti pa je obširno predstavljen celoten postopek modeliranja in občutljivostna analiza modela s komentarjem. Namen predstavitve modeliranja je predvsem prikaz možnosti uporabe matematičnega modela za pripravo kart in kakšne so težave in omejitve predlaganega sistema.

5.3.3 Predlog priprave različnih vrst kart

5.3.3.1 Opozorilne karte območij delovanja drobirskih tokov

5.3.3.1.1 Namen opozorilnih kart

Namen opozorilnih kart pri drobirskih tokovih naj bi bil podoben kot pri poplavah in eroziji. Na opozorilnih kartah je treba določiti območja, kjer je možnost nastanka drobirskih tokov in s tem določitev območij, kjer je treba izdelati karte nevarnosti. Pravilnik za poplave in erozijo predvideva za opozorilne karte merilo 1:50.000 ali manjše. Merilo opozorilne karte pri drobirskih tokovih bi lahko bilo načeloma enako, je pa treba pri opozorilnih kartah ločiti skupini hudourniških in pobočnih drobirskih tokov.

Za opozorilno karto bi bila lahko z določenimi dopolnitvami uporabna karta verjetnosti nastanka drobirskih tokov, ki je bila razvita v raziskavi Ocena ogroženosti zaradi delovanja drobirskih tokov ob uporabi GIS-a (geografskega informacijskega sistema) (CRP, 2008). Izdelava modela verjetnosti nastajanja drobirskih tokov je podrobneje predstavljena v enem

od prejšnjih poglavij. Izdelava opozorilnih kart bi morala potekati ločeno za pobočne in hudourniške drobirske tokove.

5.3.3.1.2 Opozorilna karta pobočnih drobirskih tokov

Ta karta bi bila izdelana za območja, kjer ni možnosti, da pobočni drobirski tok na svoji poti konča v strugi hudournika. Poleg spremembe merila, ki je v osnovni varianti 1:250.000, bi bile potrebne še nekatere druge spremembe modela. Najprej bi bilo treba ponovno pregledati vpliv posameznih dejavnikov in izločiti vpliv transportnih dejavnikov energetskega potenciala hudournika in razdalje od površinskega vodotoka. Pri pobočnih drobirskih tokovih hudourniki ne igrajo pomembne vloge, saj so že v definiciji omejeni na pobočja in ne na hudournike. S tem bi dobili v modelu celice potencialnega nastanka pobočnih drobirskih tokov. Pri pobočnih drobirskih tokovih bi bilo potrebno s pomočjo modela verjetnosti nastanka (CRP, 2008) določiti območja, kjer se lahko drobirski plazovi prožijo in na teh območjih s smerno puščico določiti smer potencialnega gibanja drobirskega toka. Območja na karti bi bila označena z različnimi barvami glede na verjetnost nastanka drobirskega toka, ki ga podaja napovedni model. Pri tem tipu karte bi šlo za precej podobno karto, kot je bila izdelana leta 2004 za zemeljske plazove (CRP, 2004). Izdelava opozorilne karte bi bila lahko v celoti izdelana z GIS orodji.

Glede na to, da je proženje pobočnih drobirskih tokov, ki niso v bližini hudournikov, praviloma omejeno na gorska strma pobočja, ki so ponavadi nenaseljena, ne bi bila potrebna izdelava karte nevarnosti. Izjemni primeri, kjer pa bi vseeno potencialni drobirski tok ogrožal naselje ali infrastrukturo, bi bila nujna izdelava ocene nevarnosti za vsak primer posebej. V teh primerih bi bili najbolj primerni matematični modeli za simuliranje zemeljskih plazov.

5.3.3.1.3 Opozorilna karta hudourniških drobirskih tokov

Osnovni namen opozorilne karte hudourniških drobirskih tokov bi bilo določanje hudournikov in njihovih vršajev, ki so ogroženi zaradi delovanja drobirskih tokov in kje je nujna nadaljnja analiza oz. izdelava kart nevarnosti. Pri hudourniških drobirskih tokovih bi bile, poleg dopolnitev modela za izdelavo opozorilne karte za pobočne drobirske tokove, nujne še dodatne dopolnitve. Ko bi bila izdelana karta za pobočne drobirske tokove, bi bilo treba na podoben način, kot je bilo v raziskavi CRP 2008 obdelano za slovenske občine,

analizirati delež potencialno nevarnih celic v prispevnem območju obravnavanega hudournika. Na tem mestu bi bilo treba določiti meje in prispevna območja hudournikov razdeliti med potencialno nevarne in nenevarne. Taka analiza bi pokazala, na katerih območjih bi lahko pobočni drobirski tok z nadaljevanjem gibanja po hudourniški strugi, dosegel vršaj.

V nadaljevanju je opisana bistvena razlika med opozorilno karto za hudourniške in pobočne drobirske tokove. Poleg analize prispevnega območja bi bilo treba na tej karti analizirati hudourniške vršaje in jih klasificirati v potencialno ogrožene in neogrožene. V klasifikaciji hudourniških vršajev, ki je opisana v poglavju 5.2.2.2, so vršaji razdeljeni v tri kategorije in sicer na ogrožene, neogrožene in prehodne vršaje. Ta klasifikacija je izvedena na podlagi dveh parametrov in sicer, naklon vršaja in Meltonovo število (Melton, 1965). Pri izdelavi opozorilne karte hudourniških drobirskih tokov, bi morala biti poleg analize zaledja hudournikov, izvedena tudi analiza vršajev, ki s svojimi lastnostmi kažejo na to, ali so se na tem mestu v preteklosti odlagali drobirski tokovi. Tak način klasifikacije je dovolj dober za opozorilno karto, predvsem pa je bistveno hitrejši in cenejši od terenskega sondiranja tal, ki je sicer bolj natančno in zanesljivo, a predrago. Ta dodatna morfološka analiza bi lahko pomagala izločiti tiste primere, kjer je hudourniško zaledje sicer nevarno, a vršaj kaže na to, da je konfiguracija zaledja in tudi struge hudournika takšna, da drobirski tokovi vršaja ne dosežejo.

S kombinacijo klasifikacije hudourniških območij in hudourniških vršajev bi lahko določili hudournike, ki so potencialno nevarni tako zaradi nastanka drobirskih tokov v zaledju kot tudi zaradi konfiguracije vršaja, ki kaže na delovanje drobirskih tokov v preteklosti. Taki hudourniki oz. njihova območja, bi bila označena na opozorilni karti kot nevarni, kar pa pomeni, da je potrebna nadaljnja obravnava in izdelava podrobnejših kart – kart nevarnosti zaradi delovanja hudourniških drobirskih tokov.

5.3.3.2 Podrobnejše karte nevarnosti zaradi delovanja hudourniških drobirskih tokov

Najprej je podan kratek pregled, kaj za karte poplavne in erozijske nevarnosti predpisuje Pravilnik. Karta nevarnosti je po Pravilniku detajlna karta v merilu 1:5.000 ali večjem, ki določa območja poplavne in erozijske nevarnosti na podlagi analiz verjetnosti za nastanek

naravnega pojava. Pravilnik predpisuje, da je potrebno določiti območja nevarnosti z metodami modeliranja in analiziranja, ki morajo ustrezati priznanemu stanju znanosti na podlagi hidroloških, geoloških, geomorfoloških in geodetskih podatkov ter podatkov o rabi tal in pokrovnosti. Izbira metod mora ustrezati dejanskim razmeram na območju in pričakovani natančnosti rezultatov. Za določitev območij poplavne nevarnosti so merodajni pretoki Q_{10} , Q_{100} in Q_{500} , medtem ko je za erozijsko nevarnost merodajen pretok Q_{100} . V primeru erozijske nevarnosti lahko najdemo povezave z drobirskimi tokovi, čeprav Pravilnik ne definira natančno, če v kategorijo erozijskih pojavov spadajo tudi drobirski tokovi ali ne.

Zaradi podobnosti erozijskih dogodkov, obravnavanih v Pravilniku, in pojava drobirskih tokov, je bila tudi pri naši raziskavi izbrana za merodajno 100-letna povratna doba oz. dogodki s 100-letno povratno dobo. V nadaljevanju bo podrobno prikazan postopek modeliranja drobirskih tokov, opis vhodnih podatkov in senzitivnostna analiza modela, ki bo pokazala vpliv posameznih parametrov na rezultate modela. Predvsem pa bomo skušali ugotoviti, do kakšne mere so rezultati modeliranja z uporabo javno dostopnih podatkov o terenu in padavinah, brez podrobnih terenskih raziskav, uporabni za pripravo podrobnejših kart nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov.

Določena dilema nastane že pri poimenovanju kart nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov. Karte nevarnosti so v Pravilniku jasno definirane in je zanje predpisano merilo 1:5.000 ali večje. V tej nalogi pa bo prikazana možnost izdelave kart nevarnosti za drobirske tokove z uporabo javno dostopnih podatkov, pri čemer ni moč napovedati končnega merila 1:5.000, zato bodo te karte nevarnosti zaenkrat poimenovane podrobne oz. podrobnejše karte nevarnosti, saj je termin karte nevarnosti zaenkrat preveč natančno definiran.

6 MODELIRANJE DROBIRSKIH TOKOV PRI PRIPRAVI PODROBNEJŠIH KART NEVARNOSTI

6.1 Kratek opis raziskave

6.1.1 Uvod

V tej nalogi je bil za modeliranje drobirskih tokov na izbranih hudourniških vršajih uporabljen prej opisani komercialni dvodimenzijski matematični model Flo-2D. Glavna ideja raziskave je bila ugotoviti, do kakšne mere oz. s kakšno natančnostjo je možno določiti ogroženost zaradi delovanja drobirskih tokov na hudourniških vršajih z uporabo matematičnega modela in podatkov o terenu in padavinah, ki so javno dostopni (Geodetska uprava RS, Agencija RS za okolje, Inštitut za vode RS). Predvsem pa, do katere mere so ti rezultati uporabni pri pripravi kart nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov, če uporabimo način priprave le teh, kot je predlagan v prejšnjem poglavju.

Modeliranje je bilo izvaedeno na vršajih štirih hudourniških pritokov Save Dolinke, na hudournikih Trebiža, Suhelj, Bela in Presušnik. V fazi modeliranja je bilo izdelanih preko 90 matematičnih modelov drobirskih tokov. Na vseh štirih hudournikih je bilo simuliranih več različnih možnih scenarijev dogodkov.

Kot glavno območje raziskave pa je bil izbran hudournik Bela na Koroški Beli. Ta hudournik je bil izbran iz več razlogov. Eden izmed bistvenih je predvsem ta, da je vršaj tipično hudourniški, da je gosto poseljen (vpliv hiš pri modelih), in da so bili na Beli prisotni drobirski tokovi (CRP, 2008). Leta 1789 se je po pisanju lokalnega duhovnika po porušitvi hriba Tschickla oblikoval drobirski tok, ki je zasul in porušil 40 do 50 hiš. Več ljudi je izgubilo življenje. Debelina nanosov naj bi na nekaterih mestih znašala tudi po več metrov. Najbolj pa je pomembno dejstvo, da sta bila nad naseljem Koroška Bela med raziskavo odkrita dva plazova, od katerih se lahko eden v primeru sproženja preoblikuje v drobirski tok, gibanje nadaljuje po hudourniku Bela in neposredno ogrozi naseljeno območje vršaja. Poleg tega je vršaj gosto poseljen, kar je omogočilo tudi analizo vpliva hiš in objektov na model. Iz

teh razlogov je bil hudournik Bela podrobno obdelan in je bilo na tem hudourniku izdelanih skoraj 70 variant modela. Na podlagi občutljivostne analize so bili povzeti zaključki o delovanju modela, vplivu posameznih faktorjev in možnostih uporabe matematičnega modeliranja pri pripravi podrobnejših kart nevarnosti.

6.1.2 Potek raziskave

Prvi del raziskave je potekal v okviru raziskave CRP 2008 na hudournikih Trebiža, Presušnik Bela in Suhelj, kjer je bilo izvedenih več variant modelov na vsakem izmed obravnavanih hudournikov. V tem delu so bili obravnavani samo originalni hudourniški drobirski tokovi, testiran pa je bil vpliv naslednjih parametrov modela:

- nastavitve kontrolnih parametrov modela
- pozicija vhodnega hidrograma na računski mreži
- Manningov koeficient hrapavosti n_g

V drugem delu raziskave pa je modeliranje potekalo samo še na hudourniku Bela. V tem delu raziskave je bil testiran vpliv naslednjih parametrov:

- velikost računskih celic
- različni načini modeliranja vpliva objektov na vršaju
- različni reološki podatki (strižna trdnost τ in viskoznost η)

Poleg testiranja vpliva omenjenih parametrov so bili v drugem delu raziskave modelirani tudi hudourniško-pobočni drobirski tokovi z različnimi magnitudami in maksimalnimi pretoki. Pri modeliranju velikih magnitud oz. velikih pretokov pri hudourniško-pobočnih drobirskih tokovih so se pojavile določene posebnosti, zato so bile za hudourniško-pobočne drobirske tokove dodatno analizirane različne možnosti nastavitvev modela.

Glavni cilj tega dela naloge je bil preveriti možnost uporabe komercialnega matematičnega modela za pripravo kart nevarnosti, z uporabo vhodnih podatkov, ki so javno dostopni in zanje niso potrebne dodatne raziskave. Zato je bilo potrebno pri modelu analizirati vpliv posameznih vhodnih parametrov in predvsem ugotoviti natančnost rezultatov modelov, kjer so uporabljeni samo javno dostopni podatki o terenu, padavinah in ostalih parametrih.

Na tem mestu je potrebno poudariti, da je bilo v tej nalogi izvedeno modeliranje samo na hudourniških vršajih in smo predpostavljali, da celotna sprožena masa drobirskega toka pripotuje do vršaja, kjer se razlije. Pri tem ni upoštevano, da se lahko del drobirskega toka ustavi v strugi nad vršajem in sploh ne pripotuje do vršaja. To pomeni, da smo v tej nalogi upoštevali najslabši možni scenarij, na katerega je potrebno pripraviti ocene nevarnosti in ogroženosti.

6.2 Predstavitev vhodnih podatkov

V tem delu so predstavljeni tisti vhodni podatki, ki so osnovni sestavni del modela. V to skupino spadajo podatki o terenu (geometrija), podatki o pretokih hudournikov (hidrologija) in podatki o količinah sproščenega materiala (magnituda), ki so močno povezani s hidrološkimi podatki. O ostalih parametrih modela kot je gostota računske mreže, koeficient hrapavosti n_g , pozicija in lastnosti vhodnega hidrograma, reološki parametri (τ in η) ter kontrolni in stabilnostni parametri modela - ki so sicer prav tako vhodni podatki -, so zaradi svoje narave obdelani v poglavju o postopku modeliranja in senzitivnostni analizi modela. Vhodni podatki, obdelani v tem poglavju, imajo vsak svojo obsežno razlago, ki je podana v nadaljevanju, parametri, obravnavani kasneje, pa so bili izbrani na podlagi inženirske presoje in literature in za njihovo določitev ni bilo izvedenih nobenih dodatnih raziskav, kot so bile za nekatere od vhodnih podatkov, obrazloženi v tem delu. Podoben potek dela je bil pri samem modeliranju, kjer se je najprej izbralo podatke o terenu DMV, se odločilo za vhodni hidrogram (Q_{100}) in se določilo magnitudo dogodka, glede na izbran scenarij. V nadaljevanju pa je bil posamezni, tako izdelan model, obdelan podrobno in so bile na enem modelu preizkušene različne vrednosti ostalih vhodnih ali kontrolnih parametrov (občutljivostna analiza).

6.2.1 Geometrija (podatki o terenu)

Ker za morebitno izdelavo kart nevarnosti ni realno pričakovati, da bodo vsa hudourniška območja in njihovi vršaji, ki bodo v opozorilnih kartah označeni kot potencialno nevarna, natančno geodetsko posneti in detajlno izmerjeni - kar bi pomenilo najboljše in najnatančnejše vhodne podatke za modeliranje drobirskih tokov -, so bili v tej raziskavi uporabljeni podatki o topografiji terena, ki so javno dostopni in pripravljeni za vso Slovenijo. Na Geodetski upravi

RS imajo izdelane digitalne modele višin DMV v resolucijah 25 m, 12,5 m in 5 m. V naši raziskavi smo v veliki večini primerov uporabili DMV5, ki ima največjo gostoto posnetih višinskih točk, na podlagi katerih je bila nato izdelana računska mreža modela.

Omenjeni model višin smo izbrali predvsem zaradi dostopnosti in cenovne ugodnosti, saj bi na primer, sicer precej bolj natančno snemanje LIDAR, pomenilo bistveno večji strošek. Ta strošek bi bil v primeru širše uporabe, kar kartiranje celotnega območja hudournikov v Sloveniji nedvomno je, zelo velik finančni zalogaj. Poleg tega pa je bilo že na začetku omenjeno, da je bil namen te raziskave predvsem pokazati, kolikšno natančnost napovedi nevarnosti je moč doseči z uporabo že pripravljenih podatkov o topografiji terena po Sloveniji.

Na tem mestu velja poudariti, da natančna geometrija struge v omenjenih podatkih ni zajeta, ampak je višinsko posneta kot del površja. To lahko v določenih primerih pomeni tudi težave. Predvsem ima ta »napaka« večji vpliv pri dogodkih z manjšo povratno dobo, kjer so maksimalni pretoki manjši. Posledično pa so manjše tudi globine in poplavljenе površine in lahko se zgodi, da se tok razliva izven struge že pri manjših pretokih, kot bi se realno. V tej nalogi so bili modelirani samo dogodki z daljšo povratno dobo in je imela pomanjkljiva geometrija struge zato manjši vpliv na rezultate modela. Povedati je tudi potrebno, da podatki o terenu, uporabljeni v tej nalogi, niso dovolj natančni za načrtovanje omilitvenih ukrepov.

V zaključku analize modela, v kateri so podrobno analizirani posamezni parametri modela, so opisane vse prednosti in slabosti uporabljenih podatkov o terenu. Predvsem pa je napisano, kakšne bi lahko bile morebitne izboljšave, ki bi lahko še povečale natančnost rezultatov modela in s tem ocenjevanja nevarnosti na ogroženih območjih.

6.2.2 Hidrologija (podatki o visokih vodah)

Eden glavnih vhodnih podatkov so bili podatki o visokih vodah, saj je s količino vode močno pogojena tudi maksimalna količina drobirja, ki se lahko transportira v obliki drobirskega toka. Več o določanju količine sproščenega materiala bo napisano v opisu izbora magnitud v naslednjem poglavju. Pri določanju vhodnega hidrograma modela so bile za merodajne

izbrane visoke vode s povratno dobo 100 let oz. Q_{100} , ki so merodajen podatek tudi pri določanju poplavnine in erozijske nevarnosti v Pravilniku (UL RS 2007).

Za model Flo-2D je bilo potrebno za vhodni podatek pripraviti hidrogram $Q(t)$. Nekaj o pripravi vhodnega hidrograma za model Flo-2D je napisanega tudi v poglavju o modelu in o pripravi vhodnih podatkov. Ker hidrogrami za 100-letne visoke vode za obravnavane hudournike niso bili na voljo, je bil uporabljen hidrološki model HEC-HMS, s katerim je bil na podlagi javno dostopnih podatkov o padavinah na bližnjih dežemernih postajah in podatkih o maksimalnih pretokih Q_{100} (hidrološka študija obravnavanih območij) izdelan hidrološki model povodij, s katerim je bil določen hidrogram $Q(t)$ za posamezno povodje. V hidrološki študiji so na voljo tudi podatki o samem hudourniku in o hudourniškem območju. Podane so tudi meritve padavin na padavinskih postajah in pretokov na vodotokih. Omenjeno hidrološko modeliranje z modelom HEC-HMS je bilo izvedeno v okviru raziskave (Sodnik, 2005) in je v nadaljevanju na kratko povzeto.

6.2.2.1 Kratek opis obravnavanega območja

Obdelani so bili pritoki Save Dolinke od izvira do akumulacijskega bazena HE Moste. Z leve strani Sava Dolinka dobiva krajše pritoke, z desne pa znatno daljše, vendar jih je manj. Levi pritoki, ki so obravnavani tudi v tej raziskavi, prihajajo s Karavank, ki so zelo razgibane, pobočja večinoma strma, medtem ko je gole skale malo. Gorovje skoraj nima urezanih pravih dolin, marveč le grape, ki se vzpenjajo strmo od glavne doline proti površju. Vse to povzroča, da voda naglo odteka po pobočjih in grapah navzdol. Vodni odtok ima zaradi tega pretežno hudourniški značaj. S seboj prinaša razmeroma veliko drobirja ter z njim gradi vršaje v glavno dolino. Grape ob hudournikih pa so tesne, strme in večinoma skalnate.

Savsko porečje na desni strani je v mnogih pogledih drugačno. Pritokov je manj, a so daljši. Tu so visoke Julijske Alpe, ki so skoraj 1000 m višje od Karavank. Tu je velik del površja iz visokogorskega sveta, sama gola skala, razjedena in priostrena in brez kakršnekoli vegetacije. Globoko vrezane doline segajo prav pod glavni greben. Nadmorska višina njihovega dna se nahaja med 700 in 1000 m. Te doline so v svojem dnu na debelo pokrite z drobirjem in gruščem, ki se posipa iz velikih melišč, s fluvioglacialnim drobirjem in morenami, s pasovito glino, usedlino ledeniških jezerc, kakor tudi z najnovejšim prodom. Ta prodnata nasipina je

tako debela, da izgine v nekaterih gorskih dolinah vsa deževnica in vsa snežnica v notranjost kamnitega drobirja, na dan pa prihaja šele v spodnjem koncu. Le v dveh dolinah ostaja odtok trajno na površini (VGI, 1995).

6.2.2.2 Predstavitev vhodnih podatkov

Padavine (VGI, 1995):

V povodju Save Dolinke je sicer padavinskih postaj osem, a so le tri opremljene z ombrografi - Rateče-Planica in Javorniški Rovt od leta 1966 in Lesce-Hlebce od leta 1981. Za obravnavo hudournikov sta primerni samo prvi dve postaji.

V hidrološki študiji so podane stoletne padavine. Te so podane za trajanje 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 360, 540, 720, 900, 1080 in 1440 minut. To so padavine, podane na podlagi analize od leta 1966 do leta 1993. Za vsak obravnavan hudournik je bila določena najbližja padavinska postaja, katera je bila upoštevana v nadaljnji raziskavi.

V preglednicah 11 in 12 so podane le padavine, ki so v programu zahtevane za izračun.

Postaja: 035 - Javorniški Rovt

Preglednica 11: padavine na postaji Javorniški Rovt.

Table 11: data from Javorniški Rovt precipitation station.

Povratna doba	5	15	60	120	180	360	720	1440
100	22,5	34,0	57,5	74,5	86,8	112,7	146,3	190,0

Postaja: 051 – Rateče – Planica

Preglednica 12 : padavine na postaji Rateče – Planica.

Table 12: data from Rateče-Planica precipitation station.

Povratna Doba	5	15	60	120	180	360	720	1440
100	15,1	25,2	48,1	66,5	80,4	110,5	138,9	174,6

- Pretoki (VGI, 1995):

V hidrološki študiji so tudi podatki o stoletnih pretokih hudournikov, ki so podani v preglednici 13:

Preglednica 13: Podatki o stoletnih pretokih za obravnavane hudournike na Savi Dolinki.
Table 13: 100-year return period discharges on researched torrents.

hudournik	Q_{100} [m ³ /s]
Trebiža	40
Suhelj	23
Presušnik	38
Bela	52

6.2.2.3 Priprava podatkov za model HEC-HMS

Za pripravo podatkov je na voljo veliko število metod, a ker so posamezne metode omejene z različnimi faktorji, kot so padec terena, padec struge, lastnosti obravnavanega površja, so bile nekatere izmed njih označene za izračune kot neprimerne. Na podlagi primerjave rezultatov različnih metod je bila za najprimernejšo določena metoda SCS.

Število CN je bilo določeno na podlagi značilnosti površja, kot so odstotek gozda, travnikov, grmovja in skal. Ta vrednost je bila začetna, saj je bila kasneje prilagojena glede na izračunan pretok.

Preglednica 14: Podatki o povodjih hudournikov na Savi Dolinki (VGI, 1995).
Table 14: Researched torrental bassins data.

povodje	dežemerna postaja	površina	teren	vodotok	
		(km ²)	(%)	(km)	(%)
Trebiža	Rateče-Planica	5,3	38	3,8	8,6
Suhelj	Rateče-Planica	1,9	57	3,2	16,9
Presušnik	Javorniški Rovt	4,7	49	4,1	21,2
Bela	Javorniški Rovt	6,2	52	3,9	11,9

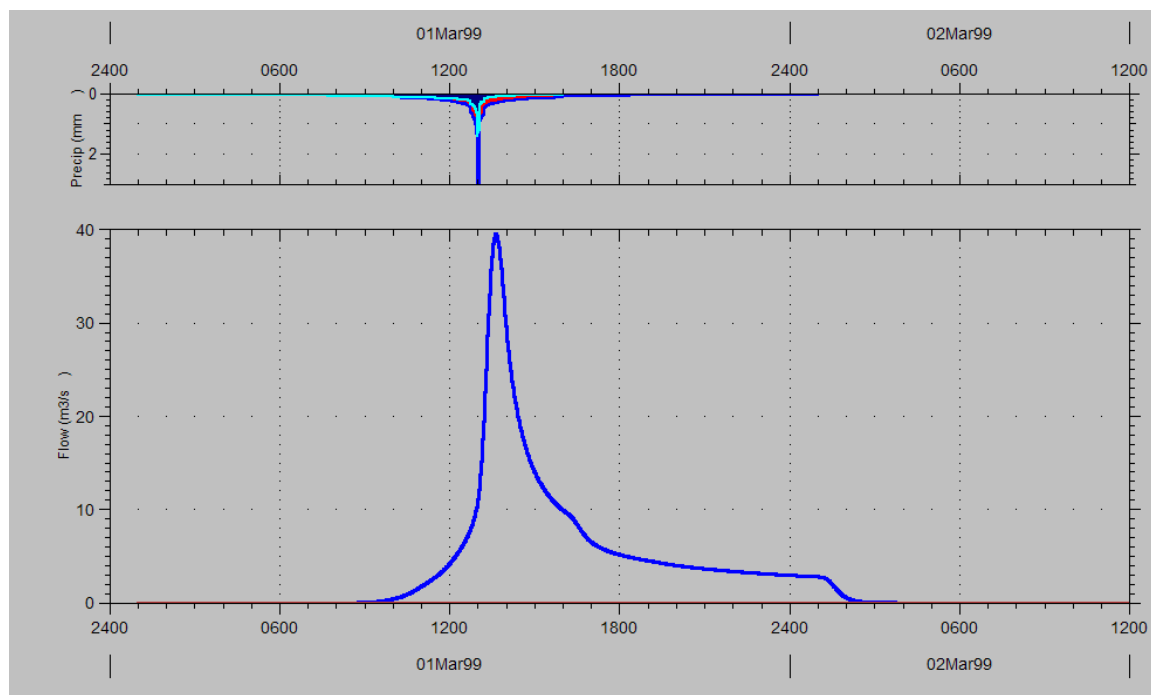
6.2.2.4 Potek modeliranja odtoka padavin

Potek modeliranja je bil naslednji: vnešeni so bili izračunani vhodni parametri in podatki, dobljeni iz hidrološke študije. Program je zmodeliral sintetični hidrogram. Nato je bil model s spreminjanjem števila CN sorazmerno povečan na pretoke Q_{100} iz hidrološke študije.

6.2.2.5 Rezultati

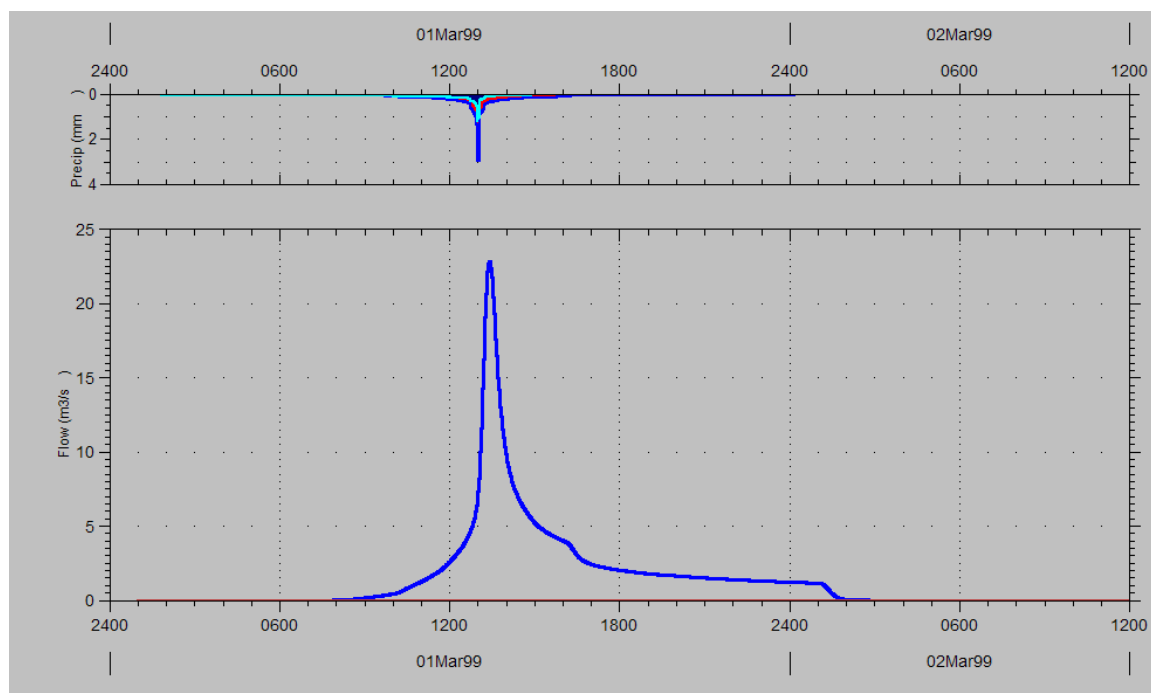
Na slikah 25-28 so prikazani hidrogrami, modelirani s programom HEC-HMS, za vsak hudournik posebej.

TREBIŽA



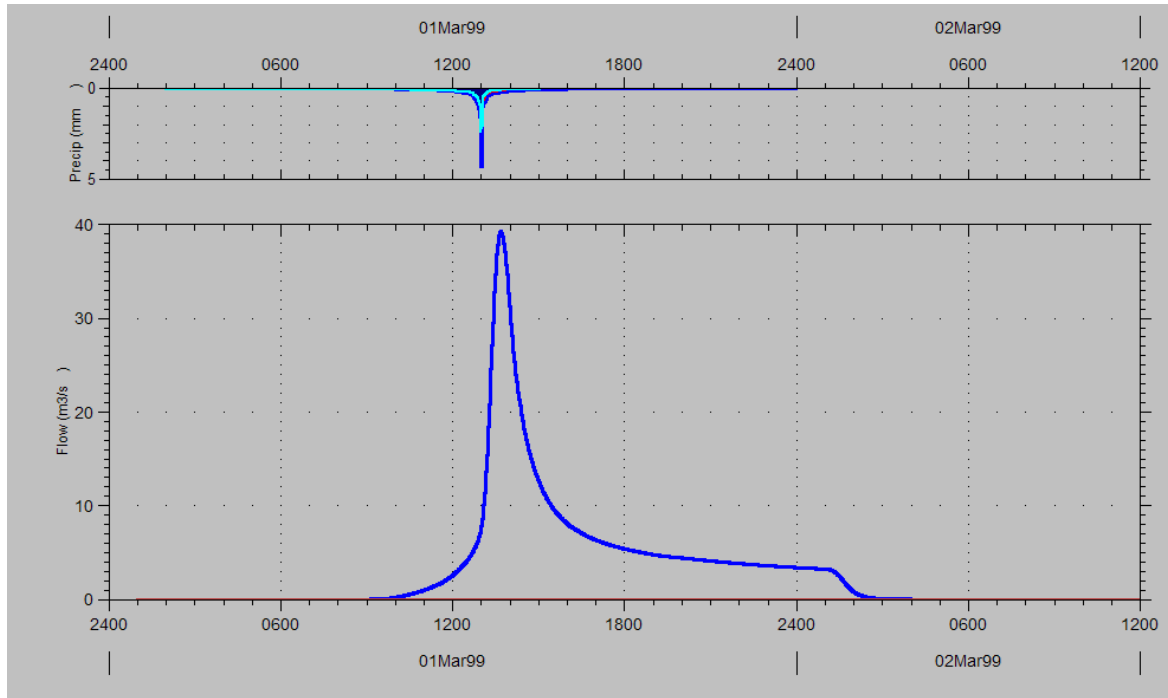
Slika 25: Hidrogram odtoka za Trebižo (Sodnik, 2005).
Fig. 25: Runoff hydrograph for Trebiža torrent

SUHELJ



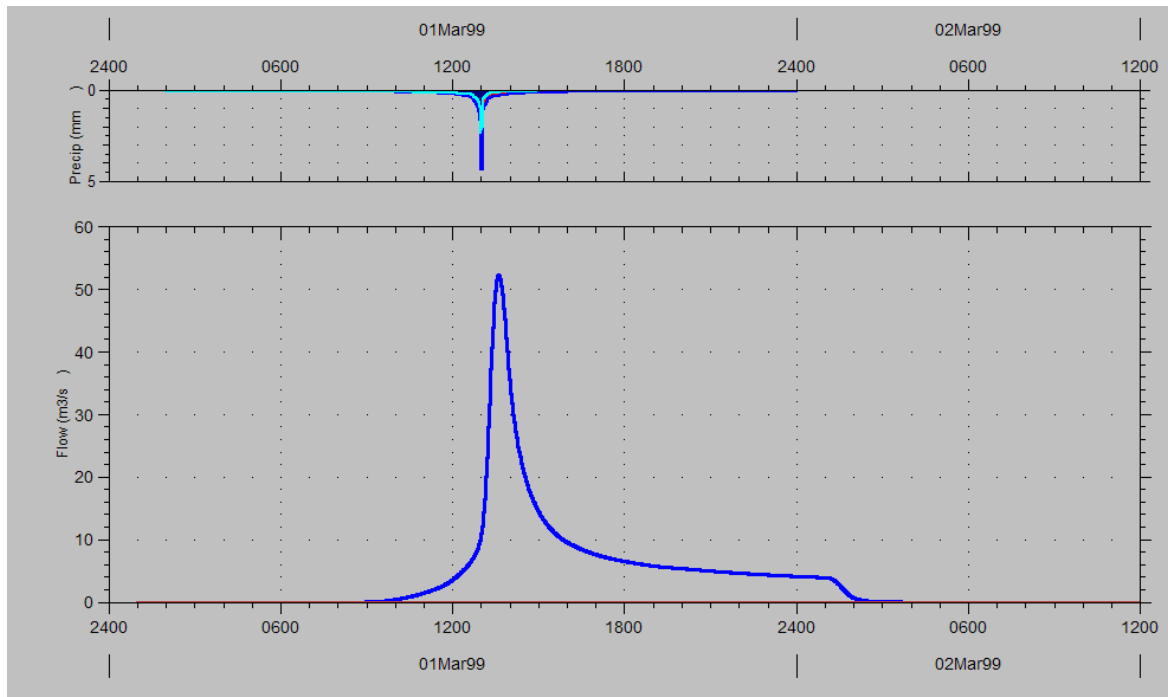
Slika 26: Hidrogram odtoka za Suhelj (Sodnik, 2005).
Fig. 26: Runoff hydrograph for Suhelj torrent

PRESUŠNIK



Slika 27: Hidrogram odtoka za Presušnik (Sodnik, 2005).
Fig. 27: Runoff hydrograph for Presušnik torrent.

BELA



Slika28: Hidrogram odtoka za Belo (Sodnik, 2005).
Fig. 28: Runoff hydrograph for Bela torrent.

6.2.3 Magnituda modeliranih drobirskih tokov

6.2.3.1 Lastnosti magnitude glede na tip drobirskega toka

Magnituda drobirskega toka je celotna prostornina drobirja, sproženega v enem dogodku, ne glede na število zdrsov. Zelo pomemben parameter pri modelu drobirskega toka je tudi magnituda, ki je, kot je bilo navedeno že pri opisu hidrološkega dela raziskave, vezana na količino vode, ki je »na voljo« za drobirski tok pri obravnavanem hudourniku..

Pri obravnavanju magnitude posameznih dogodkov je potrebno ločiti na pobočne in hudourniške drobirske tokove. Na tem mestu je potrebno ponovno poudariti, da ta raziskava obravnava samo hudourniške drobirske tokove, ki se gibljejo po hudournikih in ogrožajo naseljene hudourniške vršaje. Ti drobirski tokovi pa so ločeni glede na nastanek - originalni hudourniški in pobočni, ki nadaljujejo gibanje po hudourniških grapah in so bili poimenovani pobočno-hudourniški drobirski tokovi. Ločevanje obeh tipov nastanka je bolj natančno opisano v poglavju, kjer so podrobneje opisane lastnosti drobirskih tokov. Glavna posledica obeh tipov drobirskih tokov je maksimalni pretok oz. konica pretoka, ki se sprosti na hudourniku. Najvišja konica pretoka močno pogojuje maksimalne gladine in maksimalne hitrosti toka, ki pa so pri ocenjevanju nevarnosti bistvenega pomena.

Kot je bilo napisano že v poglavju o lastnostih drobirskih tokov, se pri hudourniških drobirskih tokovih maksimalni pretoki vode v primeru drobirskega toka poveča za določen delež sedimenta, pri pobočno-hudourniških pa se lahko maksimalni pretok v hudourniku poveča tudi za nekajkrat. V obeh primerih je sicer lahko magnituda dogodka podobna, bistvena razlika pa je v času trajanja dogodka. Pri hudourniških drobirskih tokovih gre lahko za počasno naraščanje deleža sedimentov in celoten dogodek traja več ur, medtem ko lahko pri pobočno-hudourniškem drobirskem toku, katerega konica pretoka je lahko večkratnik maksimalnega pretoka vode, dogodek traja samo nekaj minut.

6.2.3.2 Metode za izračun magnitude

Za oceno oz. izračun magnitude drobirski tokov je sicer na voljo več različnih metod, ki so bile preverjene tudi na slovenskih hudournikih (Sodnik, 2005; Sodnik in Mikoš, 2006). Te metode so namenjene predvsem za oceno potencialnih možnih magnitud na posameznih

hudournikih. Metode so bile naštetje in na kratko opisane že v poglavju 5.2.2, zato bodo v tem delu predstavljeni samo rezultati za hudournike Trebiža, Presušnik, Bela in Suhelj izračunani s posameznimi metodami.

Preglednica 15: Izračunane magnitude drobirskih tokov po metodi Takei (1984).

Table 15: Computed debris flows magnitudes with Takei method.

Trebiža	37.614 m ³
Suhelj	20.118 m ³
Presušnik	34.956 m ³
Bela	41.390 m ³

Preglednica 16: Izračunane magnitude drobirskih tokov po metodi Kronfellner-Kraus (2002).

Table 16: Computed debris flows magnitudes with Kronfellner-Kraus method.

Trebiža	48.668 m ³
Suhelj	35.957 m ³
Presušnik	107.289 m ³
Bela	77.793 m ³

Preglednica 17: Izračunane magnitude drobirskih tokov po metodi Marchi & D'Agostino (2002).

Table 17: Computed debris flows magnitudes with Marchi & D'Agostino method.

	1. metoda	2. metoda
Trebiža	9.535 m ³	8.733 m ³
Suhelj	7.527 m ³	15.079 m ³
Presušnik	37.585 m ³	50.541 m ³
Bela	20.468 m ³	19.687 m ³

Preglednica 18: Izračunane magnitude drobirskih tokov po metodi Ceriani et al. (2000).

Table 18: Computed debris flows magnitudes with Ceriani et al. Method.

	I F = 2	I F = 1	I F = 3
Trebiža	11.305 m ³	45.221 m ³	5.025 m ³
Suhelj	18.185 m ³	72.742 m ³	8.082 m ³
Presušnik	46.845 m ³	187.379 m ³	20.820 m ³
Bela	23.308 m ³	93.231 m ³	10.359 m ³

Pri zadnji metodi (Ceriani et al., 2000) je indeks plazljivosti I_F odvisen od prisotnosti plazov ali večjih erozijskih žarišč v zaledju hudournika. Ta indeks je še posebej pomemben pri določanju magnitude pobočno-hudourniških drobirskih tokov in bi moral biti določen na podlagi podrobne geološke analize območja.

Od omenjenih metod sta se za najbolj uporabni v slovenskem prostoru izkazali 2. metoda Marchi & D'Agostino in metoda Metoda Ceriani, Crosta, Frattini in Quattrini (upoštevan $I_F = 2$). Pri metodi Marchi & D'Agostino se je najboljša povezava za obravnavane hudournike pokazala med spec. prispevkom drobirja in padcem struge, medtem ko je bila ta povezava pri metodi Ceriani et al. med spec. prispevkom drobirja in naklonom vršja. Za ti povezavi sta bili razviti zvezi, ki omogočata hitro oceno magnitude drobirskih tokov na slovenskih hudournikih. Največja prednost obeh zvez je to, da za oceno magnitude zadostujejo že podatki, ki so navadno podani v hidroloških študijah posameznih hudourniških območij (Sodnik, 2005)

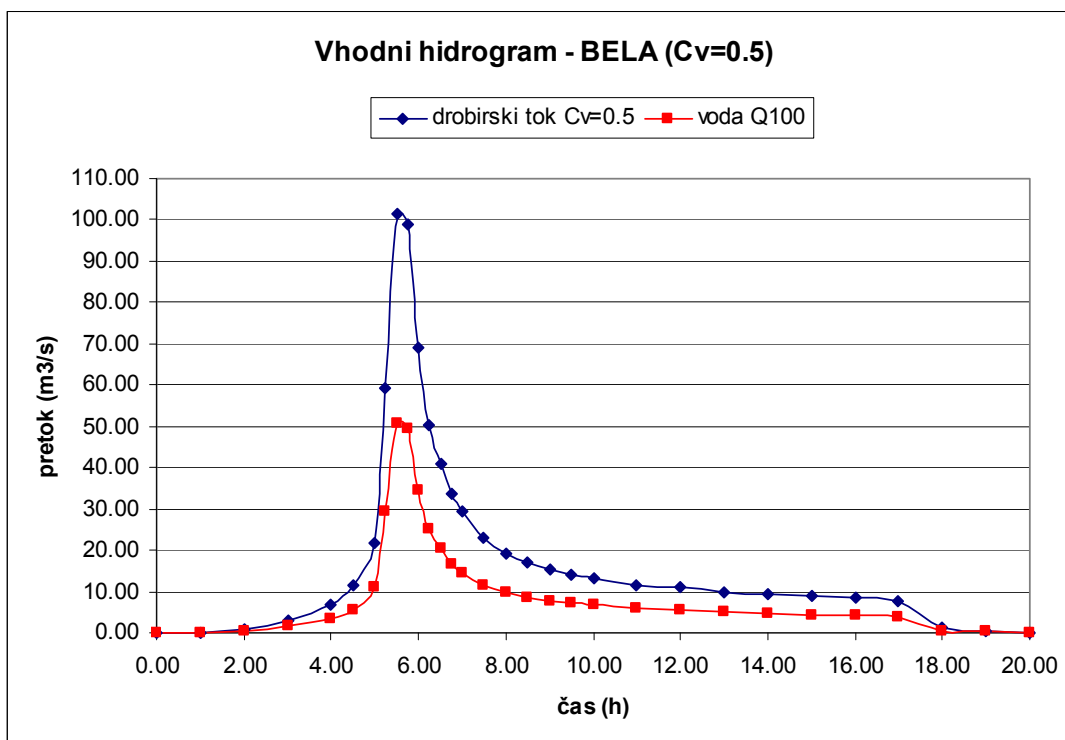
6.2.3.3 Izbor magnitude za modeliranje

Pri izboru magnitude modeliranega dogodka je bilo izbranih več variant. Pri določitvi magnitude je potrebno ločevati na hudourniške in pobočno-hudourniške drobirske tokove.

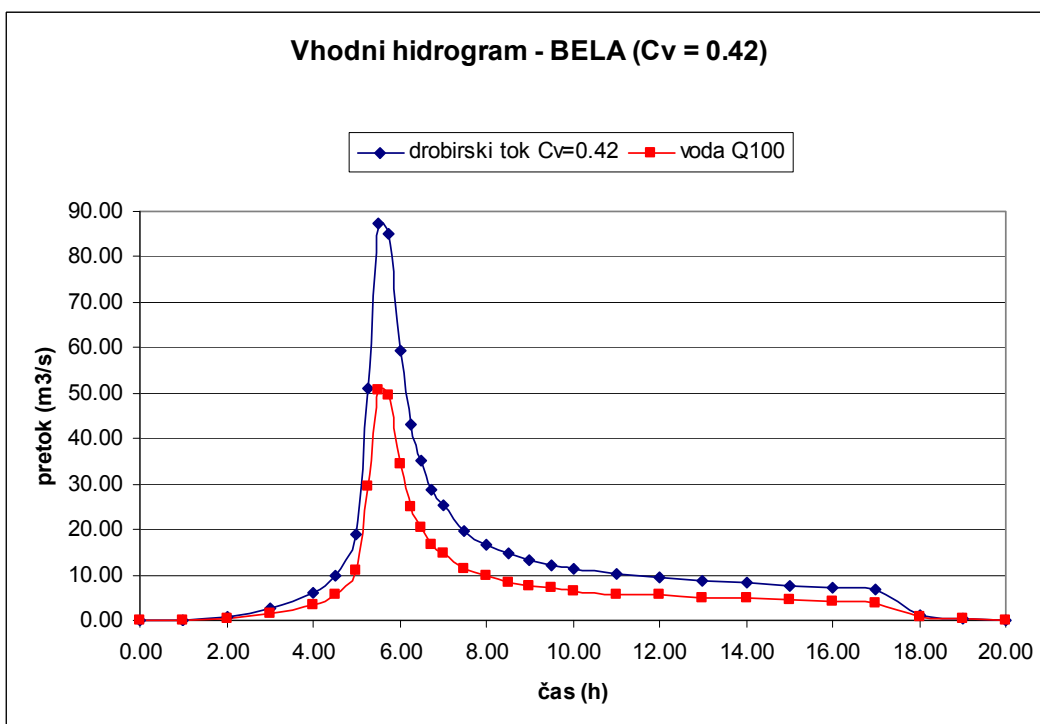
6.2.3.3.1 Hudourniški drobirski tokovi

Pri hudourniških drobirskih tokovih gre za hidrogram vode s stoletno povratno dobo, povečan za delež sedimentov. Deleži sedimentov so bili izbrani različno. Najpogosteje sta bila izbrana deleža $C_v = 0,5$ in $C_v = 0,42$, ki sta bila obravnavana v primeru Loga pod Mangartom. Ti dve vrednosti sta bili pomembni zato, ker so bili reološki parametri (strižna trdnost in viskoznost) za ti dve varianti umerjeni. Poleg teh dveh vrednosti sta bili pri modeliranju uporabljeni še dve vrednosti C_v in sicer 0,4 in 0,45. Različne vrednosti C_v so bile poleg določanja magnitude uporabljene tudi pri analizi vpliva reoloških parametrov.

V nadaljevanju je prikazan vhodni hidrogram, ki je bil uporabljen za modeliranje na hudourniku Bela in je na sliki jasno razvidno, kako vrednost C_v vpliva na maksimalni pretok in posledično na magnitudo modeliranega dogodka. Na hidrogramu sta prikazani krivulji za vodo in za drobirski tok. Prikazana sta dva hidrograma in sicer za drobirski tok z vrednostjo $C_v = 0,5$ in vrednostjo $C_v = 0,42$.



Slika 29: Vhodni hidrogram za drobirski tok $C_v=0,5$.
Fig. 29: Debris flow inflow hydrograph $C_v=0,5$.



Slika 30: Vhodni hidrogram za drobirski tok $C_v=0,42$.
Fig. 30: Debris flow inflow hydrograph $C_v=0,42$.

Podani so še izračuni magnitud modeliranih dogodkov na različnih hudournikih pri različnih vrednostih koeficienta C_v , pri čemer so prikazane samo tiste vrednosti magnitud, ki so bile dejansko uporabljene v modelih. Zaradi obsežnosti raziskave niso bile vse vrednosti C_v -ja uporabljene na vseh hudournikih.

Preglednica 19: Izračunane magnitude drobirskih tokov za različne vrednosti C_v .

Table 19: Computed debris flow magnitudes for different values of C_v .

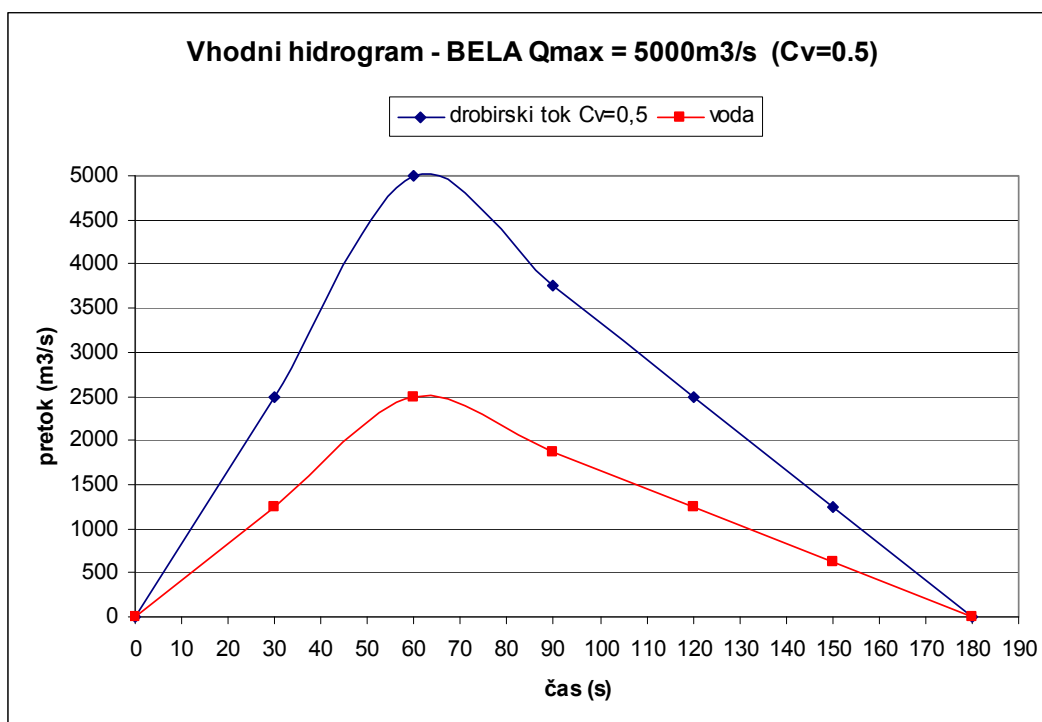
hudournik	celoten odtok vode Q_{100} (m^3)	magnituda drobirskega toka $C_v=0,5$ (m^3)	magnituda drobirskega toka $C_v=0,45$ (m^3)	magnituda drobirskega toka $C_v=0,42$ (m^3)	magnituda drobirskega toka $C_v=0,40$ (m^3)
Trebiža	407.150,00	407.150,00	-	-	-
Suhelj	182.050,00	182.050,00	-	-	-
Presušnik	387.770,00	387.770,00	-	-	-
Bela	479.390,00	479.390,00	392.141,02	347.078,36	319.273,74

Izračunane magnitude so sicer bistveno višje kot pa so vrednosti, izračunane z različnimi metodami za izračun magnitude, ki so bile predstavljene v enem od prejšnjih poglavij. Razlog za razliko je v tem, da je bil za osnovo našega modeliranja uporabljen hidrogram s stoletno povratno dobo, ki ima trajanje 19 ur. Ko omenjeni hidrogram vnesemo v model in mu dodamo sediment glede na izbrano vrednost C_v , dobimo nov hidrogram, katerega trajanje je enako kot je trajanje 100-letne vode in zato povečana vrednost pretokov v tako dolgem času pomeni veliko skupno količino sproščenega materiala. Vendar je na tem mestu potrebno povedati, da je najbolj pomemben podatek maksimalen pretok, torej vrh hidrograma, ki tudi določa maksimalne gladine in hitrosti toka, ki so merodajne za nadaljnjo uporabo pri pripravi kart nevarnosti. Pri nekaterih modelih je bil zaradi prihranka na času računalniškega računanja modeliran samo osrednji del hidrograma, torej časovni del, v katerem se pojavi maksimalni pretok. Rezultati maksimalnih gladin in hitrosti so bili enaki, kot če bi bil upoštevan celotni hidrogram. Več o časih računanja in strojni opremi, uporabljeni pri raziskavi, bo navedeno pri opisu poteka modeliranja in občutljivostni analizi v poglavju 6.

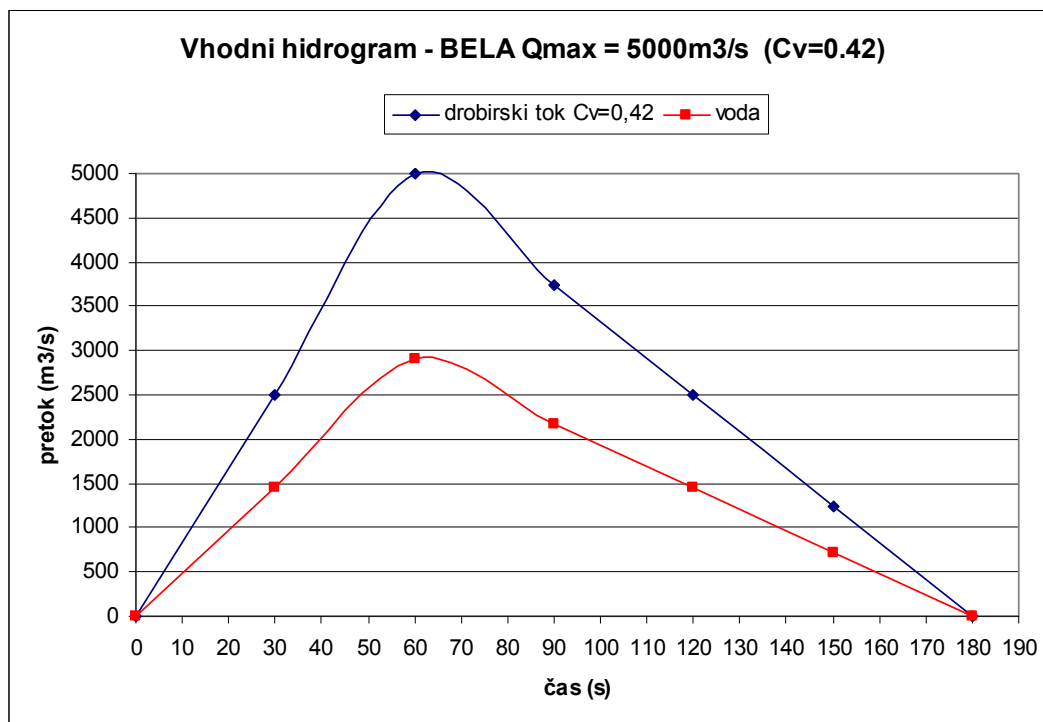
6.2.3.3.2 Pobočno-hudourniški drobirski tokovi

Kljub temu, da je bil poudarek raziskave na modeliranju originalnih hudourniških drobirskih tokov, katerih magnitude je možno bolj natančno in bolj utemeljeno določiti, so bili v raziskavo vključeni tudi primeri pobočno-hudourniških drobirskih tokov. Ti primeri so bili

simulirani na hudourniku Bela. Potek izbire modelnih scenarijev je bil sledeč. Na podlagi izkušenj in preteklih dogodkov smo se odločili, da bo trajanje modelnega dogodka 180 s, nato pa so bili izbrani maksimalni pretoki drobirskih tokov. Iz teh dveh podatkov je bil formiran vhodni hidrogram za model Flo-2D. Maksimalni pretoki, ki so bili izbrani, so bili $1500 \text{ m}^3/\text{s}$, $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ in $5000 \text{ m}^3/\text{s}$. Za primerjavo, v Logu pod Mangartom je bil maksimalni pretok drobirskega toka 17.11.2000 umerjen na skoraj $6000 \text{ m}^3/\text{s}$, stoletni pretok Predelice pa po podatkih znaša $77 \text{ m}^3/\text{s}$ (VGI, 1993). Sicer je določanje maksimalnih pretokov oz. magnitud pobočno-hudourniških drobirskih tokov zelo zahtevna naloga, ki je vezana na podrobno analizo geoloških razmer v zaledju. Tudi sicer so taki drobirski tokovi bolj redki od hudourniških drobirskih tokov, ki so ob povečanih pretokih hudournikov pogosti, a zaradi majhnih magnitud ostanejo velikokrat nezabeleženi. Pretoki $1500 \text{ m}^3/\text{s}$, $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ in $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ so bili modelirani pri različnih koncentracijah C_v . Uporabljeni sta bili vrednosti $C_v = 0,42$ in $C_v = 0,5$. To pomeni, da je bil za razliko od hidrogramov pri hudourniških drobirskih tokovih, kjer je bila konstantna količina vode in se je v odvisnosti od C_v spreminjal maksimalni pretok toka, v tem primeru maksimalni pretok konstanten, v odvisnosti od C_v -ja pa se je spreminjala količina vode in sedimenta v mešanici.

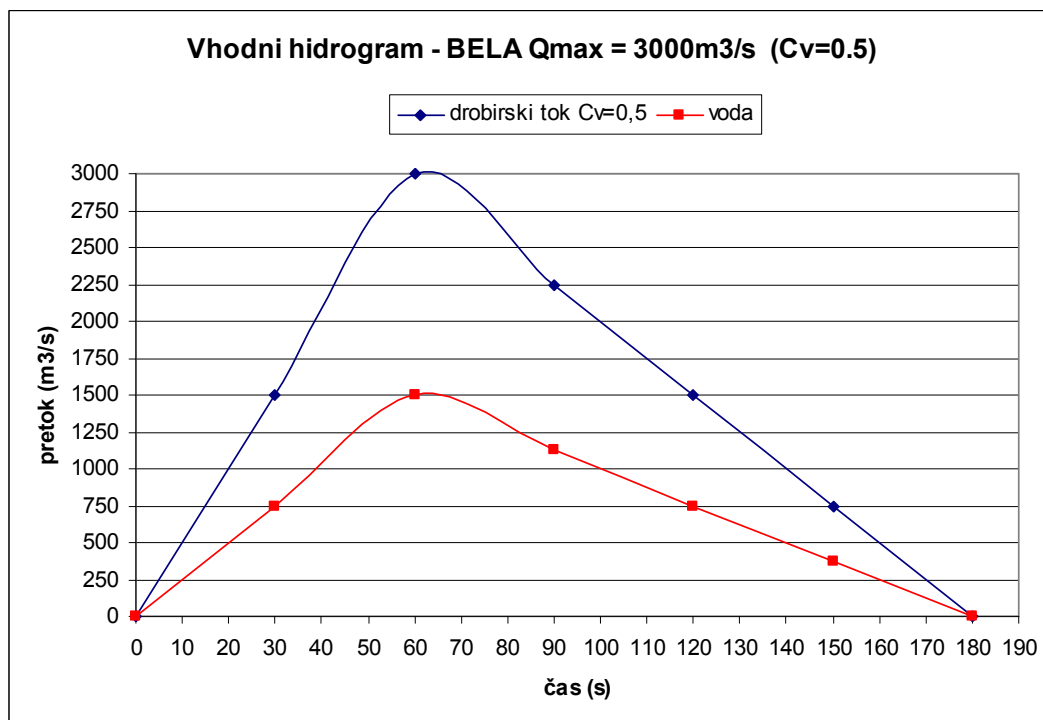


Slika 31: Vhodni hidrogram za hudournik Bela $Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_v = 0,50$.
Fig. 31: Inflow hydrograph for Bela torrent $Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_v = 0,50$.



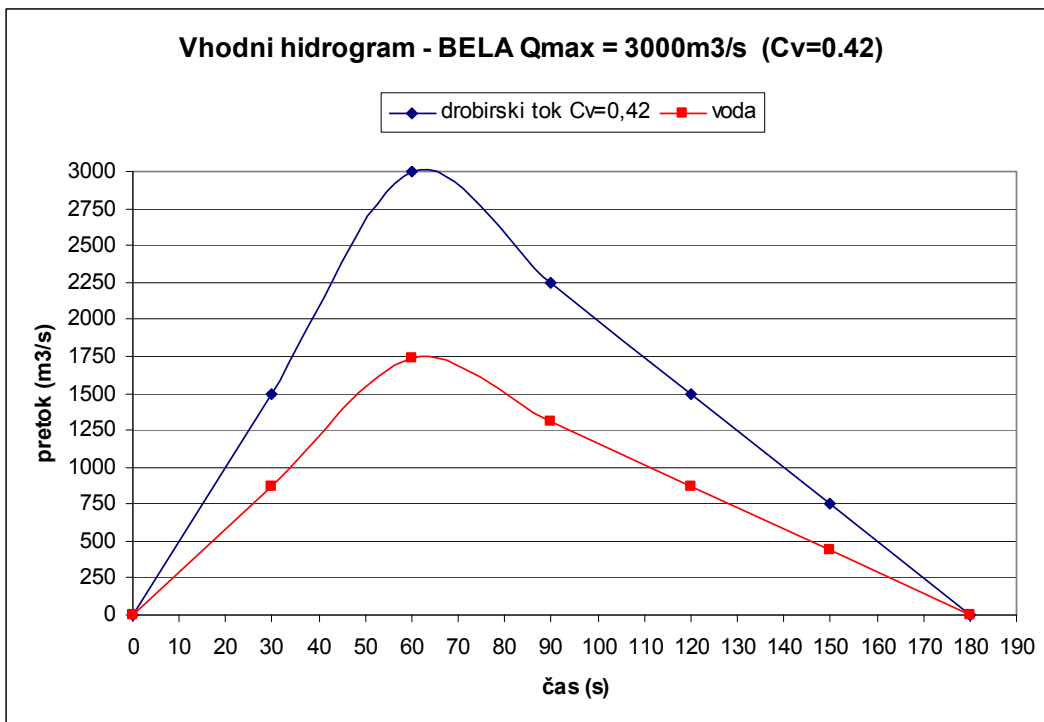
Slika 32: Vhodni hidrogram za hudournik Bela $Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_v = 0,42$.

Fig. 32: Inflow hydrograph for Bela torrent $Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_v = 0,42$.

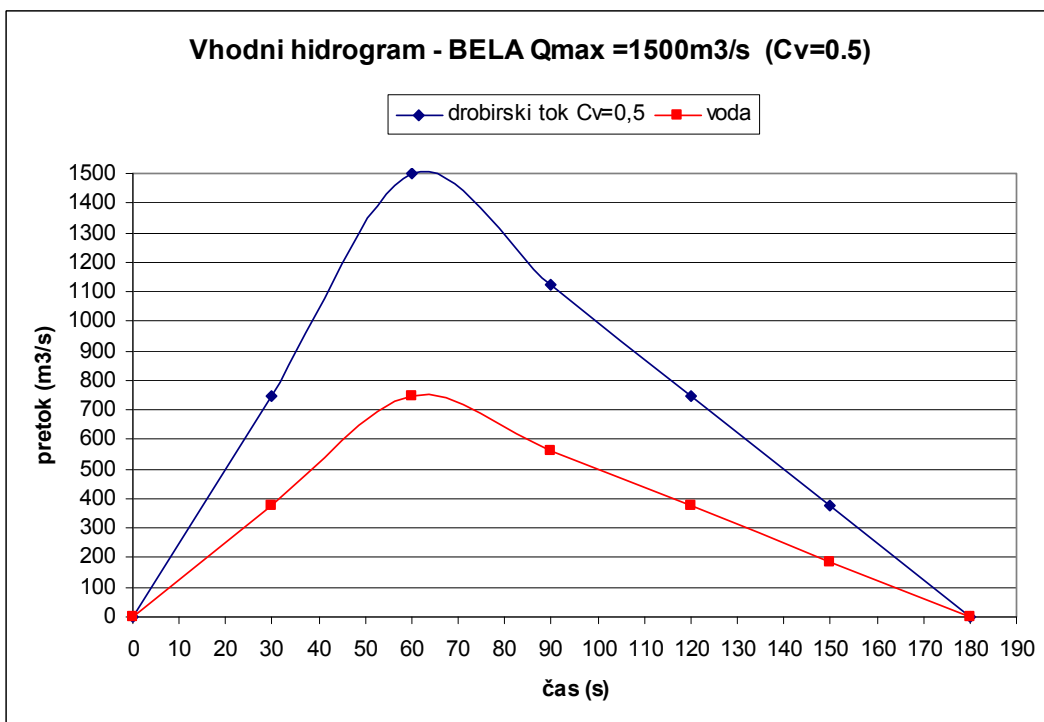


Slika 33: Vhodni hidrogram za hudournik Bela $Q_{\max} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_v = 0,50$.

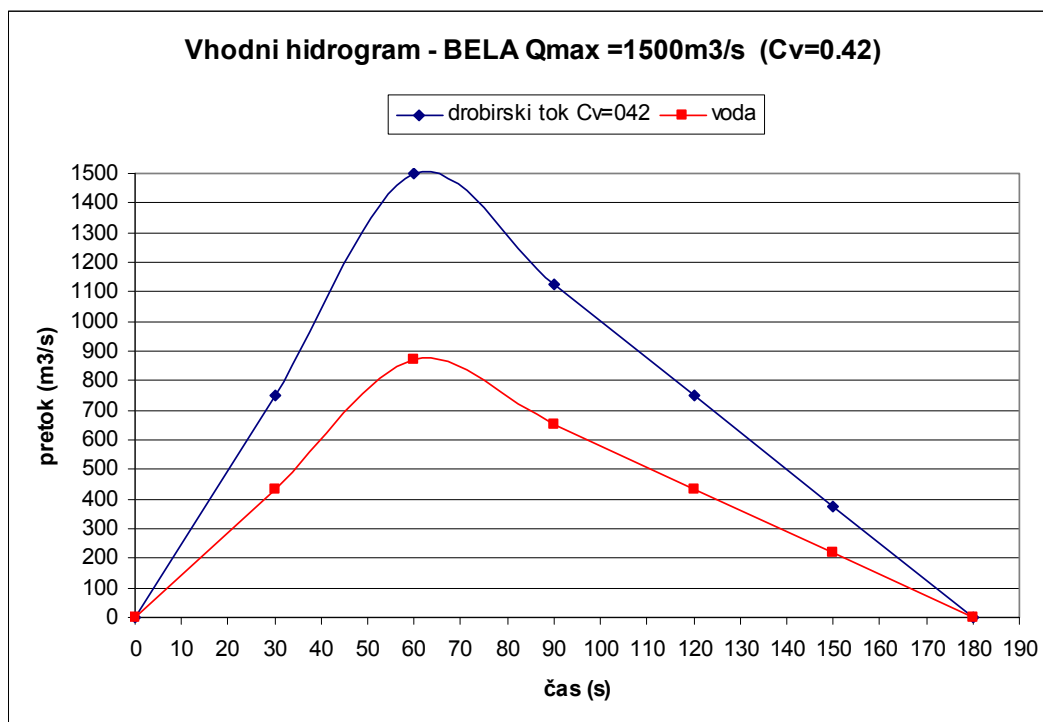
Fig. 33: Inflow hydrograph for Bela torrent $Q_{\max} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_v = 0,50$.



Slika 34: Vhodni hidrogram za hudournik Bela $Q_{\max} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_v = 0,42$.
Fig. 34: Inflow hydrograph for Bela torrent $Q_{\max} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_v = 0,42$.



Slika 35: Vhodni hidrogram za hudournik Bela $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_v = 0,50$.
Fig. 35: Inflow hydrograph for Bela torrent $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_v = 0,50$.



Slika 36: Vhodni hidrogram za hudournik Bela $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_v = 0,42$.
Fig. 36: Inflow hydrograph for Bela torrent $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_v = 0,42$.

Izračunane magnitude zgoraj navedenih dogodkov na hudourniku Bela pri različnih koncentracijah C_v so prikazane v preglednicah 20 in 21.

Preglednica 20: Izračunane magnitude drobirskih tokov za različne vrednosti maksimalnih pretokov pri $C_v = 0,5$.

Table 20: Computed debris flow magnitudes for different peak discharges and $C_v = 0,5$.

	celoten odtok vode (m^3)	magnituda drobirskega toka (m^3)
$Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$	225.000,00	225.000,00
$Q_{\max} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$	135.000,00	135.000,00
$Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$	67.500,00	67.500,00

Preglednica 21: Izračunane magnitude drobirskih tokov za različne vrednosti maksimalnih pretokov pri $C_v = 0,42$.

Table 20: Computed debris flow magnitudes for different peak discharges and $C_v = 0,42$.

	celoten odtok vode (m^3)	magnituda drobirskega toka (m^3)
$Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$	261.000,00	225.000,00
$Q_{\max} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$	156.600,00	135.000,00
$Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$	78.300,00	67.500,00

6.3 Občutljivostna analiza modela pri modeliranju hudourniških drobirskih tokov

6.3.1 Nastavitve kontrolnih parametrov modela

6.3.1.1 Potek analize

Pri pripravi in računanju prvih modelov smo hitro ugotovili, da izračuni trajajo sorazmerno dolgo, saj program za zagotavljanje stabilnosti in zaradi pogoja ohranjanja volumna (ang. »volume conservation«), skrajšuje časovni korak računa, dokler ni dosežena zahtevana stabilnost.

Izračuni na sodobnem računalniku (procesor Core2Duo 3 GHz, 4 Gb RAM) so trajali za velikost računskih celic 15 m x 15 m, trajanje dogodka 20 h, od 5 do 50 minut, medtem ko so pri računskih celicah velikosti 5 m x 5 m in pri trajanju dogodka 20 h, izračuni trajali od 25 pa do 100 ur. Sam čas računanja je bil zelo odvisen tudi od ostalih parametrov, vendar je bil namen tega dela testiranja modela optimizacija kontrolnih nastavitvev modela, brez izgube natančnosti rezultatov ali stabilnosti modela.

Z namenom optimizacije nastavitvev je bilo opravljenih 15 izračunov na hudourniku Presušnik. Za testiranje je bil uporabljen model z naslednjimi karakteristikami:

- računska mreža: 15 m x 15 m (998 celic)
- hidrogram: Q_{100} , čista voda, trajanje 19 h
- Manningov koeficient n_g : povsod $0,04 \text{ ms}^{-1/3}$ (prednastavljena vrednost modela).

Iskanje optimalne nastavitve parametrov je potekalo z različnimi kombinacijami parametrov v datoteki *toler.dat*, ki je podrobneje opisana v poglavju 4, kjer je opisan model Flo-2D.

Koeficienti, ki jih lahko nastavljamo v *toler.dat*, so:

Surface Detention »SD«: minimalna globina, ki jo model še modelira. Prednastavljena je vrednost 0,03 m oz. 3 cm.

Percent Change in Flow Depth »PCiFD«: parameter je za modeliranje površinskih tokov (ang. Floodplain flow«) že vdelan v programu, zato v tej optimizaciji ni bil obravnavan. Prednastavljena vrednost tega parametra je 0,2.

Dynamic Wave Stability Coefficient »DWSC«: koeficient stabilnosti računa, katerega vrednost je za večino primerov priporočena od 0,1 do 1. Večje vrednosti so možne, a lahko povzročijo nestabilnost računa in izgubo volumna. Prednastavljena vrednost je 1.

6.3.1.2 Rezultati analize s komentarji in zaključki

V nadaljevanju so opisane različne kombinacije parametrov in časi računa. V tabeli so navedeni samo tisti primeri, pri katerih sprememba koeficientov ni imela vpliva na natančnost rezultatov in na stabilnost računa. Primer 1 je primer s prednastavljenimi vrednostmi.

Preglednica 22: Testiranje kontrolnih parametrov modela.

Table 22: Testing model control parameters.

	»SD«:	»PCiFD«	»DWSC«	Čas računa modela (min)
Primer 1	0,03	0,2	1	5:40
Primer 2	0,5	0,2	1	11:20
Primer 3	0,03	0,2	1,5	3:40
Primer 4	0,03	0,2	2,0	2:33
Primer 5	0,25	0,2	1	8:00
Primer 6	0,1	0,2	1	9:20
Primer 7	0,01	0,2	1	5:50
Primer 8	0,03	0,2	5	1:27

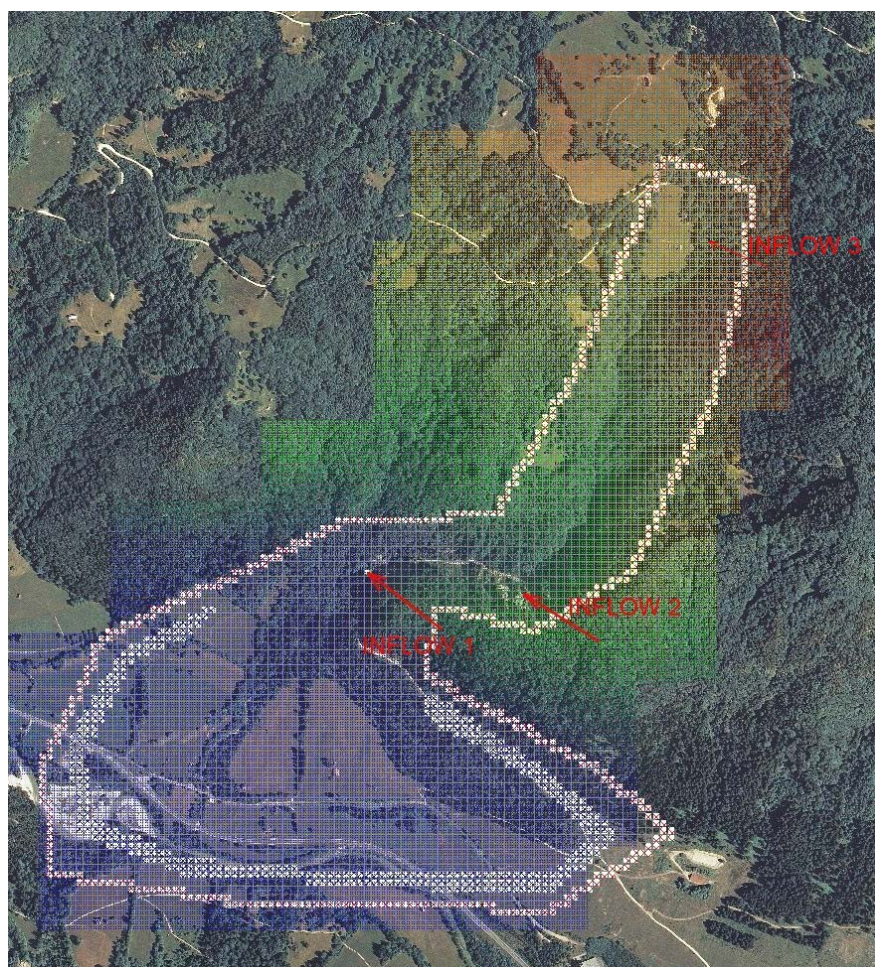
Iz zgornje preglednice je razvidno, da ima najbolj ugoden vpliv na optimizacijo parameter koeficienta stabilnosti računa, za katerega sicer avtor predlaga vrednosti od 0 do 1 (O'Brien, 2006). Povečevanje do vrednosti 5 je prineslo velik prihranek pri času izračuna (približno 70%). Nadaljnje povečevanje vrednosti pa je prineslo zelo malo prihranka pri času računa, pojavljati pa se je začela slabša stabilnost računa (večji odstotek izgube volumna).

Na podlagi te analize je bil za optimalnega izbran primer 8 (»SD« = 0,03; »PCiFD« = 0,2; »DWSC« = 5). Nastavitve, izbrane v tem modelu, so bile zato uporabljene pri vseh nadaljnjih računih, saj več deset odstotkov prihranjenega časa računanja pri zahtevnejših modelih, kjer računanje traja po več deset ur, pomeni veliko hitrejše in bolj učinkovito delo z modelom.

6.3.2 Pozicija vhodnega hidrograma na vršaju

6.3.2.1. Potek analize

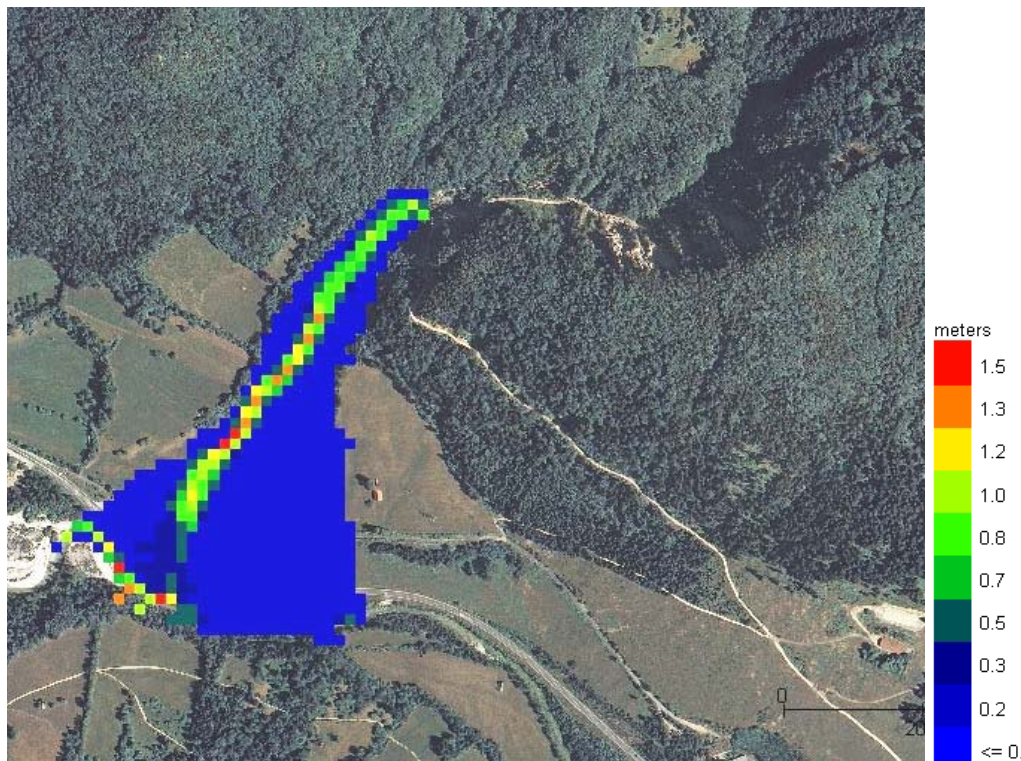
V tej raziskavi je bila vsa pozornost namenjena modeliranju drobirskih tokov na hudourniških vršajih, kjer je ponavadi gosta poselitev. Gibanje toka po hudourniški strugi do vršaja ni bilo predmet tega dela, zato se je na tem mestu pojavilo vprašanje, kje na hudourniškem vršaju je potrebno postaviti celico z vhodnim hidrogramom, da bodo rezultati na vršaju, ki je bil predmet raziskave, dovolj natančni in nanje pozicija hidrograma ne bo imela vpliva. Pozicija hidrograma je zelo pomembna tudi z vidika časa računanja, saj višja pozicija hidrograma pomeni večje računsko območje, večje število računskih celic in s tem daljši čas računanja. Za analizo vpliva pozicije hidrograma so bile obravnavane tri možnosti na hudourniku Presušnik, ki so prikazane na sliki 37. Uporabljena je bila računska mreža 15 m x 15 m (3812 celic).



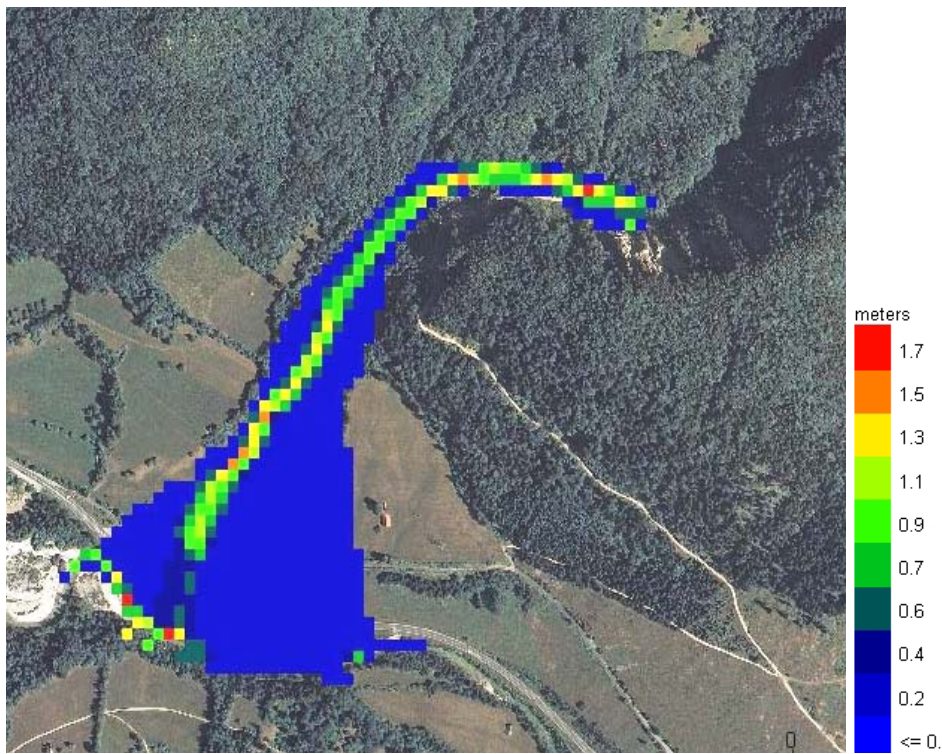
Slika 37: Tri pozicije hidrogramov na vršaju hudournika Presušnik (CRP, 2008).
Fig. 37: Three positions of inflow hydrograph on Presušnik torrent.

6.3.2.2. Rezultati analize s komentarji in zaključki

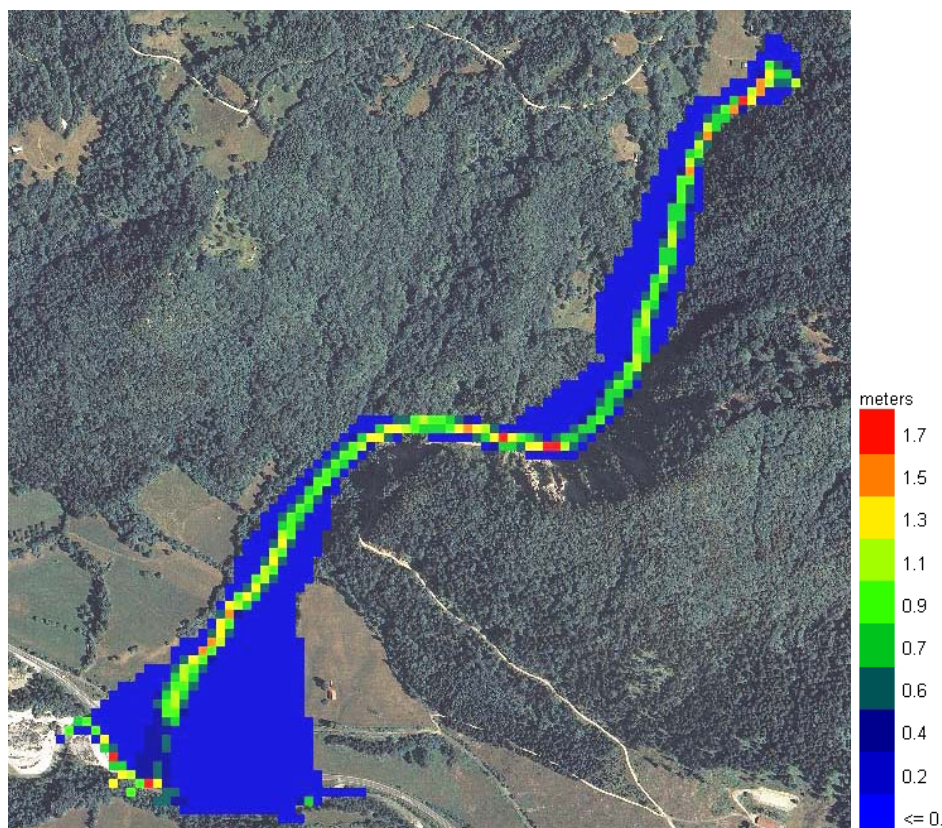
Vpliv pozicije vstopnega hidrograma se je izkazal za nepomembnega, kar dokazujejo tudi slike rezultatov (maksimalne globine, slike 38, 39 in 40) v nadaljevanju, kjer je razvidno, da razlik v izračunih ni. Izkazalo se je, da premikanje hidrograma višje v strugo hudournika nad vršajem ne prinese spremembe v rezultatih.



Slika 38: Izračunane maksimalne globine pri najnižji poziciji hidrograma (15x15, voda Q_{100}) (CRP, 2008).
Fig. 38: Maximum flow depth at the lowest position of inflow hydrograph (15x15, Q_{100} water).



Slika 39: Izračunane maksimalne globine pri srednji poziciji hidrograma (15x15, voda Q_{100}) (CRP, 2008).
Fig. 39: Maximum flow depth at the middle position of inflow hydrograph (15x15, Q_{100} water).



Slika 40: Izračunane maksimalne globine pri najvišji poziciji hidrograma (15x15, voda Q_{100}) (CRP, 2008).
Fig. 40: Maximum flow depth at the upper position of inflow hydrograph (15x15, Q_{100} water).

Iz slik maksimalnih globin na vršaju Presušnika pri različnih pozicijah hidrograma (slike 38-40) je razvidno, da so globine na vršaju v vseh primerih identične. Ugotovitev, da pozicija vhodnega hidrograma ne vpliva na točnost rezultatov, je ugodna predvsem z vidika optimizacije modelov. To pomeni, da lahko pri generiranju računske mreže optimalno zajamemo območje, ki nas zanima, in ni potrebno povečevati območja navzgor v hudourniško strugo, kar povzroči nepotrebno podaljševanje časa računanja. V nadaljevanju raziskave je bila ta ugotovitev upoštevana in je bila računska mreža za posamezne modele generirana optimalno glede na obliko vršaja in glede na območje, ki je bilo predmet raziskave.

6.3.3 Manningov koeficient hrapavosti n_g

6.3.3.1 Potek analize

Določanje Manningovega koeficienta hrapavosti v modelu se določa za vsako računsko celico posebej ali pa za večjo skupino celic skupaj. V preteklosti je bil, tudi pri uporabi modela Flo-2D (Hojnik, 2004; Hojnik et al., 2001), koeficient hrapavosti n_g predmet umerjanja modela. Za primer modeliranja drobirskega toka v Logu pod Mangartom z modelom Flo-2D (Hojnik et al., 2001), so bile umerjene vrednosti koeficienta n_g sledeče:

$$\begin{aligned} \text{območje pozidave: } n_g &= 0,11 \text{ ms}^{-1/3} \text{ (vpliv objektov ni bil zajet posebej)} \\ \text{ostalo območje: } n_g &= 0,065 \text{ ms}^{-1/3} \end{aligned}$$

Pri modeliranju drobirskih tokov skozi Koseč (Hojnik, 2004) pa so bile umerjene naslednje vrednosti: celotno območje modeliranja: $n_g = 0,05 \text{ ms}^{-1/3}$

V naši raziskavi umerjanje koeficienta n_g ni bilo možno, zato je bilo ob upoštevanju literature (Julien, 2002; O'Brien, 2006) izbranih nekaj vrednosti in primerjan njihov vpliv na rezultate. Po zaključku testiranja smo se odločili za določene vrednosti koeficientov n_g za vsako vrsto površine in jih uporabili za končne izračune na posameznih hudournikih (CRP, 2008). V nadaljevanju je najprej podanih nekaj priporočenih vrednosti koeficientov iz literature, ki so bili uporabljeni tudi v naši raziskavi.

Za izbiro koeficientov hrapavosti je bilo uporabljenih več virov (Julien, 2006; Ven Te Chow, 1959 in O'Brien, 2006). V preglednicah 23 in 24 so predlagane vrednosti koeficienta n_g za različne površine s strani različnih avtorjev.

Preglednica 23: Vrednosti koeficienta n_g za različne površine (Julien, 2002).

Table 23: Manning's roughness values.

Vrsta površine	Vrednost koeficienta n_g [$\text{ms}^{-1/3}$]
Beton, asfalt	0,01 - 0,013
Pesek	0,01 - 0,016
Prod	0,012 - 0,03
Redka vegetacija	0,053 - 0,13
Nizka travnata površina	0,10 - 0,20
»Bluegrass« okrasna zelenica	0,17 - 0,48
Cesta	0,013 - 0,02
Gozd	0,15 - 0,25
Njiva	0,42 - 0,58
Travnik	0,03 - 0,035
Urbane površine	0,05
Naravna vegetacija	0,10

In še preglednica v kateri so predlagane vrednosti n_g za modeliranje površinskih tokov (ang. overland flow), ki jih za posamezne tipe površin predlaga avtor programa Flo-2D (O'Brien, 2006).

Preglednica 24: Vrednosti koeficienta n_g za različne površine (O'Brien, 2006).

Table 24: Overland flow Manning's n roughness values.

Gosta ruša	0,17 - 0,80 $\text{ms}^{-1/3}$
Gosta trava	0,17 - 0,48 $\text{ms}^{-1/3}$
Grmovje in gozdna podrast	0,30 - 0,40 $\text{ms}^{-1/3}$
Povprečna travnata površina	0,20 - 0,40 $\text{ms}^{-1/3}$
Slabo zaraščena travnata površina	0,20 - 0,30 $\text{ms}^{-1/3}$
Kratka trava	0,10 - 0,20 $\text{ms}^{-1/3}$
Redka vegetacija	0,05 - 0,13 $\text{ms}^{-1/3}$
Površine prekrte z ostanki drobirja	
0% pokritost	0,09 - 0,34 $\text{ms}^{-1/3}$
20% pokritost	0,05 - 0,25 $\text{ms}^{-1/3}$
Polja (odvisno od vrste posevka)	0,008 - 0,47 $\text{ms}^{-1/3}$
Odrpte površine z drobirjem	0,10 - 0,20 $\text{ms}^{-1/3}$
Neobdelana polja	0,08 - 0,12 $\text{ms}^{-1/3}$
Odrpte površine brez ostankov drobirja	0,04 - 0,10 $\text{ms}^{-1/3}$
Asfalt ali beton	0,02 - 0,05 $\text{ms}^{-1/3}$

6.3.3.2 Opis modelov in prikaz rezultatov analize vpliva koeficienta hrapavosti

Vpliv Manningovega koeficienta hrapavosti je bil testiran na dveh vršajih. Na Presušniku je bil testiran vpliv različnih koeficientov pri modeliranju vode, medtem ko je bil na vršaju Bela testiran vpliv na modeliranje drobirskih tokov. Namen tega dela raziskave je tudi prikaz razlike vpliva na drobirske tokove in vodo, ter kako vpliva na rezultate pri različnih gostotah mreže. Presušnik je imel računsko mrežo 15 m x 15 m, Bela pa 5 m x 5 m. Površine, ki jim je bilo potrebno predpisati vrednosti n_g , so: gozd, travnik, struga in pri hudourniku Bela še območje hiš oz. objektov.

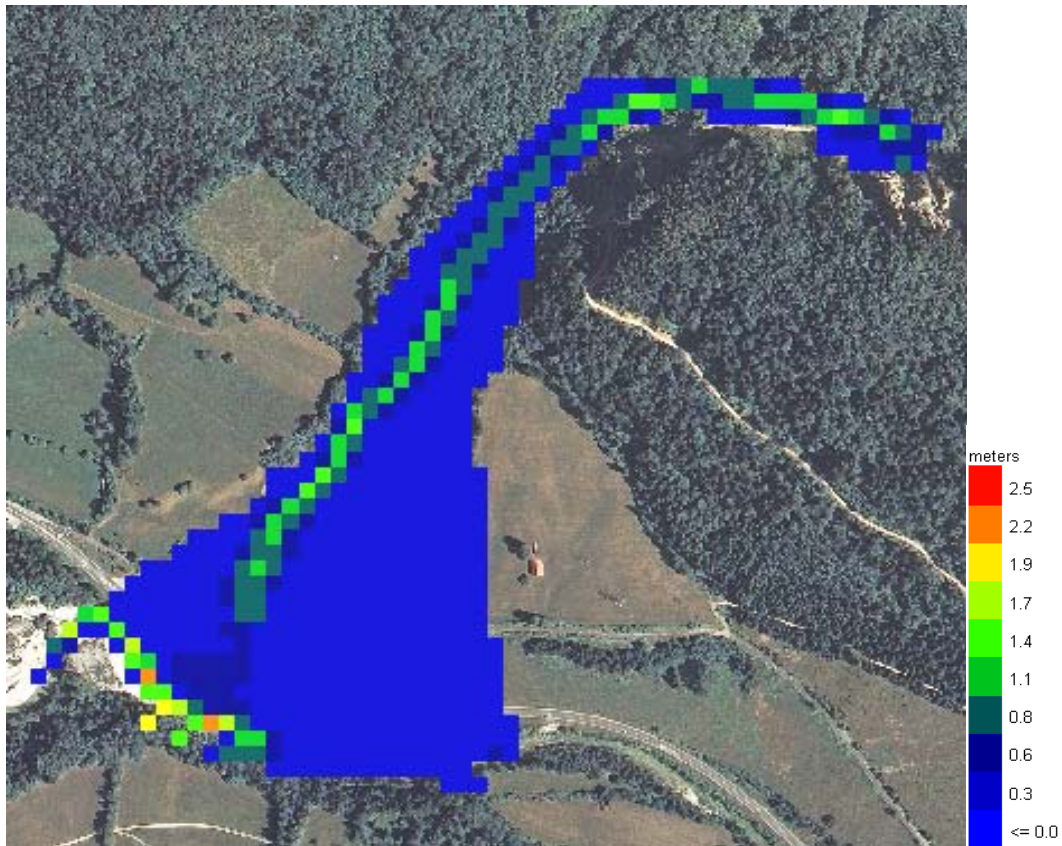
6.3.3.2.1 Testiranje vpliva koeficienta n_g na vršaju Presušnika (voda)

Preglednica 25: Vrednosti koeficienta n_g pri testiranju vpliva na Presušniku.

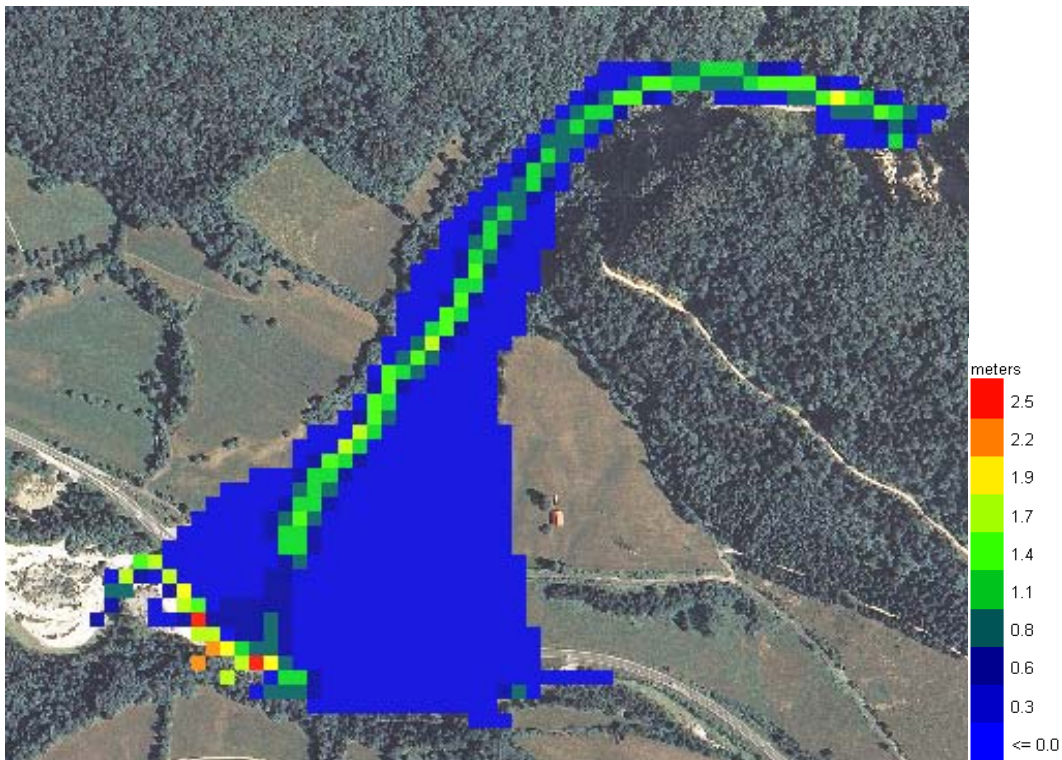
Table 25: Analyzed n_g values on Presušnik torrent.

ime modela	hidrogram	Koeficienti n_g [$ms^{-1/3}$]
Pres2	voda Q_{100} (19h)	gozd 0,16; travnik 0,033
Pres5	voda Q_{100} (19h)	gozd 0,15; travnik 0,03; struga 0,1
Pres6	voda Q_{100} (19h)	gozd 0,25; travnik 0,035; struga 0,15
Pres7	voda Q_{100} (19h)	gozd 0,16; travnik 0,033; struga 0,13
Pres10	voda Q_{100} (19h)	gozd 0,16; travnik 0,033; struga 0,2

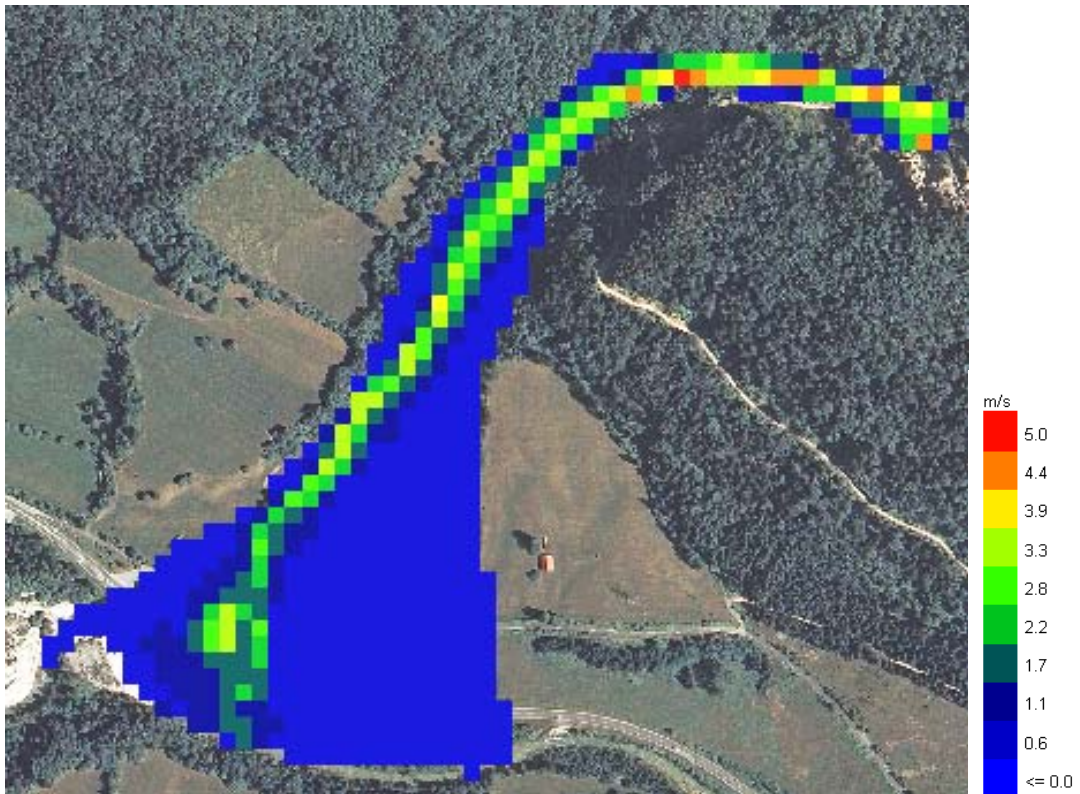
Najprej je prikazana primerjava rezultatov za modela z največjimi (Pres6) in najmanjšimi (Pres5) koeficienti hrapavosti n_g . Na slikah so prikazane maksimalne globine (sliki 41 in 42) in maksimalne hitrosti toka (sliki 43 in 44) pri posameznih modelih.



Slika 41: Maksimalne globine pri modelu Pres5 (voda Q_{100} , 15x15, n_g : gozd 0,15; travnik 0,03; struga 0,1).
Fig. 41: Maximum flow depth in model Pres5 (water Q_{100} , 15x15, n_g : forrest 0,15; meadow 0,03; channel 0,1).

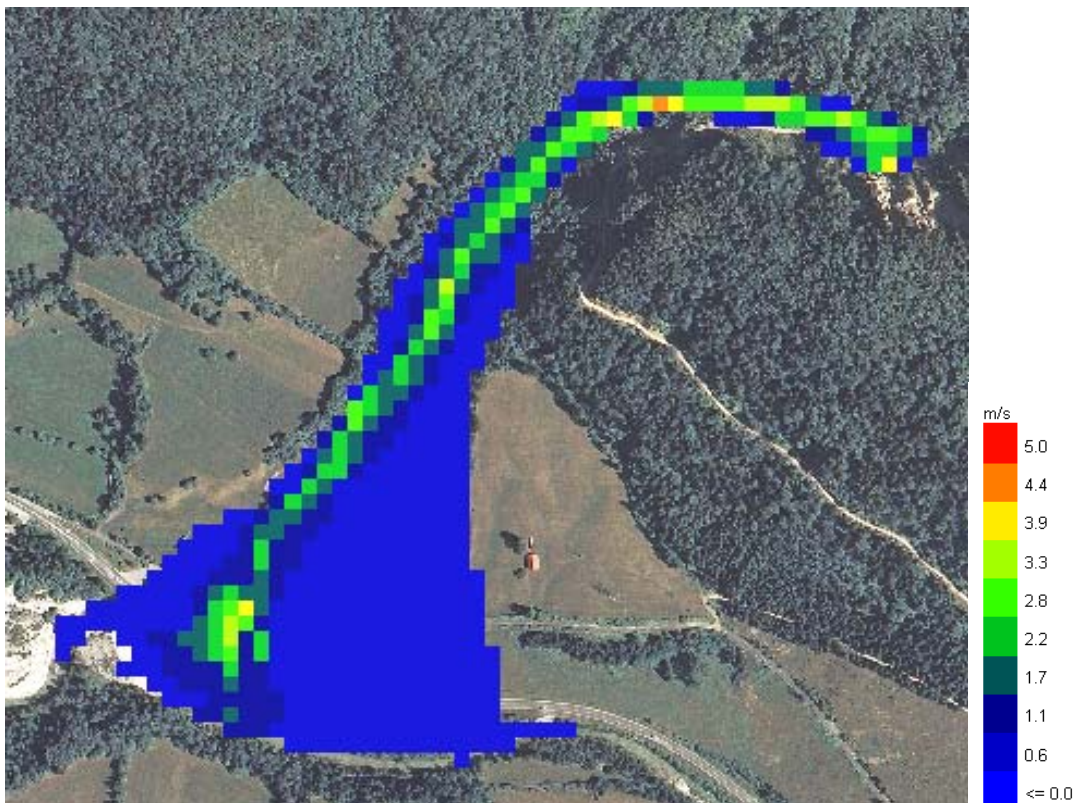


Slika 42: Maksimalne globine pri modelu Pres6 (voda Q_{100} , 15x15, n_g : gozd 0,25; travnik 0,035; struga 0,15).
Fig. 42: Maximum flow depth in model Pres6 (water Q_{100} , 15x15, n_g : forrest 0,25; meadow 0,035; channel 0,15).



Slika 43: Maksimalne hitrosti pri modelu Pres5 (voda Q_{100} , 15×15 , n_g : gozd 0,15; travnik 0,03; struga 0,1).

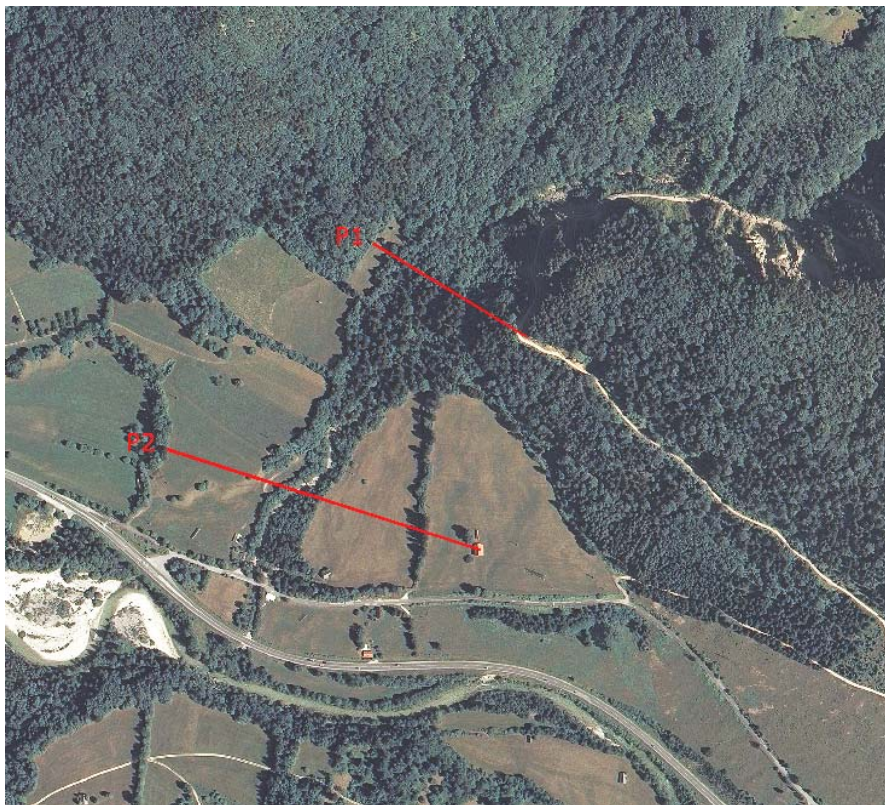
Fig. 43: Maximum flow velocity in model Pres5 (water Q_{100} , 15×15 , n_g : forrest 0,15; meadow 0,03; channel 0,1).



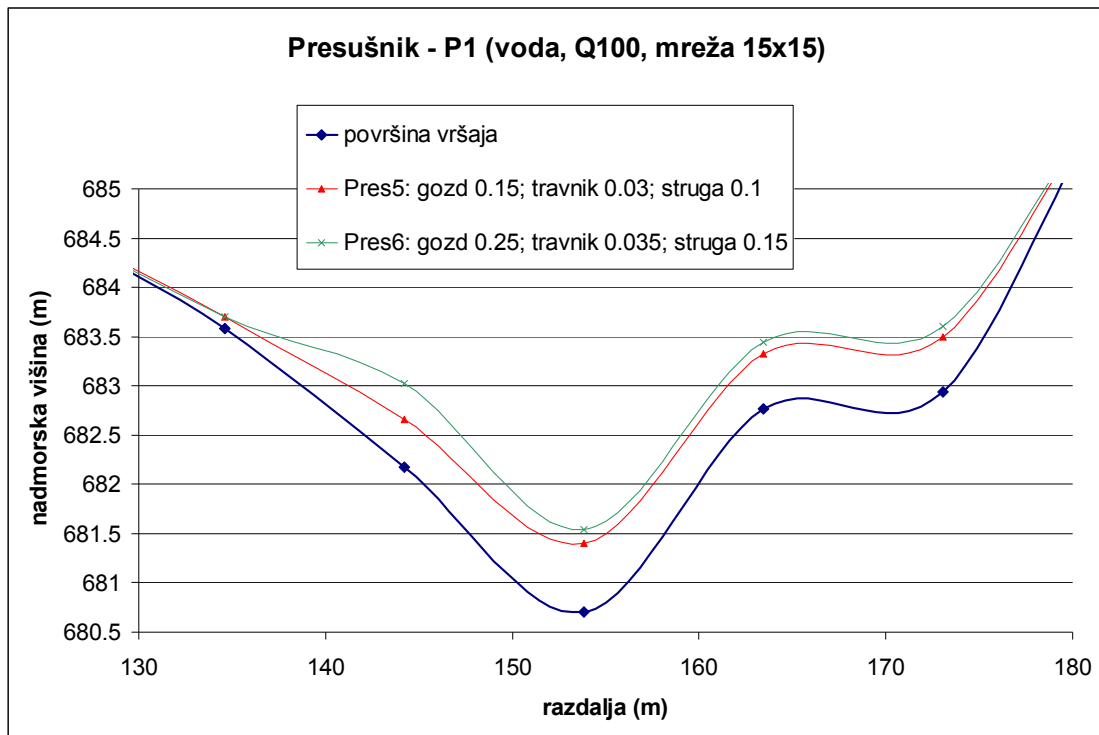
Slika 44: Maksimalne hitrosti pri modelu Pres6 (voda Q_{100} , 15×15 , n_g : gozd 0,25; travnik 0,035; struga 0,15).

Fig. 42: Maximum flow velocity in model Pres6 (water Q_{100} , 15×15 , n_g : forrest 0,25; meadow 0,035; channel 0,15).

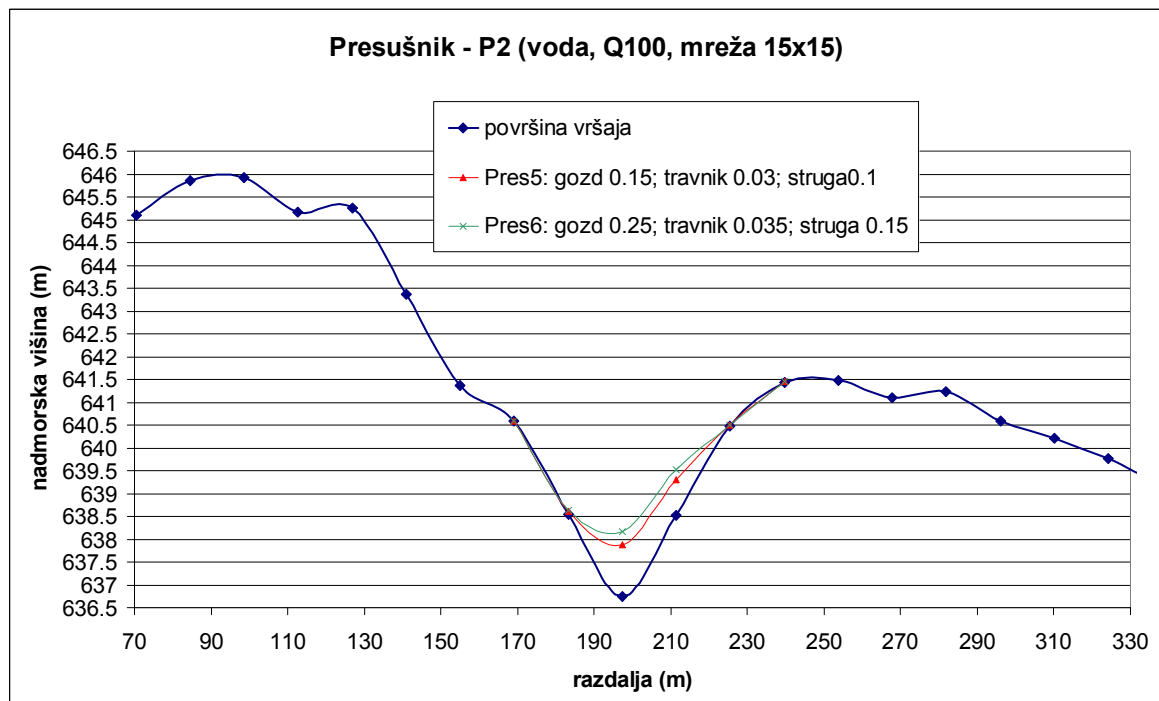
Vpliv koeficienta hrapavosti je viden tako pri hitrostih, kot pri globinah. Manjši koeficienti pomenijo večje hitrosti in manjše globine toka, večji koeficienti pa obratno. Maksimalne razlike v globinah toka v posameznih poplavljenih celicah so 25 do 30 %, vendar so to ekstremne razlike. Povprečne razlike v globinah toka so manjše. To pomeni, da je izbira koeficientov hrapavosti pomembna in da je vpliv koeficienta na rezultate sorazmerno velik. Za boljšo primerjavo obeh primerov sta v nadaljevanju podana dva prečna prereza vršaja (slika 45), v katerih je narejena primerjava maksimalnih gladin modelov z največjimi in najmanjšimi koeficienti hrapavosti n_g . Prikazana je tudi pozicija obeh izbranih profilov na vršaju Presušnika.



Slika 45: Pozicije izbranih prečnih prerezov na vršaju Presušnika.
Fig. 45: Cross sections positions on Preušnik fan.



Slika 46: Primerjava vpliva koeficienta n_g na maksimalne gladine v prerezu P1 (Presušnik).
Fig. 46: Influence of n_g on computed flow elevations in cross section P1 (Presušnik).



Slika 47: Primerjava vpliva koeficienta n_g na maksimalne gladine v prerezu P2 (Presušnik).
Fig. 47: Influence of n_g on computed flow elevations in cross section P2 (Presušnik).

V prerezih P1 in P2 (sliki 46 in 47) je razviden vpliv različnih koeficientov hrapavosti n_g . V prerezu P1 se vidi, da se vpliv višjega koeficienta n_g odraža po celotnem prerezu in ne samo na območju največje globine toka (v strugi). Čez celoten prerez se vidi, da določen odstotek povečanja koeficienta n_g pomeni določen odstotek povečanja globine toka. V primeru Presušnika, kjer je bil modeliran tok vode, je iz profila P2 razvidno, da povečanje koeficienta v strugi iz $0,10 \text{ ms}^{-1/3}$ na $0,15 \text{ ms}^{-1/3}$ pomeni povečanje globine iz 1,13 m na 1,48 m. Ta razlika kaže na sorazmerno velik vpliv koeficienta n_g .

6.3.3.2.2 Testiranje vpliva n_g na vršaju Bela (drobirski tok)

Pri testiranju vpliva koeficienta n_g na vršaju Bela pa je bil testiran vpliv različnih vrednosti koeficienta na rezultate modela drobirskega toka. Izdelanih je bilo več modelov, kjer so bile uporabljene različne kombinacije koeficientov n_g . V tem delu pa je bila testirana tudi možnost s konstantnim koeficientom n_g na celotnem območju. Pri določanju kombinacij koeficientov n_g so bile upoštevane tudi izkušnje, pridobljene pri testiranju na modelu Presušnika, čeprav je vpliv koeficienta n_g na vodo drugačen kot pri drobirskem toku. Ker namen tega dela raziskave ni bil umerjanje modela, smo pri izboru, poleg vrednosti iz literature, upoštevali še kombinacijo, ki je imela nerealne koeficiente - predvsem z namenom prikazati vpliv različnih vrednosti koeficienta n_g na rezultate.

Karakteristike obravnavanih modelov na vršaju hudournika Bela, so predstavljene v preglednici 26.

Preglednica 26: Vrednosti koeficienta n_g pri testiranju vpliva na Beli.

Table 26: Analyzed n_g values on Bela torrent.

ime modela	hidrogram	Koeficienti n_g [$\text{ms}^{-1/3}$]
Bela6	Q_{100} , (19h) $C_v=0,5$	gozd 0,12; ostalo 0,04
Bela8	Q_{100} , (19h) $C_v=0,5$	povsod 0,2
Bela17	Q_{100} , (19h) $C_v=0,5$	gozd 0,16; travnik 0,033; struga 0,13; območje hiš 0,2

Poleg podatkov, navedenih v zgornji preglednici, so bili pri modelih uporabljeni reološki parametri, ki so umerjene vrednosti za primer Loga pod Mangartom (primer: $C_v = 0,5$).

Vhodni hidrogram drobirskega toka je podrobno obrazložen v poglavju o hidroloških vhodnih podatkih in v obrazložitvi modelne magnitude drobirskega toka:

$$K = 2285 (-)$$

$$\text{Spec. teža sedimenta} = 27.000 \text{ N/m}^3$$

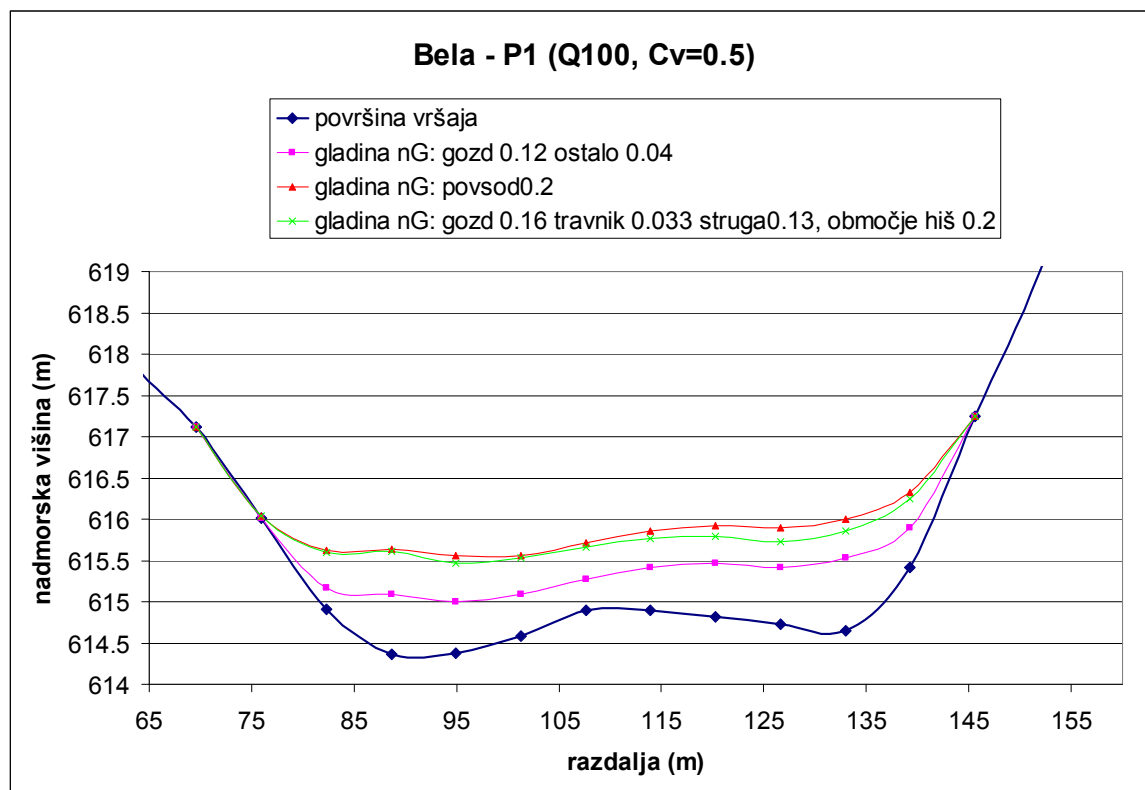
$$\tau = 2000 \text{ N/m}^2$$

$$\eta = 156 \text{ Pas}$$

V nadaljevanju je prikazana primerjava rezultatov modelov. Najprej sta prikazana dva prečna prereza. Eden izmed njiju je izbran na vrhu vršaja, kjer se hudourniška grapa razširi v vršaj, drugi pa je izbran v spodnjem delu vršaja, preko struge hudournika Bela (slika 48). Spodnji prečni prerez ne obsega celotnega vršaja, ker so globine izven območja struge tako majhne oz. so nekje enake 0, da se zaradi raztegnjenosti spodnje osi grafikona ne bi videle niti razlike globin v strugi. Nato pa je prikazana še primerjava globin in hitrosti različnih modelov, kjer so razlike komentirane in obrazložena odločitev za »končne« koeficiente hrapavosti n_g . Izbrani koeficienti so bili uporabljeni za nadaljnje analize modela in raziskave.

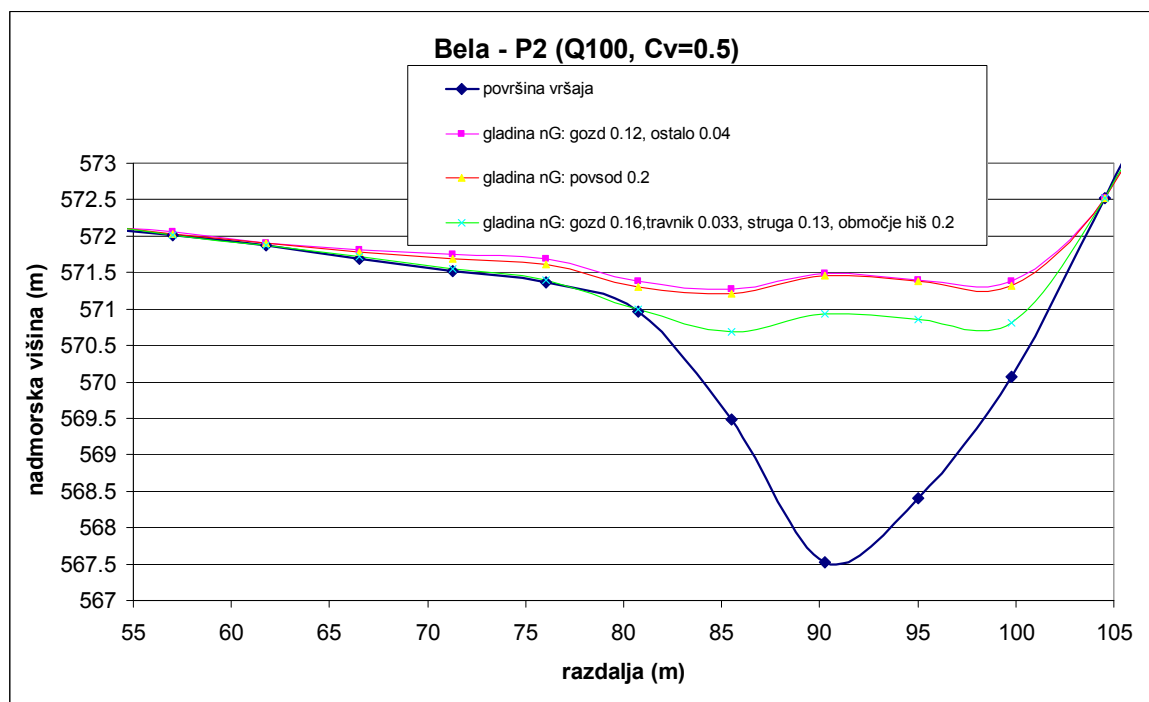


Slika 48: Pozicije izbranih prečnih prerezov na vršaju Bele.
Fig. 48: Cross sections positions on Bela fan.



Slika 49: Primerjava vpliva koeficienta n_g na maksimalne gladine v prerezu P1 (Bela).

Fig. 49: Influence of n_g on computed flow elevations in cross section P1 (Bela).



Slika 50: Primerjava vpliva koeficienta n_g na maksimalne gladine v prerezu P2 (Bela).

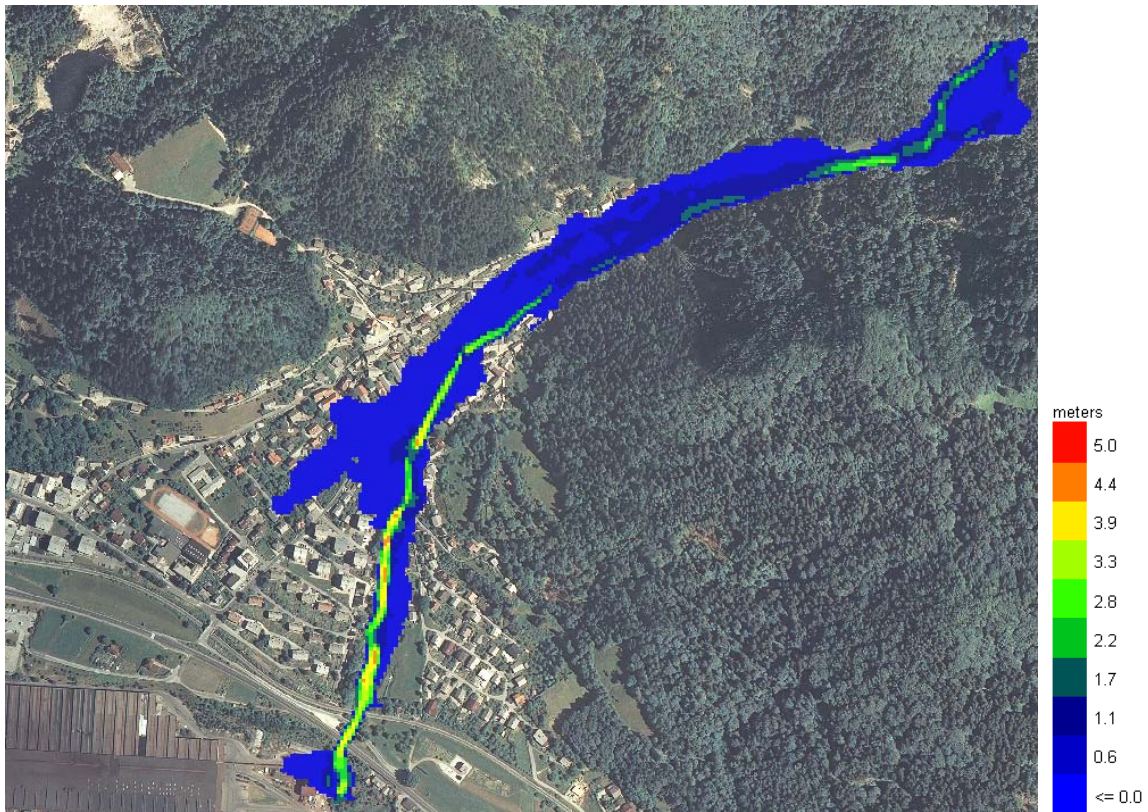
Fig. 50: Influence of n_g on computed flow elevations in cross section P2 (Bela).

V prerezih P1 in P2 so razvidne razlike med gladinami drobirskega toka, ki so posledica različnih vrednosti koeficienta n_g . Zanimivo je, da je slika gladin za posamezne modele v obeh prerezih različna. V P1 sta si bolj blizu gladini modelov Bela8 (n_g povsod $0,2 \text{ ms}^{-1/3}$) in Bela17 (gozd $0,16 \text{ ms}^{-1/3}$; travnik $0,033 \text{ ms}^{-1/3}$; struga $0,13 \text{ ms}^{-1/3}$; območje hiš $0,20 \text{ ms}^{-1/3}$), medtem ko sta si v prerezu P2 bliže gladini modelov Bela6 (gozd $0,12 \text{ ms}^{-1/3}$; ostalo $0,04 \text{ ms}^{-1/3}$) in Bela8 (n_g povsod $0,2 \text{ ms}^{-1/3}$).

V prerezu P1 (glej sliko 48), kjer je širina profila na vršaju še majhna, je delež poselitve relativno velik. V tem gre iskati vzrok za podobnost gladin modelov Bela8 in Bela17, saj pri obeh modelih na tem območju prevladuje koeficient n_g vrednosti $0,2 \text{ ms}^{-1/3}$. Pri modelu Bela8 je ta vrednost konstantna, pri modelu Bela17 pa je ta vrednost izbrana za zajem vpliva poselitve na vršaju. V prerezu P2, kjer pa sta si blizu gladini modelov Bela6 in Bela8 (višji od gladine Bela17), pa je situacija sledeča.

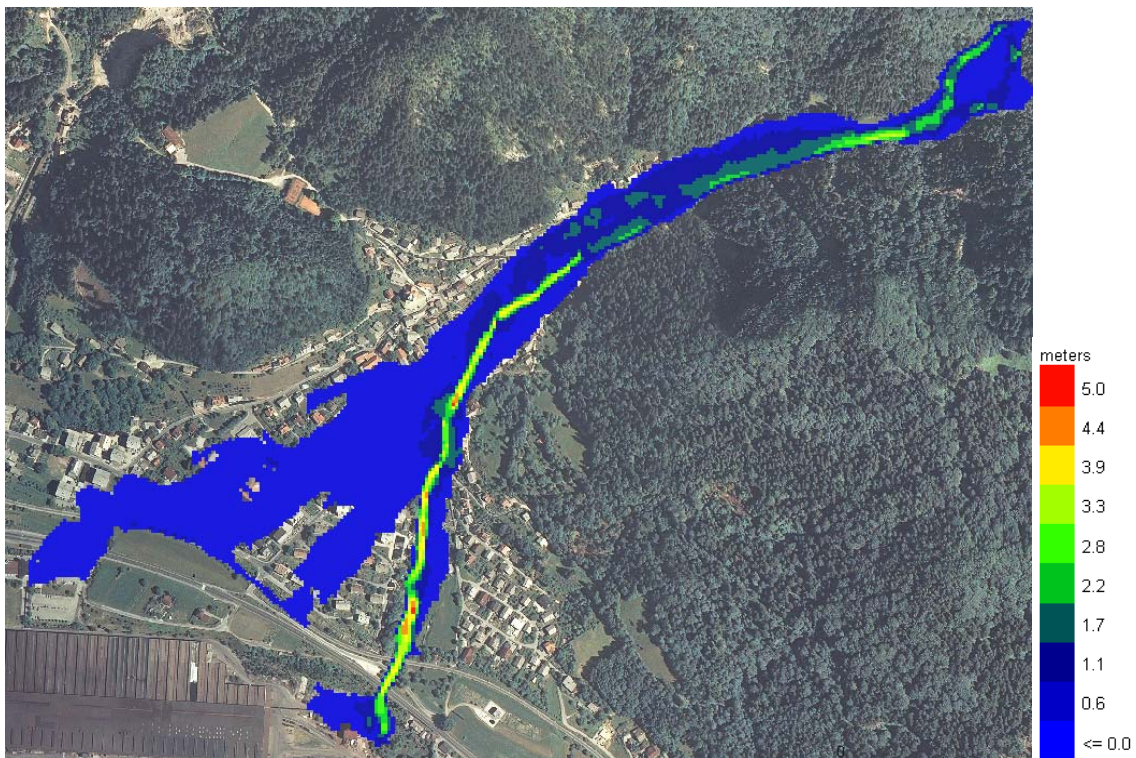
Profil P2 je lociran na dnu vršaja, kjer hudournik poteka ob gosto naseljenem območju na levi strani in gozdom na desni strani. Pri modelu Bela17 je vpliv naselja na levi strani in gozda na desni strani zajet z večjim koeficientom n_g . To povzroči večjo koncentracijo toka v strugi in s tem precej večje hitrosti. Večje hitrosti pa pomenijo manjše globine, kar je vidno na prerezu P2. Bistveno večje hitrosti v strugi kot drugje na vršaju bodo prikazane na sliki hitrosti modela Bela17 (Slika 56).

Ostala dva modela, Bela6 in Bela8, pa imata vpliv poselitve in gozda slabše zajet v koeficientu n_g . Zato so predvsem v modelu Bela8, kjer je koeficient n_g povsod enak, gladine pogojene predvsem s topografijo terena. Pri modelu Bela6, kjer pa je koeficient različen samo za gozd in za ostalo območje, pa vpliv izgub zaradi objektov spet ni zajet in je zato potek gladin precej podoben kot pri modelu Bela8. Pri primerjavi gladin v profilu P2 je potrebno še enkrat poudariti, da gre za primerjavo gladin na območju struge in ne čez celoten vršaj. V primeru prereza čez celoten vršaj je zaradi velike širine vršaja razlika med globinami preslabo opazna. Pri tem gre poudariti, da je tudi razlivanje toka izven območja struge pri različnih modelih različno. Ta pojav je jasno razviden tudi na slikah 51-53.



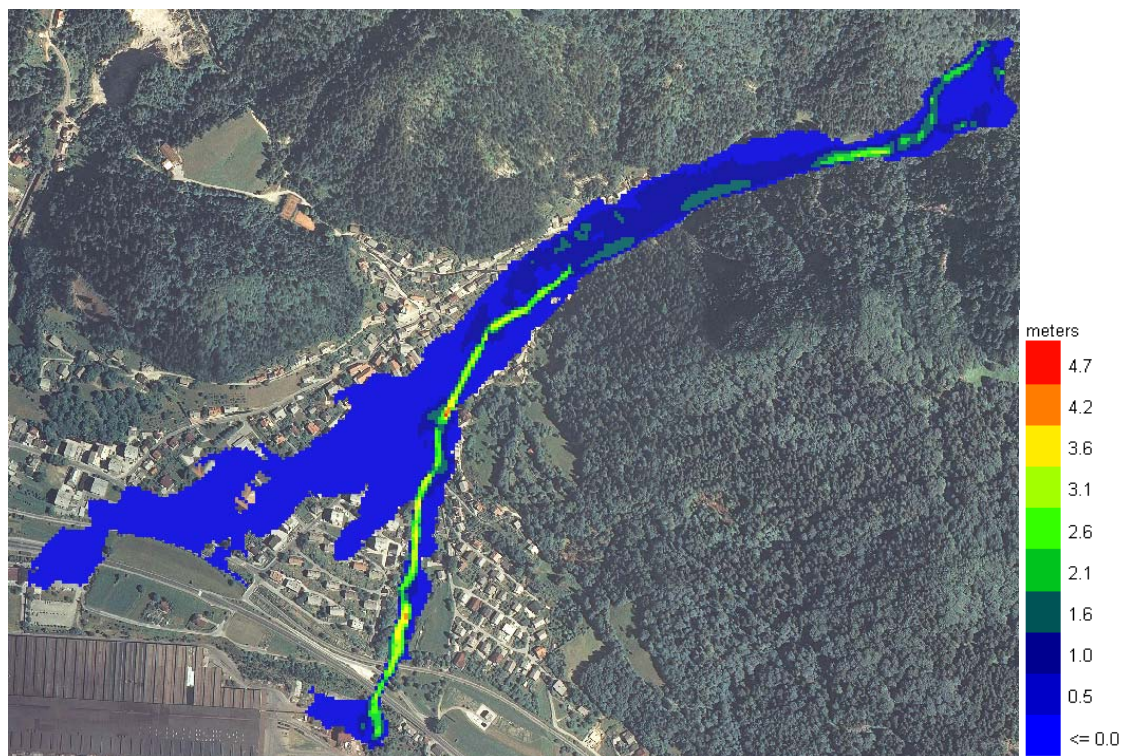
Slika 51: Maksimalne globine drobirskega toka pri modelu Bela6 (5x5, Q_{100} , $C_v = 0,5$ n_g : gozid 0,12; ostalo območje 0,04).

Fig. 51: Maximum flow depth in model Bela6 (5x5, Q_{100} , $C_v = 0,5$ n_g : forrest 0,12; rest of the area 0,04).



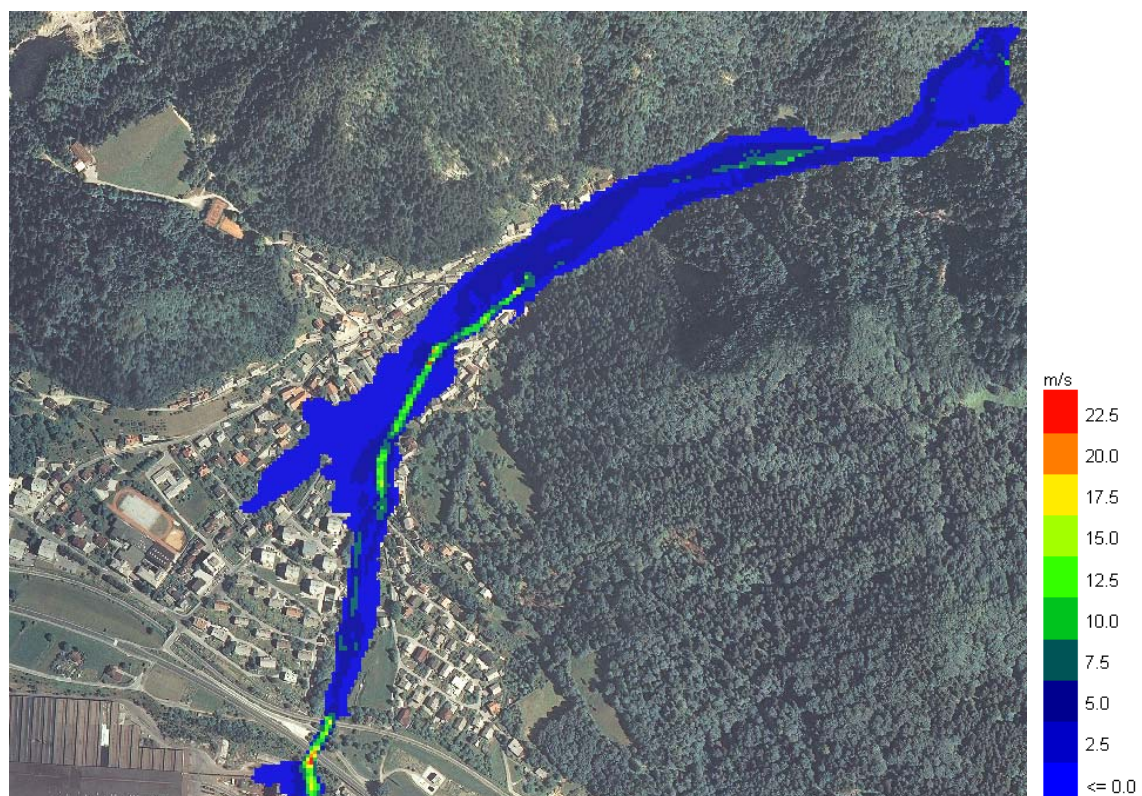
Slika 52: Maksimalne globine drobirskega toka pri modelu Bela8 (5x5, Q_{100} , $C_v = 0,5$ n_g : povsod 0,2).

Fig. 52: Maximum flow depth in model Bela8 (5x5, Q_{100} , $C_v = 0,5$ n_g : 0,2).



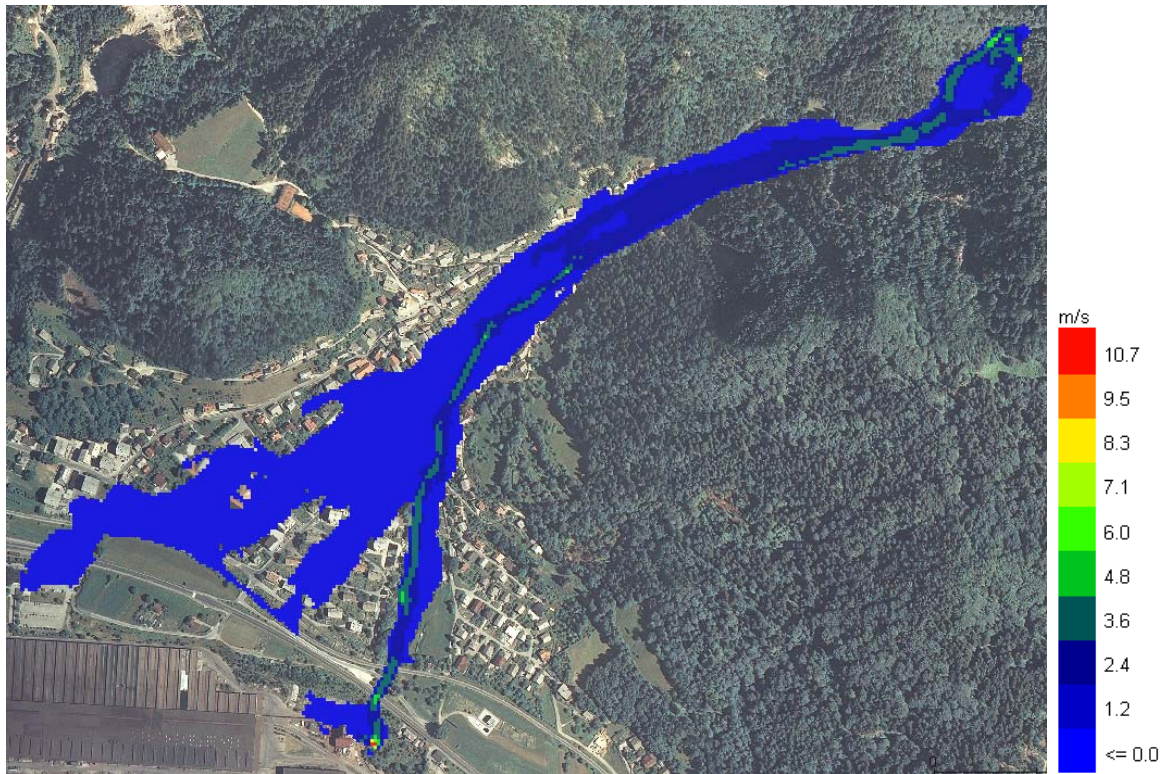
Slika 53: Maksimalne globine drobirskega toka pri modelu Bela17 (5x5, Q_{100} , $C_v = 0,5$ n_g : gozd 0,16; travnik 0,033; struga 0,13; območje hiš 0,2).

Fig. 53: Maximum flow depth in model Bela17 (5x5, Q_{100} , $C_v = 0,5$ n_g : forrest 0,16; meadow 0,033; channel 0,13; area with houses 0,2).

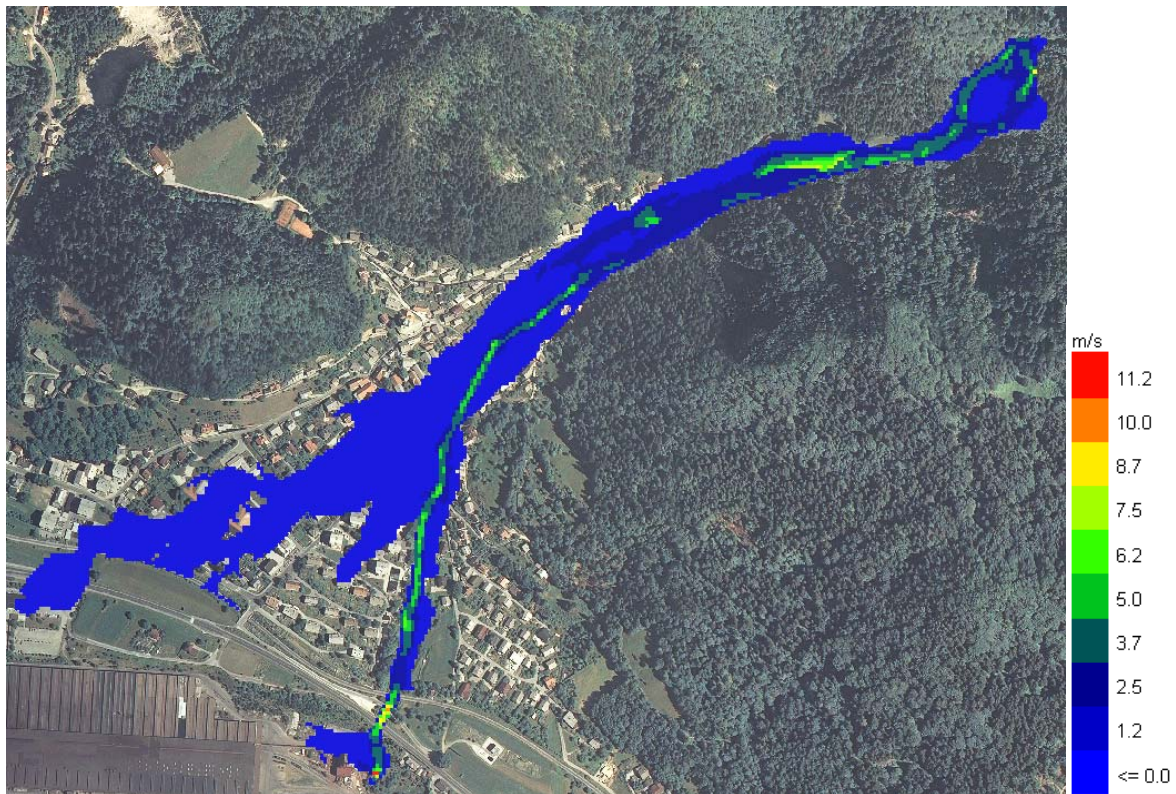


Slika 54: Maksimalne hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela6 (parametri: glej sliko 51).

Fig. 54: Maximum flow velocity in model Bela6 (parameters: see fig. 51).



Slika 55: Maksimalne hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela8 (parametri: glej sliko 52).
Fig. 55: Maximum flow velocity in model Bela8 (parameters: see fig. 52).



Slika 56: Maksimalne hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela17 (parametri: glej sliko 53).
Fig. 56: Maximum flow velocity in model Bela17 (parameters: see fig. 53).

Iz primerjave zgornjih slik (slike 51-56) je razviden vpliv različnih koeficientov n_g na hitrosti toka. Pri modelu Bela6 (gozd $0,12 \text{ ms}^{-1/3}$; ostalo $0,04 \text{ ms}^{-1/3}$) (slika 54) so vidne zelo visoke hitrosti, ki dosegajo tu vrednosti okrog 20 m/s. To kaže na to, da je koeficient $0,04 \text{ ms}^{-1/3}$ očitno prenizek za obravnavani primer. Pri primerjavi hitrosti med modeloma Bela8 (n_g povsod $0,2 \text{ ms}^{-1/3}$) (slika 55) in Bela17 (gozd $0,16 \text{ ms}^{-1/3}$; travnik $0,033 \text{ ms}^{-1/3}$; struga $0,13 \text{ ms}^{-1/3}$; območje hiš $0,20 \text{ ms}^{-1/3}$) (slika 56) pa je vidno, da enoten koeficient n_g pomeni precej nizke hitrosti po celotnem območju, predvsem pa ni dovolj izrazita struga. To je razvidno iz rezultatov modela Bela17, kjer je tok bolj koncentriran po območju struge.

6.3.3.3. Zaključki analize vpliva koeficienta n_g

Na podlagi zgornje analize vpliva koeficienta n_g , v kateri so bile uporabljene različne kombinacije koeficientov, smo za nadaljnje analize izbrali varianto, ki je bila uporabljena pri modelu Bela17 in sicer: gozd $0,16 \text{ ms}^{-1/3}$; travnik $0,033 \text{ ms}^{-1/3}$; struga $0,13 \text{ ms}^{-1/3}$; območje hiš $0,20 \text{ ms}^{-1/3}$. Ta kombinacija je bila izbrana iz več razlogov. Prvi so realni rezultati, saj so maksimalne hitrosti na vršaju 3-5 m/s, v strugi hudournika pa 7-9 m/s. V primeru modeliranja drobirskih tokov v Koseču so bile hitrosti v strugi pri pretoku $500 \text{ m}^3/\text{s}$ 12-14 m/s, ob robovih pa približno 1-2 m/s. Pri tem je potrebno povedati, da je povprečni naklon struge hudournika Brusnik na tem delu okrog 20 %. (Hojnik, 2004). Naklon struge hudournika Bela čez vršaj pa je okrog 9 %. Sicer pa je povprečni naklon celotne struge hudournika Bela 11,9 % (VGI, 1995), Brusnika pa 37 % (VGI, 2002). Drugi vzrok je bil, da je vsekakor potrebno obravnavati različne površine z različnimi koeficienti hrapavosti n_g , saj je pri modelu Bela17 razvidno, kako lahko različne vrednosti za različne površine vplivajo na rezultate gladin in hitrosti toka. Ti rezultati pa so zelo pomembni pri morebitni uporabi za izdelavo kart.

Določanje koeficienta hrapavosti n_g je sicer najbolj natančno izvedljivo z umerjanjem modela na pretekle dogodke, kot je bila praksa tudi v dosedanjih izkušnjah z modeliranjem drobirskih tokov v Sloveniji (Rajar et al., 2001; Hojnik et al., 2001; Mikoš et al., 2006; Hojnik, 2004). Vendar v primeru, ko želimo modelirati potencialni drobirski tok na izbranem območju, umerjanje modela, žal, ni možno. Tudi zato smo se v tej raziskavi odločili, da se koeficiente določi na podlagi literature (O'Brien, 2006; Julien, 2002; Ven Te Chow, 1959), dosedanjih izkušenj z modeliranjem in predvsem na podlagi analize rezultatov modelov z različnimi kombinacijami koeficientov n_g . Pri izbiri koeficientov za določen primer je potrebno biti

previden, saj se od primera do primera drobirskega toka (različne magnitude, različna reologija...) lahko vpliv koeficientov hrapavosti n_g precej spreminja.

Tudi sicer je pri vnosu koeficientov hrapavosti n_g v model lahko nekaj težav, saj je potrebno določiti koeficient posameznim celicam na mreži. To se najlažje izvaja s podlogo DOF, kjer se prepozna tip površine, ki se mu nato v računski mreži določi pripadajoči koeficient hrapavosti n_g . Največja težava je vnos koeficienta za strugo, saj je lahko točna os struge iz DOF posnetka slabo razvidna. To pomeni, da je delo vnašanja koeficientov lahko zelo zamudno, še posebej, če želimo natančno določiti lastnosti predvsem mejnih celic. Ta problem je še večji pri modelih z večjimi računskimi celicami, npr. 15 m x 15 m. V teh primerih je natančnost vnosa lahko še bolj sporna, saj je širina struge večine obravnavanih, tudi slovenskih hudournikov manjša od 15 m.

Splošen zaključek tega dela raziskave je lahko, da ima koeficient n_g pomemben vpliv na rezultate pri modeliranju drobirskih tokov. Določanje koeficienta je pomembno in zato je pri tem potrebno upoštevati tako priporočene vrednosti iz literature, kot tudi dosedanje izkušnje z modeliranjem. Predvsem pa je potrebno biti pozoren na specifiko posameznega primera in inženirsko presoditi, kako lahko izbor vpliva na želene rezultate.

6.3.4 Velikost celic računske mreže

6.3.4.1. Potek analize

Prikazan je vpliv velikosti računskih celic oz. gostote računske mreže. Gostota računske mreže je pomemben dejavnik z več vidikov. Prvi je zagotovo natančnost izračuna gibanja toka, ki ga omogoča gosta mreža oz. majhne računske celice na računskem območju. Z gosto mrežo so podrobno zajeti tudi detajli toka kot so tok ob objektih, tok na zožitvah in podobno. Dovolj gosta računska mreža pomeni tudi boljši zajem geometrije struge, ki kot je bilo že povedano, ni bila dodatno posneta, ampak je bila avtomatsko zajeta do določene natančnosti v podatkih DMV5. Po drugi strani pa gostota mreže pomeni tudi zelo velik dejavnik pri času izračuna, saj velikost računskih celic znotraj računskega območja pogojuje tudi število celic, ki vplivajo na število računskih korakov pri izračunu, in s tem tudi na čas računanja.

Glede na to, da smo v tej raziskavi uporabili za podatek o terenu DMV5, kjer so višinske točke posnete na medsebojni razdalji 5 m oz. z resolucijo 5 m, smo izbrali dve varianti velikosti računskih celic, 5 m x 5 m in 15 m x 15 m. Mreža 5 m x 5 m je bila izbrana za najgostejšo, saj manjše računske celice, kot je gostota posnetih točk terena, ni bila smiselna. Manjše računske celice bi pomenile, da bi program moral vmesne celice dodatno interpolirati iz istih višinskih točk DMV, ki so že bile uporabljene za izračun višin sosednjih celic. Tak postopek ne prinese večje geometrijske in višinske natančnosti računske mreže. Velikost 15 m x 15 m pa je bila izbrana zato, da bi lahko v določenih fazah pospešili račune, poleg tega pa je bila večja velikost celic uporabljena za analizo vpliva velikosti računske celice. Več o načinu interpolacije višin računskih celic je napisano v poglavju 4 o delovanju modela Flo-2D.

Na tem mestu se je potrebno zavedati tudi dejstva, da je pri mreži 15 m x 15 m izračun višin računskih celic manj natančen, saj ima ena celica eno višino, pri razmerju mreže 5 x 5 ali 15 x 15, pa je v primeru večjih celic območje 9 manjših celic zajeto samo z eno celico in zato samo z eno višino. Več o tem je napisano v komentarjih rezultatov.

Najprej so podani podatki o številu računskih celic na posameznem vršaju in okvirni čas računanja posameznega tipa modela v odvisnosti od velikosti računske celice. Uporabljen je bil računalnik z zmogljivostmi: procesor Intel Core2Duo 3,0 GHz, 4 Gb RAM.

Preglednica 27: Število celic in čas računanja v odvisnosti od velikosti računske celice.
Table 27: Number of grid cells and computational time according to grid cell size.

Hudourniški vršaj	Število računskih celic pri različnih velikostih računskih celic		Čas računanja pri različnih velikostih računskih celic (dogodek 19h)	
	5m x 5m	15m x 15m	5m x 5m	15m x 15m
Trebiža	31.953	3.717	80-100 ur	12 - 50 min
Bela	21.708	2.385	40-60 ur	8 - 25 min
Suhelj	25.050	8.687	30-35 ur	7 - 20 min
Presušnik	11.264	998	20-25 ur	5 - 60 min

6.3.4.2 Predstavitev modelov, uporabljenih v analizi

Pri testiranju vpliva velikosti računske mreže je bilo na vršaju Bele uporabljenih več variant. Izdelan je bil sistem modelov, v katerih so uporabljene različne gostote mreže in različni reološki podatki. S tem delom raziskave smo želeli ugotoviti, kako velikost celic vpliva na

izračune pri modelu vode in različnih drobirskih tokov. Najprej je podana preglednica, v kateri so predstavljeni vsi glavni parametri modelov, ki so bili uporabljeni v tem delu raziskave. V preglednici je naveden tudi čas računanja posameznih modelov, kjer je razviden vpliv velikosti in števila računskih celic na čas računanja konkretnih modelov.

Preglednica 28: Pregled modelov in podatkov pri analizi vpliva velikosti celice.
Table 28: Models included in grid cell size sensitivity analysis.

Ime modela	Mreža	C_v	Hidrogram	Čas računanja
Bela11	15x15	0 (voda)	$Q_{100, (19h)}$	5 min
Bela9	5x5	0 (voda)	$Q_{100, (19h)}$	40 ur
Bela13	15x15	0,5	$Q_{100, (19h)} C_v=0,5$	7 min
Bela17	5x5	0,5	$Q_{100, (19h)} C_v=0,5$	57 ur
Bela14	15x15	0,42	$Q_{100, (19h)} C_v=0,42$	8 min
Bela19	5x5	0,42	$Q_{100, (19h)} C_v=0,42$	40 ur

Ostali vhodni podatki, uporabljeni v modelih pa so obrazloženi v nadaljevanju. Računsko območje je bilo pri vseh modelih z mrežo 5 m x 5 m enako, prav tako pri vseh modelih z mrežo 15 m x 15 m, kar omogoča primerjavo rezultatov po posameznih celicah ali prerezih. Prav tako je bila enaka tudi pozicija vhodnega hidrograma. Ostali vhodni podatki modela so bili povsod enaki in so imeli vrednosti:

koeficienti $n_g [ms^{-1/3}]$: gozd 0,16; travnik 0,033; struga 0,13; območje hiš 0,20

reologija pri koncentraciji $C_v = 0,5$ (umerjeno za Log pod Mangartom)

$$K = 2285 (-)$$

$$\text{spec. teža sedimenta} = 27.000 \text{ N/m}^3$$

$$\tau = 2000 \text{ N/m}^2$$

$$\eta = 156 \text{ Pas}$$

reologija pri koncentraciji $C_v = 0,42$ (umerjeno za Log pod Mangartom)

$$K = 2285 (-)$$

$$\text{spec. teža sedimenta} = 27.000 \text{ N/m}^3$$

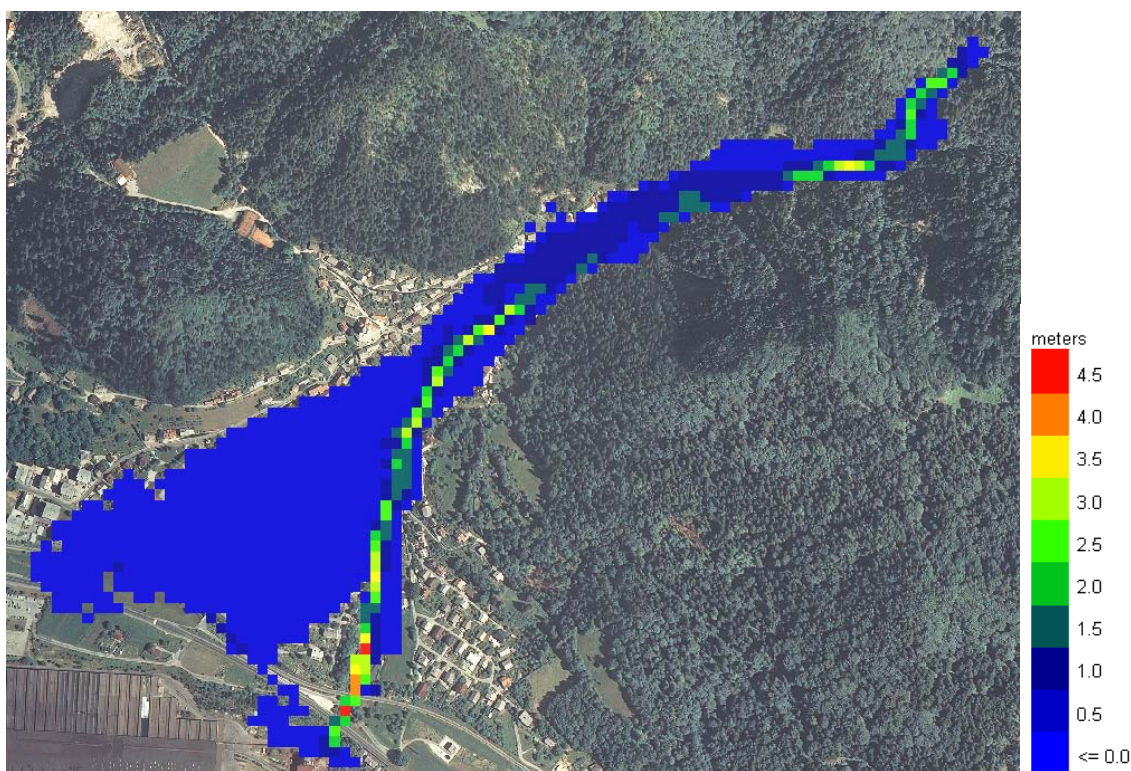
$$\tau = 20 \text{ N/m}^2$$

$$\eta = 10 \text{ Pas}$$

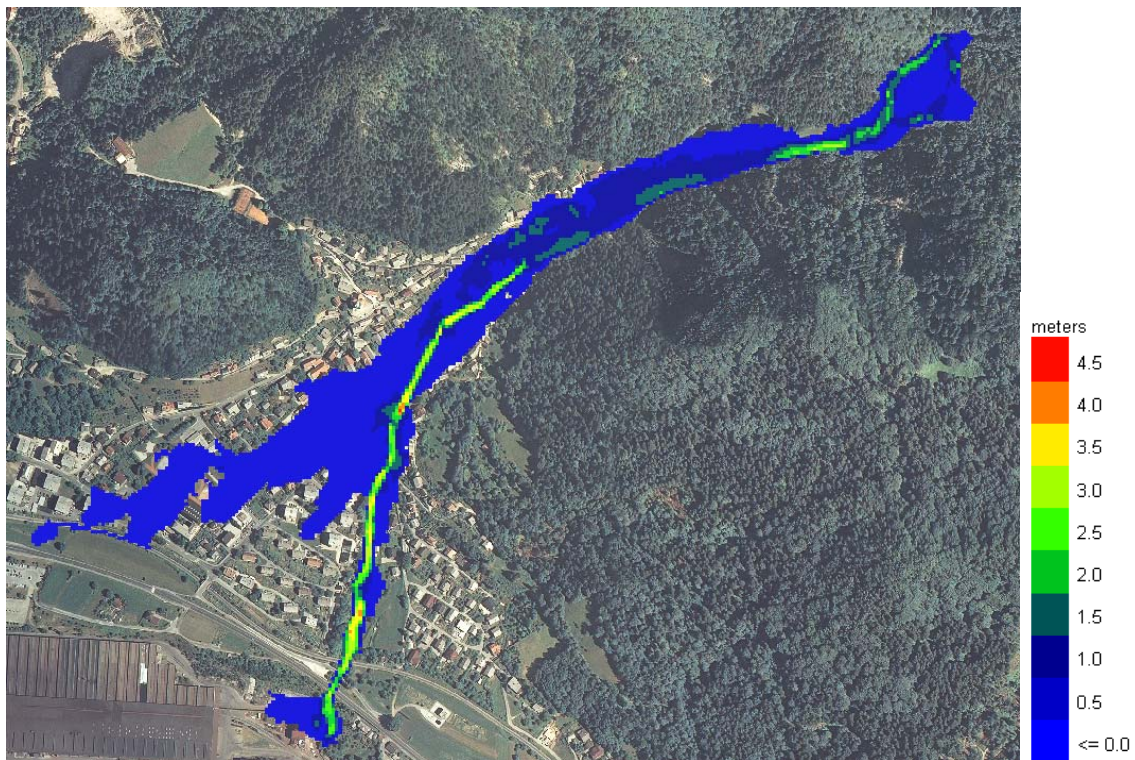
6.3.4.3 Predstavitev rezultatov s komentarji

Podrobno bosta predstavljena modela Bela14 in Bela19, kjer bo razviden vpliv gostote mreže pri računanju gibanja drobirskega toka z volumsko koncentracijo $C_v = 0,42$. Drobirski tok s takimi reološkimi lastnostmi je prizadel tudi Log pod Mangartom (Rajar et al., 2001; Hojnik et al., 2001).

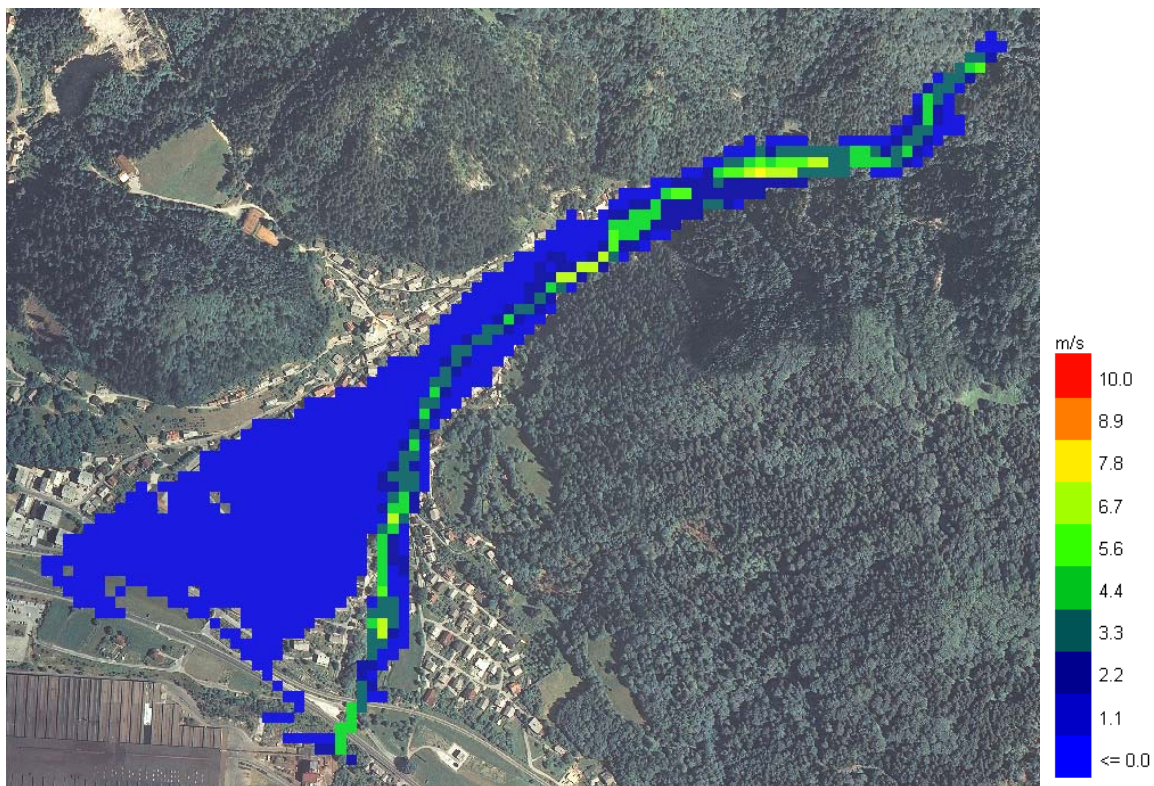
Primerjava rezultatov je podana s slikami globin in hitrosti toka. Prikazana pa je tudi podrobnejša primerjava rezultatov v izbranem zgornjem delu vršaja, kjer je prikazan tudi prečni prerez z gladino drobirskega toka pri računu z mrežo 5 m x 5 m in mrežo 15 m x 15 m.



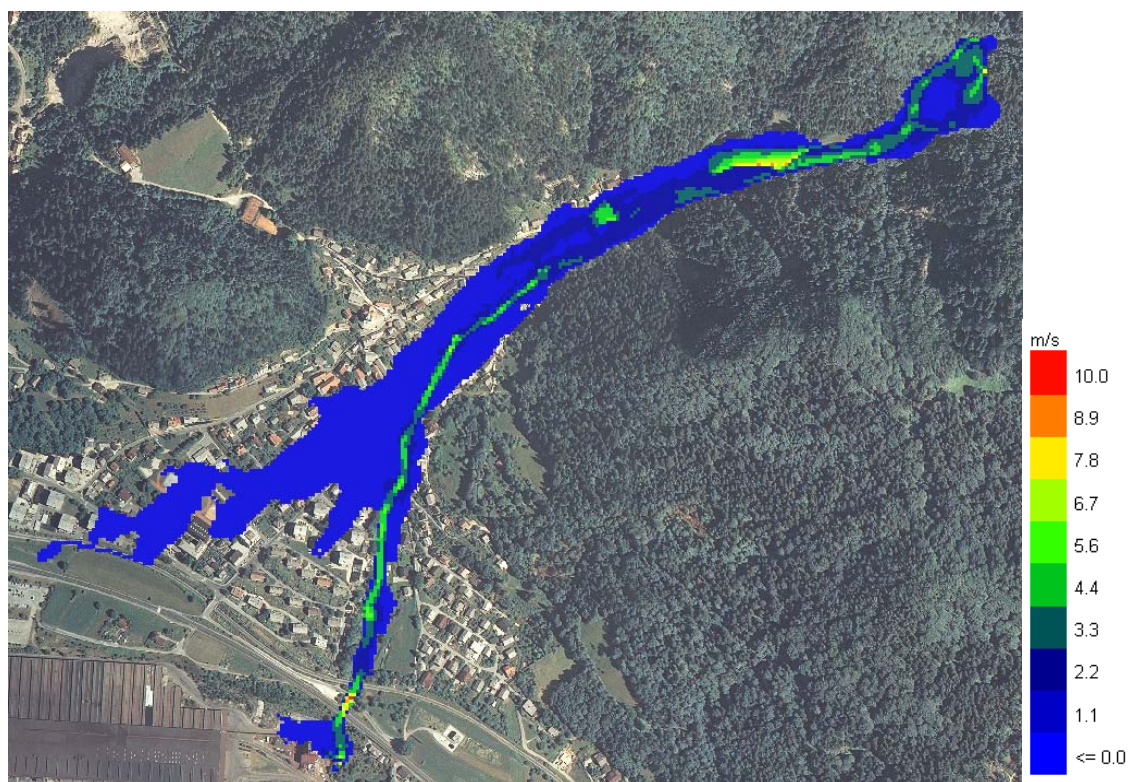
Slika 57: Maksimalne globine drobirskega toka pri modelu Bela14 (15x15, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$).
Fig. 57: Maximum flow depth in model Bela14 (15x15, hydrograph Q_{100} , $C_v = 0,42$).



Slika 58: Maksimalne globine drobirskega toka pri modelu Bela19 (5x5, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$).
Fig. 58: Maximum flow depth in model Bela19 (5x5, hydrograph Q_{100} , $C_v = 0,42$).



Slika 59: Maksimalne hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela14 (15x15, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$).
Fig. 59: Maximum flow velocity in model Bela14 (15x15, hydrograph Q_{100} , $C_v = 0,42$).



Slika 60: Maksimalne hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela19 (5x5, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$).
Fig. 60: Maximum flow velocity in model Bela19 (5x5, hydrograph Q_{100} , $C_v = 0,42$).

Iz primerjave zgornjih dveh rezultatov (slike 57-60) je razvidno, da so izračunane hitrosti in globine v grobem zelo podobne. Maksimalne hitrosti in globine so zelo podobnih vrednosti. Razvidno pa je tudi to, da je pri celicah 5 m x 5 m račun bolj natančen. Polja hitrosti in globin so bolj natančno razdelana in meje med posameznimi polji so bolj natančno vidne. Več o tem bo prikazano v podrobnejši primerjavi rezultatov.

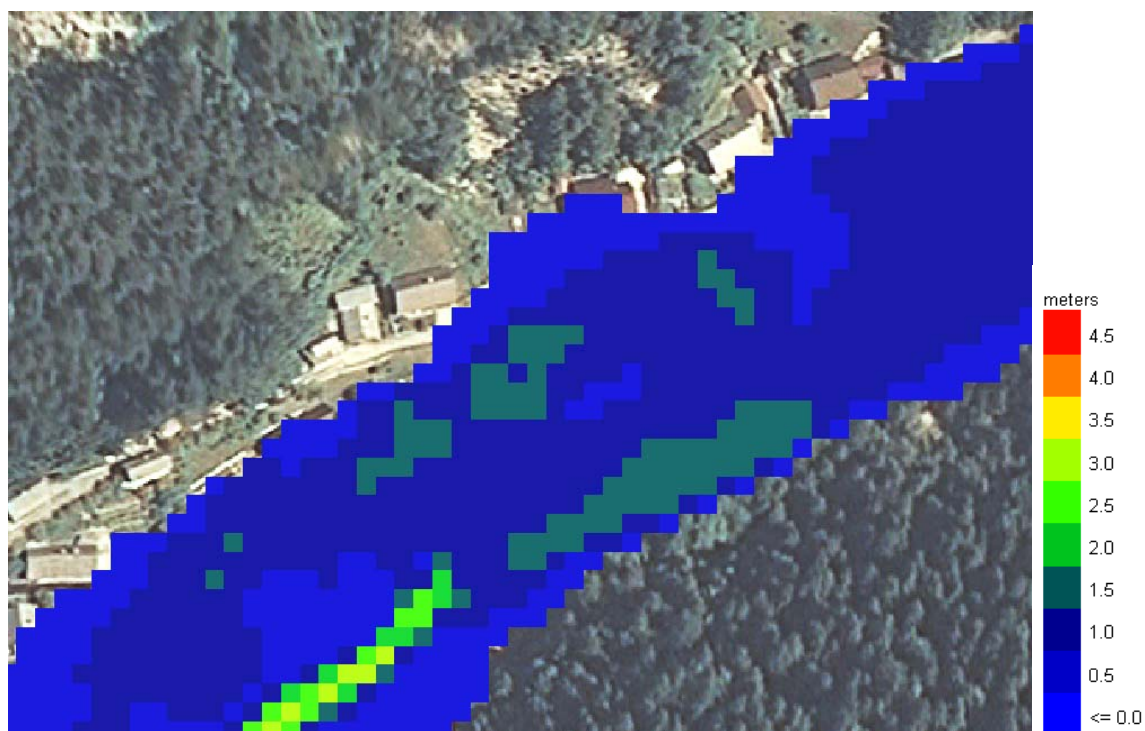
Določena razlika je opazna na slikah globin toka (sliki 57 in 58), kjer se vidi različni območji razlivanja toka, kar je posledica različnih velikosti računskih celic. Vendar pri pozornem pregledu rezultatov opazimo, da je največja razlika v območju razlivanja opazna v spodnjem delu vršaja, kjer pa so globine toka minimalne. To kaže na to, da je mreža 15 m x 15 m manj natančna in da je zaradi velikosti celic »preskok« toka iz celice v sosednjo, očitno hitrejši, kar povzroči manjšo natančnost rezultatov. To je posebej problematično pri celicah z »mejno« globino na položnejših odsekih, kjer je zelo odvisno od velikosti celice, ali bo aktivna ali bo ostala suha. To domnevo potrjujejo tudi rezultati v zgornjem delu vršaja, kjer je ujemanje rezultatov boljše. Na tem delu je vršaj še ožji in je geometrija bolj izrazita, poleg tega pa so na

tem delu hitrosti in globine večje. Pozitivno pri teh ugotovitvah je, da je ujemanje rezultatov z mrežo 5 m x 5 m in mrežo 15 m x 15 m dobro na območjih, kjer je pojav intenziven oz. so hitrosti in globine velike. Ujemanje pa je slabše na delu, kjer so, sodeč po rezultatih modela, globine med 0 m in 0,5 m in hitrosti med 0 m/s in 1,1 m/s, kar pa pomeni, da je na tem delu delovanje drobirskega toka manj intenzivno in je zato z vidika ocenjevanja nevarnosti to področje manj pomembno.

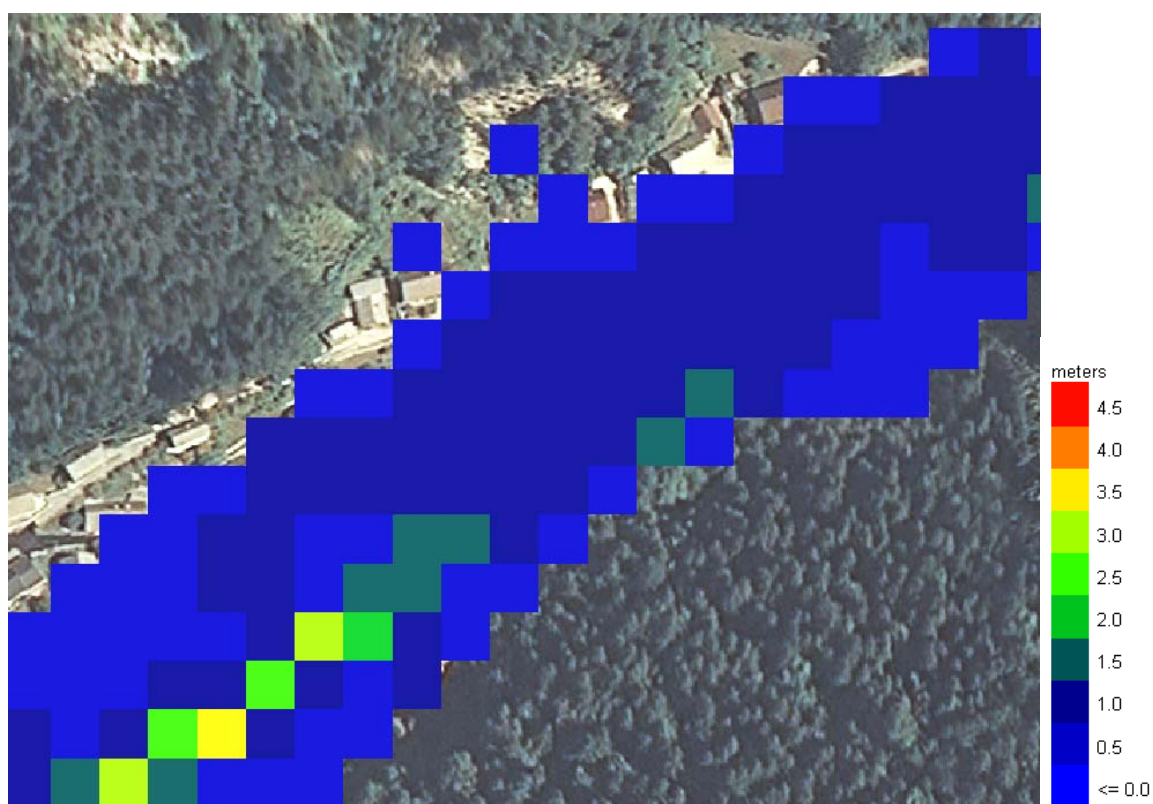
Prikazana je še podrobnejša primerjava rezultatov v zgornjem delu vršaja (območje prereza P1), kjer so prikazani podrobnejši rezultati izračunanih hitrosti in globin, prav tako pa je prikazan prečni prerez P1 na modelu z mrežo 5 m x 5 m in z mrežo 15 m x 15 m. Tukaj je prikazana tako razlika v izračunu globin kot tudi v zajemu geometrije terena, ki je odvisen od velikosti računskih celic.



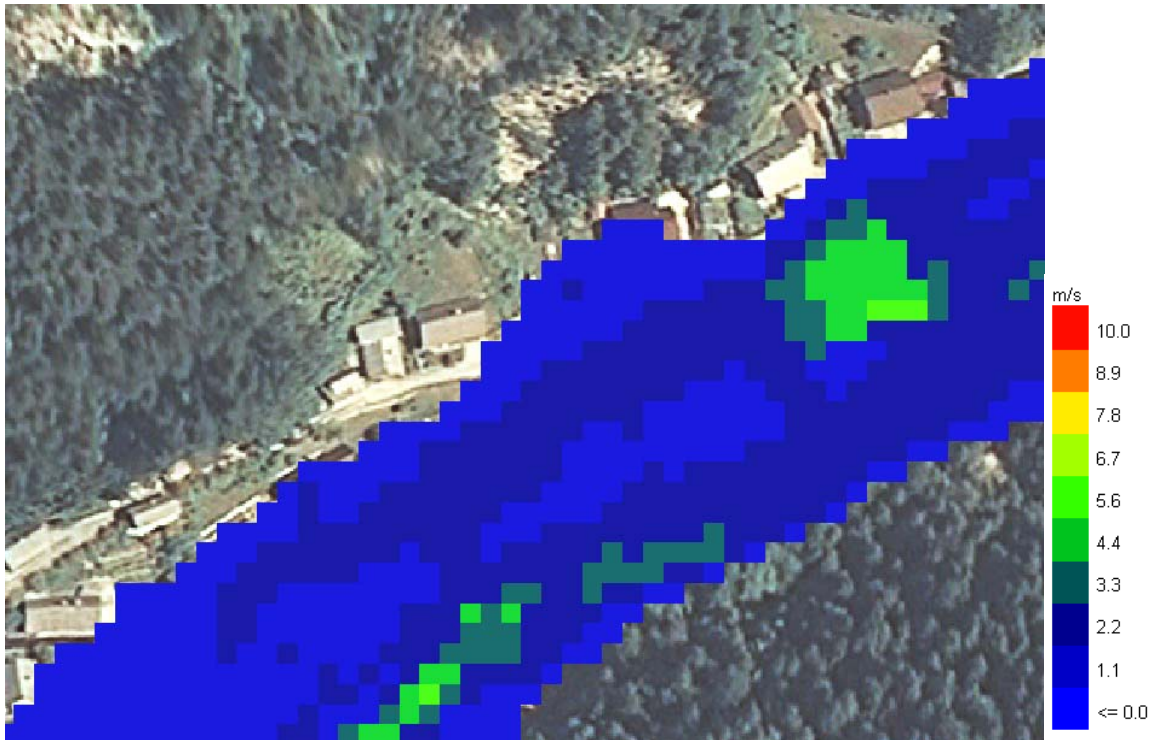
Slika 61: Zgornji del vršaja (območje P1), kjer bo prikazana podrobnejša primerjava rezultatov.
Fig. 61: Upper part of Bela fan, where detailed comparison of results is prepared.



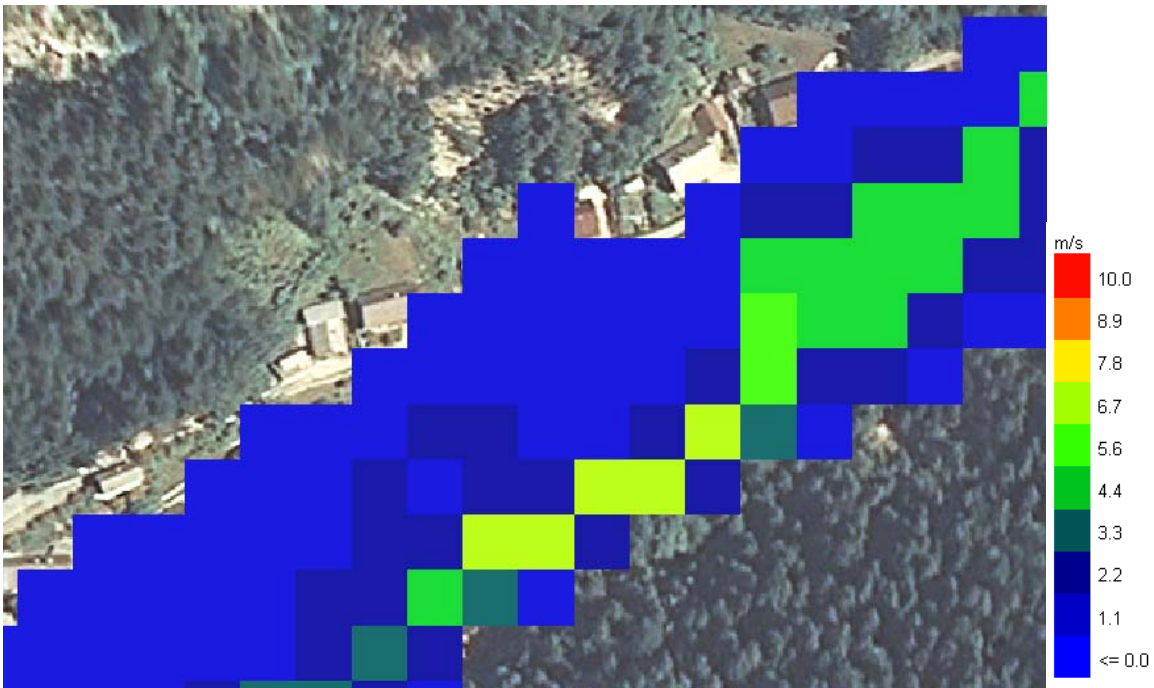
Slika 62: Detajl izračunanih globin pri računski mreži 5m x 5m (Bela19, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$).
Fig. 62: Detailed presentation of maximum flow depth (grid 5x5, Bela19, hydrograph Q_{100} , $C_v = 0,42$).



Slika 63: Detajl izračunanih globin pri računski mreži 15m x 15m (Bela14, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$).
Fig. 63: Detailed presentation of maximum flow depth (grid 15x15, Bela14, hydrograph Q_{100} , $C_v = 0,42$).



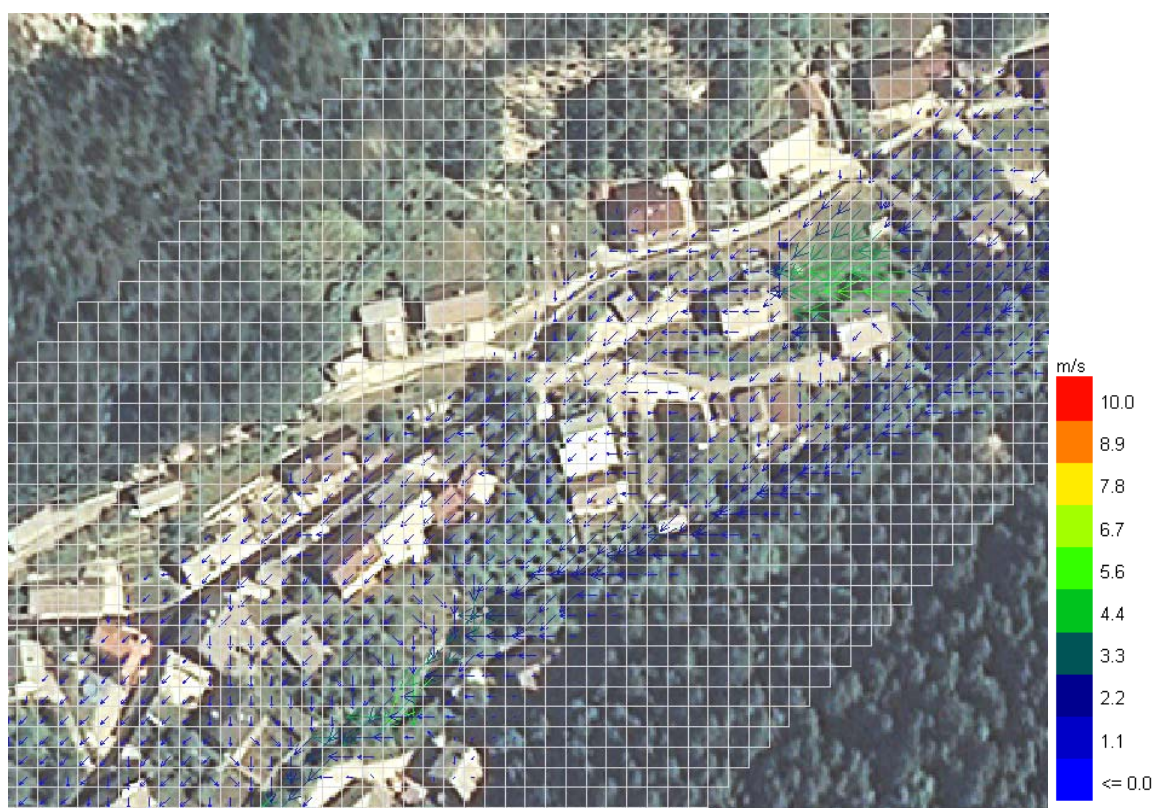
Slika 64: Detajl izračunanih hitrosti pri računski mreži 5m x 5m (Bela19, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$).
Fig. 64: Detailed presentation of maximum flow velocity (grid 5x5, Bela19, hydrograph Q_{100} , $C_v = 0,42$).



Slika 65: Detajl izračunanih hitrosti pri računski mreži 15m x 15m (Bela14, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$).
Fig. 65: Detailed presentation of maximum flow velocity (grid 15x15, Bela14, hydrograph Q_{100} , $C_v = 0,42$).

Pri podrobnejši primerjavi rezultatov globlin (sliki 62 in 63) in hitrosti (sliki 64 in 65) je najprej opazna predvsem večja natančnost izpisa rezultatov pri mreži 5 m x 5 m. Bistvena prednost so boljši detajli. Natančneje so zajete lokalne pospešitve in lokalne zaježitve toka. V grobem so hitrosti in globine podobne (iste vrednosti), ampak pri mreži 5 m x 5 m je veliko bolj točna razdelitev vrednosti tako globlin kot hitrosti. Poleg tega je pri mreži 15 m x 15 m opaziti več lokalnih povišanj hitrosti na območju struge hudournika.

Pri tem je potrebno poudariti, da pri gostejši oz. redkejši mreži ne gre le za bolj ali manj natančno računsko mrežo. Pri različnih gostotah mreže gre za pomemben faktor natančnosti geometrije. Pri obeh mrežah je osnova podatek DMV5, na katerem je potem generirana računaska mreža z želeno velikostjo kvadratnih celic. Nato je višina vsake celice izračunana s pomočjo interpolacije več točk višin iz podatka DMV5. To pomeni, da je poleg gostote mreže lahko rahlo različna tudi višina računskih celic na isti (X,Y) točki vršaja. Poleg morebitne različne višine celic so pri večji mreži slabše zajete topografske lastnosti terena. Glavni pomislek na tem mestu je vprašanje natančnosti zajema geometrije struge hudournika.



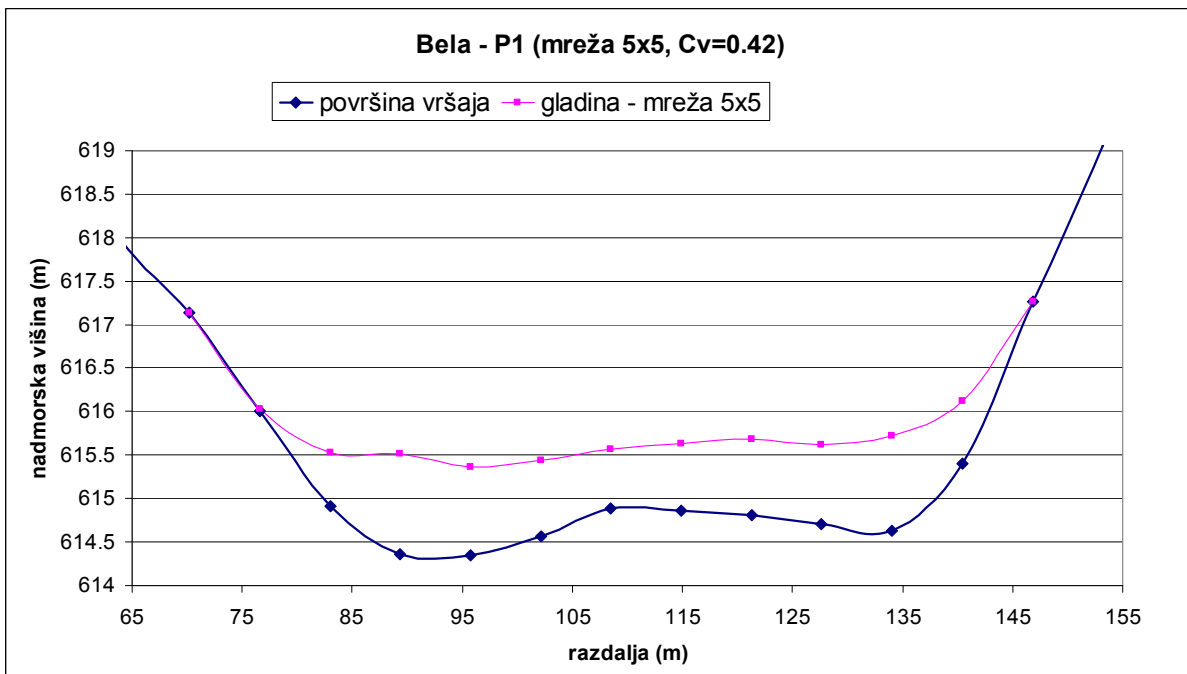
Slika 66: Detajl izračunanih hitrosti (vektorski prikaz) pri računski mreži 5m x 5m (Bela19, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$).

Fig. 66: Detailed presentation of maximum flow velocity - vectors (grid 5x5, Bela19, hydrograph Q_{100} , $C_v = 0,42$).



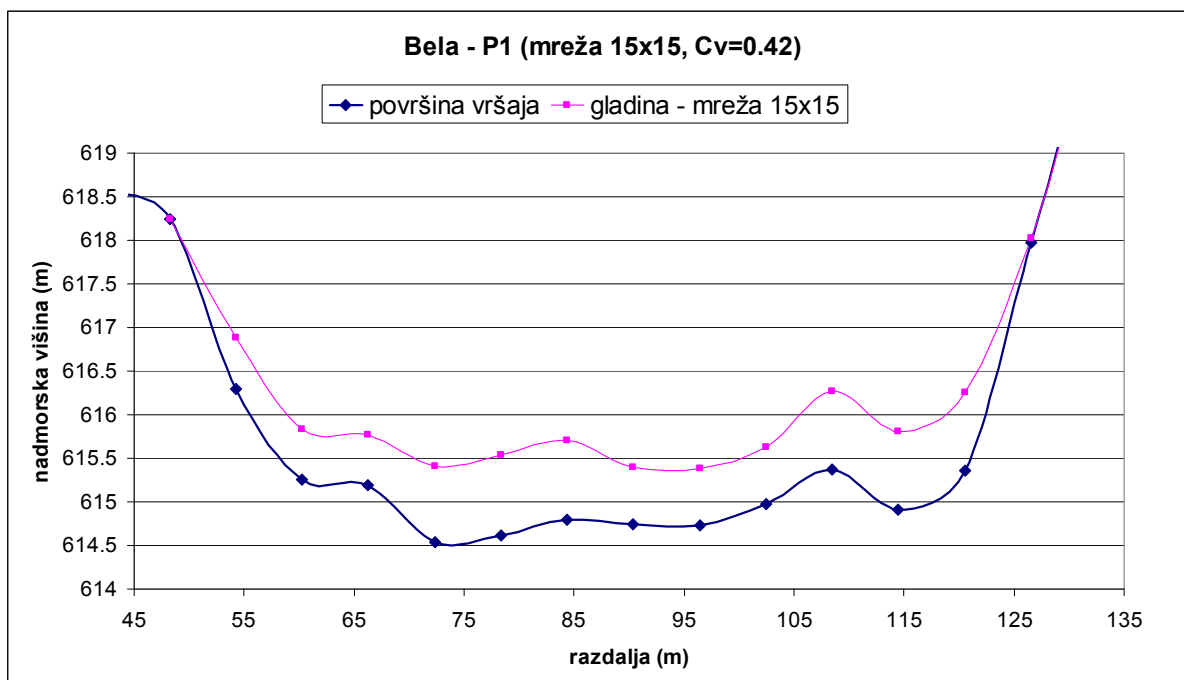
Slika 67: Detajl izračunanih hitrosti (vektorski prikaz) pri računski mreži 15m x 15m (Bela14, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$).

Fig. 67: Detailed presentation of maximum flow velocity – vectors (grid 15x15, Bela14, hydrograph Q_{100} , $C_v = 0,42$).



Slika 68: Gladina drobirskega toka v profilu P1 pri mreži 5x5 (Bela 19, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$).

Fig. 68: Debris flow elevation in cross section P1 (grid 5x5, Bela19, hydrograph Q_{100} , $C_v = 0,42$).



Slika 69: Gladina drobirskega toka v profilu P1 pri mreži 15x15 (Bela 14, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$).
Fig. 69: Debris flow elevation in cross section P1 (grid 15x15, Bela14, hydrograph Q_{100} , $C_v = 0,42$).

Vektorski prikaz hitrosti pokaže na še nekaj razlik med izračunom z mrežo 5 m x 5 m in mrežo 15 m x 15 m. Pri mreži 15 m x 15 m (slika 66) se, enako kot pri sliki izračunanih hitrosti, pokažejo lokalno povečane hitrosti toka na območju struge. Sicer je pri mreži 5 m x 5 m (slika 67) jasno razvidno, da bolj gosta računaska mreža omogoča bolj natančne lokalne rezultate. Ta razlika se bo še bolj odrazila v enem od naslednjih poglavij, kjer bo analiziran vpliv objektov v toku.

V prečnih prerezih P1 je pokazano, da so izračunane globine toka podobne. V primeru mreže 5 m x 5 m (slika 68) se gibljejo od 0 m pa do 1,16 m, povprečna vrednost pa je 0,58 m. Pri mreži 15 m x 15 m (slika 69) pa so globine med 0 m in 0,92 m, povprečna globina pa je 0,70 m. V prerezih je vidna tudi razlika v geometriji terena istega prečnega prereza, ki je posledica prej omenjenega načina izračuna višin računskih celic na podlagi podatkov DMV.

Vendar se je potrebno ob teh primerjavah zavedati, da je v tem tudi nekaj napake zaradi načina povzemanja izračunanih količin v določenem prerezu.

Povzemanje izračunanih količin poteka tako, da uporabnik na tlorisu modeliranega območja določi dve točki, med katerima želi izris prereza. Program razdaljo med izbranimi točkama razdeli na 30 delov in nato v vsaki točki poda podatek o višini terena in globini modeliranega toka. Prva težava, ki se pojavi, je v natančni izbiri dveh točk, med katerima želimo izrisati profil. To je še posebej težavno, če želimo delati primerjavo med več izračunanimi modeli na enem prerezu. Na območju, velikem nekaj km², je praktično nemogoče nekajkrat zapored izbrati natančno dve isti točki. Ta napaka se da z natančnim delom (na modelih z isto računsko mrežo) zelo zmanjšati, ne pa popolnoma odpraviti. Odprava te napake bi bila možna, če bi program omogočal, da se mu določi, med katerima dvema točkama želimo primerjalni prerez in bi samostojno povzel podatke v več izračunanih modelih. Izrisa primerjave več gladin v enem prerezu model ne omogoča, zato so bili podatki obdelani v programu MS Excel, kjer so bili prerezi tudi izrisani.

Omenjena težava z določanjem začetne in končne točke prečnega prereza je še bolj izrazita, če želimo primerjati na enem prerezu gladini modelov z različnimi velikostmi celic. V takem primeru so lahko že razlike v višini točk terena znotraj izbranega prereza tako velike, da je potem napaka v prikazu gladin še večja in je primerjava povsem neuporabna. Zaradi te težave sta v tem poglavju gladini modelov z mrežama 5 m x 5 m in 15 m x 15 m prikazani vsaka na svoji sliki.

6.3.4.4 Zaključki analize vpliva velikosti računske celice

Bistvena prednost mreže z velikostjo 15 m x 15 m je v hitrem delovanju modela. Računski časi za so bistveno krajši kot pri mreži 5 m x 5 m. To omogoča hitrejše delo, obravnavanje več možnih scenarijev, testiranje več različnih parametrov modela. Rezultati so dovolj natančni za prve ocene in testiranje vpliva različnih parametrov. Več o natančnosti rezultatov mreže 15 m x 15 m v primerjavi s 5 m x 5 m je napisano v prejšnjem poglavju.

Prednosti mreže 5 m x 5 m pa so predvsem natančnejši rezultati. Vendar je trajanje računa precej daljše kot pri mreži 15 m x 15 m. Razmerje med računskim in realnim časom je pri hudourniku Bela za mrežo 15 m x 15 m okrog 240:1, medtem ko je pri mreži 5 m x 5 m to razmerje med 1:2 in 1:3. Zaradi tega dejstva je smiselno uporabljati mrežo 15 m x 15 m za testiranje vpliva parametrov in različnih magnitud, z mrežo 5 m x 5 m pa je smiselno preračunati končne variante modela. Prednost gostejše mreže je tudi modeliranje vpliva objektov, kjer to delamo z blokiranimi celicami, saj lahko z manjšimi celicami bolje povzamemo obliko objektov na vršaju, kot pa s celicami 15 m x 15 m, kar je že večja površina od povprečne enostanovanjske hiše. To se odraža predvsem na območjih goste poselitve, kjer je z velikimi celicami težko realno označiti objekte. Nehote z blokado več skupnih celic (gosta poseljenost) naredimo oviro v toku, ki lahko bistveno vpliva na celoten tok. Realno je pretok med objekti na vršaju nezanemarljiv in lahko precej vpliva na končne rezultate modela.

Za primer Loga po Mangartom je bila, sicer na modelu PCFLOW2D, opravljena analiza vpliva velikosti računske mreže. Vendar so v tem primeru uporabljali celice 2 m x 2 m in 4 m x 4 m. V tej raziskavi (Fazarinc, 2002) je bilo ugotovljeno, da je vpliv gostote računske mreže na rezultate majhen in da je gosta mreža smiselna samo v primeru natančnih geometrijskih podatkov. Več o tej raziskavi je napisano v poglavju 4. Povedati pa je treba, da so v tej raziskavi določali ogroženost na meter natančno in da so bili geometrijski podatki natančnejši, območje pa manjše kot v naši raziskavi.

Tudi na podlagi naših rezultatov lahko zaključimo, da je gostota mreže pomembna pri natančnejših izračunih in da je pomembna predvsem kvaliteta geometrijskih podatkov o terenu.

6.3.5. Analiza različnih načinov modeliranja vpliva objektov na vršaju

6.3.5.1 Potek analize

Hudourniški vršaji in delovanje drobirskih tokov na njih so cilj naše raziskave. Ker pa so hudourniški vršaji pogosto poseljeni in je poselitev včasih zelo gosta, je pomemben dejavnik pri modeliranju drobirskih tokov tudi vpliv objektov na gibanje toka. Na tem mestu je potrebno poudariti, da v podatkih DMV5, ki so bili uporabljeni, hiše niso zajete. Prav tako hiše niso zajete v računski mreži, ki jo program izdela na podlagi podatkov DMV.

Za zajem vpliva objektov na vršaju je več možnosti, ki so bile testirane v tej raziskavi.

Prva izmed njih, ki je bila uporabljena tudi v Logu pod Mangartom (Hojnik et al., 2001), je zajem vpliva objektov s povečanjem koeficienta hrapavosti n_g . Na območju objektov se izbere povečan koeficient hrapavosti n_g , s katerim se simulira povečanje izgub zaradi ovir v toku. Ta način modeliranja vpliva objektov je enostaven in za grobe ocene dovolj natančen. Največja prednost te možnosti je hitro delo, saj ni potreben ročen vnos lastnosti posameznih celic, ampak je možno določiti večji koeficient n_g za celotno območje poselitve naenkrat. Več o izboru koeficienta n_g je napisano v poglavju o testiranju vpliva koeficienta hrapavosti.

Druga možnost, ki je bila testirana v naši raziskavi, je ročen vnos višin posameznih celic. To pomeni, da računsko mrežo damo na ortofoto (DOF) posnetek območja in v tistih celicah, kjer je na ortofoto posnetku hiša, ročno vnesemo višino celice, ki je npr. za stanovanjsko hišo 10 m nad okoliškim terenom. Ta možnost je zelo zamudna, saj je potrebno ročno računati in vnašati višine vseh celic, kar je še posebej zamudno pri gosti računski mreži oz. majhnih računskih celicah. Poleg tega pa so take spremembe računske mreže, ki jo program generira na podatkih DMV in so višinske razlike med sosednjimi celicami zvezne, pomenile velike nestabilnosti v računu. Do nestabilnosti najverjetneje pride, ker je v primeru hiše višinska razlika med dvema celicama 10 m in to za program očitno pomeni probleme pri stabilnosti računa oz. izračunu toka v sosednjih celicah. Pri računanju toka na taki mreži pride do velikih izgub volumna in do izredno kratkih časovnih korakov → dolgi časi računanja. Ta možnost je bila takoj po enem izračunu na vršaju Bele označena za neprimerno in zaradi svojih zgoraj opisanih slabosti ni bila obravnavana v nadaljevanju analize.

Tretja možnost, ki se je izkazala za najprimernejšo in je bila uporabljena v nadaljevanju raziskave, je možnost blokade določenih celic. To pomeni, da je potrebno celice, katere so na ortofoto posnetku prepoznane za hiše, ročno izbrati in jih označiti za blokirane (ang. Blocked cells). V ta namen se uporabi funkcija redukcij površine računske celice (ang. Area reduction factor), kjer se lahko izbere popolna blokada celice, ki je potem označena kot blokirana celica, na kateri je preprečen vsakršen pretok.

Program to funkcijo predvideva za upoštevanje ovir v toku, specifične topografije ali vpliv objektov, kar je bilo uporabljeno tudi v našem primeru. Možno je blokirati tok v celici v vsaki od osmih računskih smeri za določen odstotek, lahko pa se uporabi popolna blokada toka celice v vseh smereh (O'Brien, 2006).

Vpliv objektov je zaradi goste poselitve na vršaju hudournika Bela še posebej pomemben.

6.3.5.2 Predstavitev modelov uporabljenih v analizi

Za analizo različnih možnosti upoštevanja vpliva objektov v toku je bil izdelan sistem modelov, v katerih sta zajeti dve različni možnosti zajema objektov v modelu. Različen zajem objektov (blokirane celice in povečan koeficient n_g) je bil testiran tudi za različne reologije (voda, $C_v = 0,42$ in $C_v = 0,5$) in za različne velikosti računskih celic (5 m x 5 m in 15 m x 15 m). Podana je tabela, kjer so razvidne karakteristike in časi računanja modelov, ki so bili predmet tega dela analize.

Preglednica 29: Pregled modelov in podatkov pri analizi vpliva različnih možnosti zajema vpliva objektov.

Table 29: Models, included in building modeling sensitivity analysis.

Ime modela	Mreža	C_v	Hidrogram	Vpliv objektov	Čas računanja
Bela11	15x15	0 (voda)	$Q_{100, (19h)}$	povečan n_g	39,6 h
Bela12	15x15	0 (voda)	$Q_{100, (19h)}$	blokirane celice	35,1 h
Bela9	5x5	0 (voda)	$Q_{100, (19h)}$	povečan n_g	3,04 min
Bela10	5x5	0 (voda)	$Q_{100, (19h)}$	blokirane celice	2,32 min
Bela13	15x15	0,5	$Q_{100, (19h)} C_v=0,5$	povečan n_g	6,72 min
Bela15	15x15	0,5	$Q_{100, (19h)} C_v=0,5$	blokirane celice	8,28 min
Bela17	5x5	0,5	$Q_{100, (19h)} C_v=0,5$	povečan n_g	46,48 h

se nadaljuje...

... nadaljevanje

Bela18	5x5	0,5	$Q_{100,(19h)} C_v=0,5$	blokirane celice	56,98 h
Bela14	15x15	0,42	$Q_{100,(19h)} C_v=0,42$	povečan n_g	5,4 min
Bela16	15x15	0,42	$Q_{100,(19h)} C_v=0,42$	blokirane celice	6,42 min
Bela19	5x5	0,42	$Q_{100,(19h)} C_v=0,42$	povečan n_g	40,28 h
Bela20	5x5	0,42	$Q_{100,(19h)} C_v=0,42$	blokirane celice	54,21 h

Računsko območje je bilo pri vseh modelih z mrežo 5 m x 5 m enako, prav tako pri vseh modelih z mrežo 15 m x 15 m, kar omogoča dobro primerjavo rezultatov po posameznih celicah ali prerezih. Prav tako je bila enaka tudi pozicija vhodnega hidrograma. Ostali vhodni podatki modela so bili povsod enaki in so imeli vrednosti:

koeficienti n_g (varianta s povečanim koeficientom): gozd $0,16 \text{ ms}^{-1/3}$

travnik $0,033 \text{ ms}^{-1/3}$

struga $0,13 \text{ ms}^{-1/3}$

območje hiš $0,20 \text{ ms}^{-1/3}$

koeficienti n_g (varianta z blokiranimi celicami): gozd $0,16 \text{ ms}^{-1/3}$

travnik $0,033 \text{ ms}^{-1/3}$

struga $0,13 \text{ ms}^{-1/3}$

površina med objekti $0,035 \text{ ms}^{-1/3}$

reologija pri koncentraciji $C_v = 0,5$ (umerjeno za Log pod Mangartom)

$$K = 2285 \text{ (-)}$$

$$\text{spec. teža sedimenta} = 27.000 \text{ N/m}^3$$

$$\tau = 2000 \text{ N/m}^2$$

$$\eta = 156 \text{ Pas}$$

reologija pri koncentraciji $C_v = 0,42$ (umerjeno za Log pod Mangartom)

$$K = 2285 \text{ (-)}$$

$$\text{spec. teža sedimenta} = 27.000 \text{ N/m}^3$$

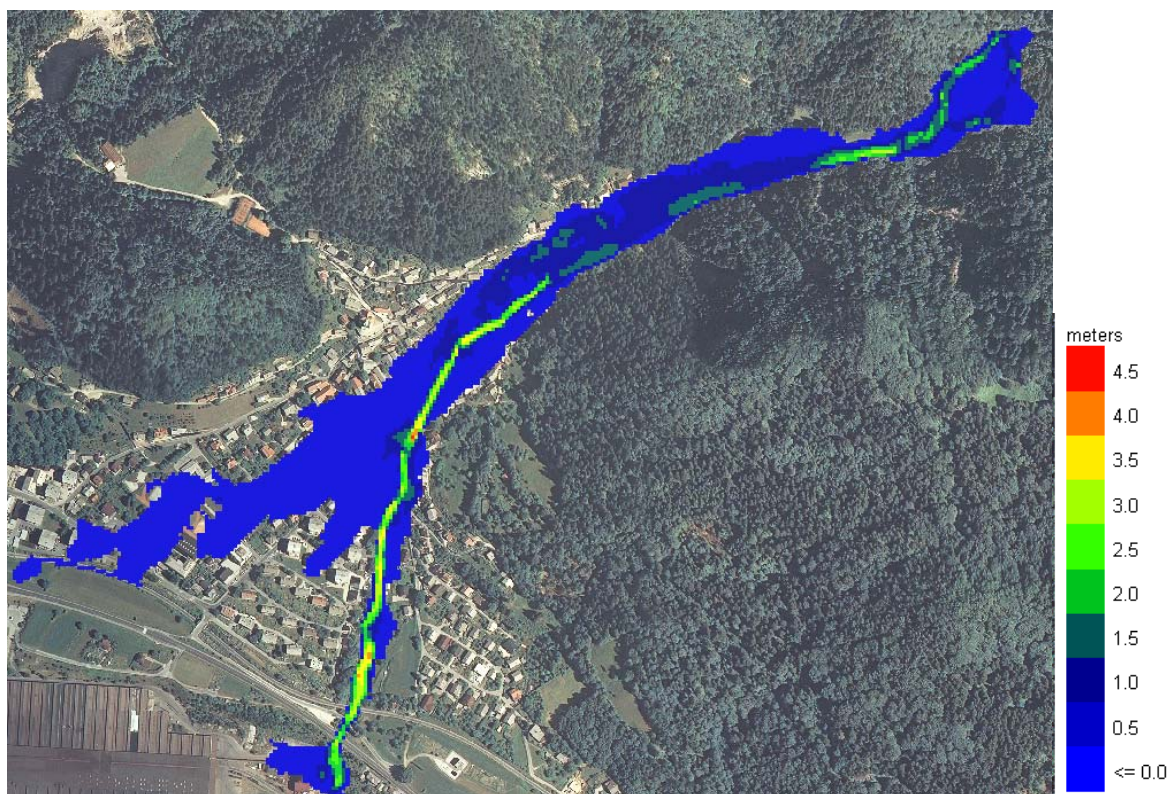
$$\tau = 20 \text{ N/m}^2$$

$$\eta = 10 \text{ Pas}$$

6.3.5.3 Predstavitev rezultatov s komentarji

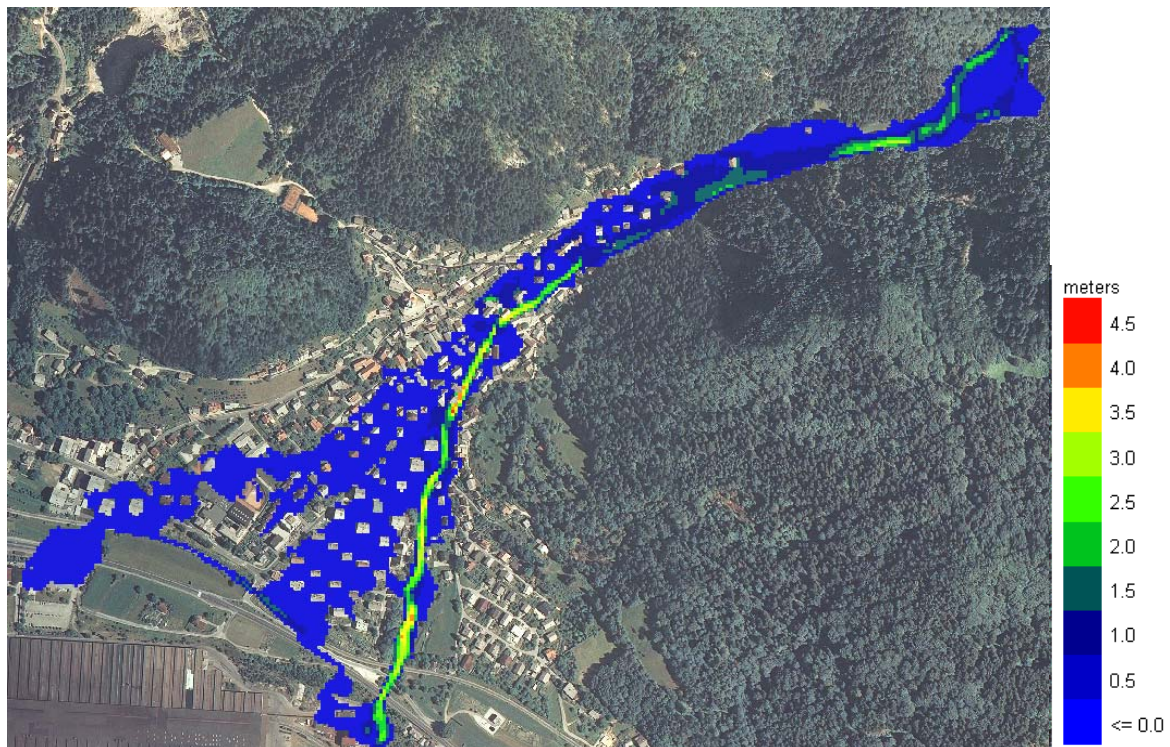
Pripravljena je primerjava rezultatov modela drobirskega toka, kjer so hiše modelirane kot blokirane celice in modela, kjer je vpliv objektov na vršaju zajet s povečanim koeficientom hrapavosti. Primerjava je prikazana na primeru drobirskega toka z volumsko koncentracijo 0,42 (modela Bela19 in Bela20).

Najprej so prikazane slike maksimalnim globin in hitrosti toka, nato pa je prikazana še podrobna primerjava izračunov na izbranem območju v zgornjem delu vršaja, kjer je vpliv objektov na tok zaradi majhne širine območja še posebej opazen. Hitrosti toka ob objetih so prikazani tudi z vektorsko sliko.



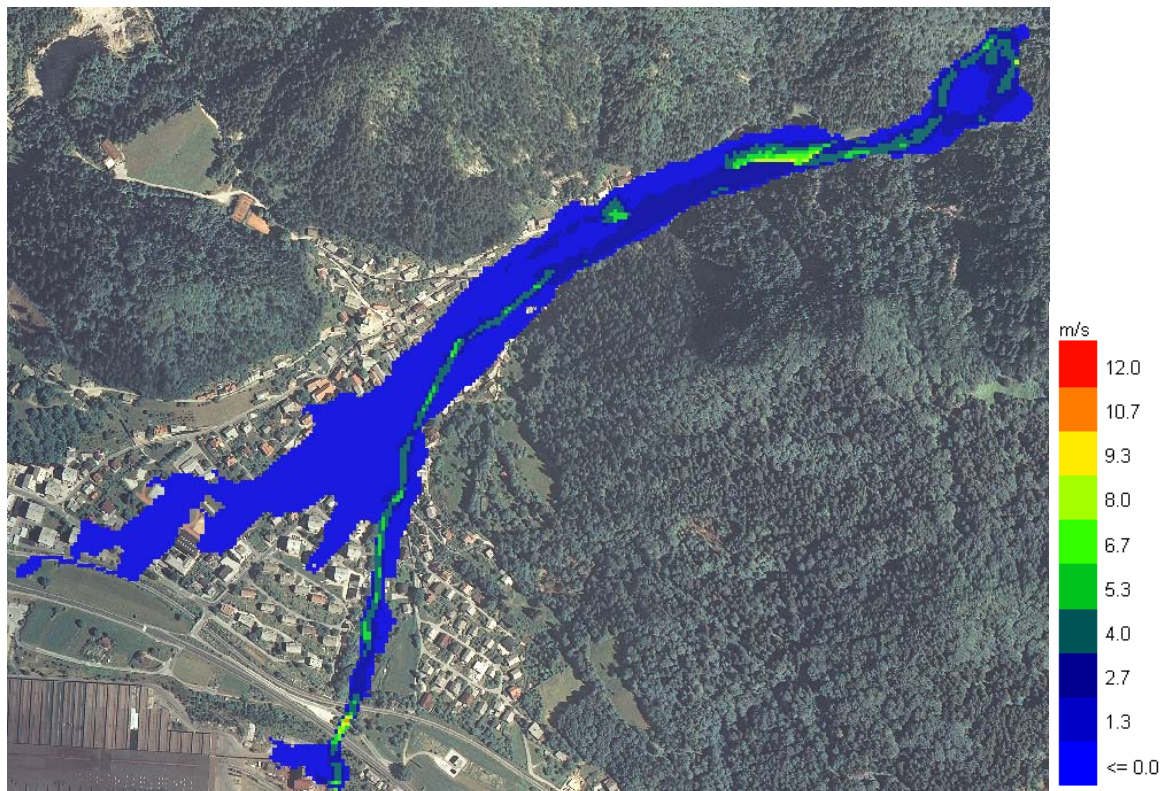
Slika 70: Maksimalne globine drobirskega toka pri modelu Bela19 (5x5, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$, hiše: povečan n_g).

Fig. 70: Maximum flow depth in model Bela19 (5x5, hydrograph Q_{100} , $C_v = 0,42$, bulidings: increased n_g).



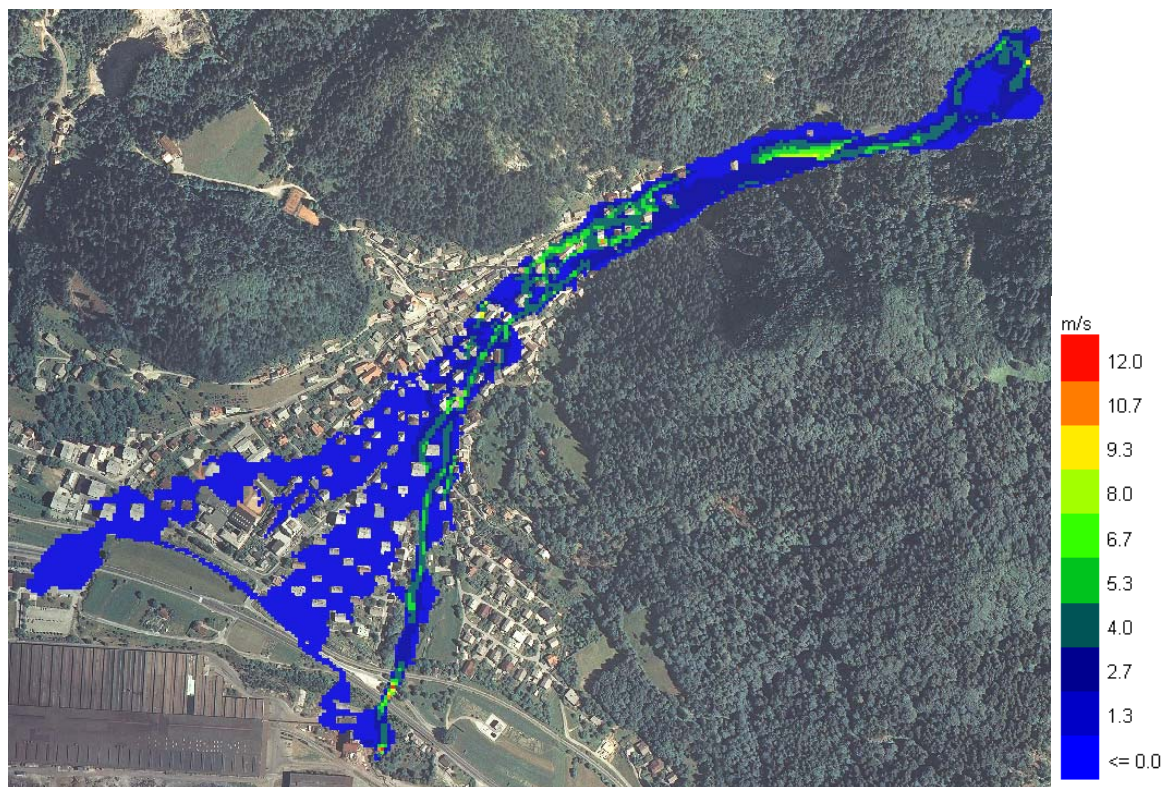
Slika 71: Maksimalne globine drobirskega toka pri modelu Bela20 (5x5, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$, hiše: blokirane celice).

Fig. 71: Maximum flow depth in model Bela20 (5x5, hydrograph Q_{100} , $C_v = 0,42$, bulidings: blocked cells).



Slika 72: Maksimalne hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela19 (parametri: glej sliko 70)

Fig. 72: Maximum flow velocity in model Bela19 (parameters: see fig. 70)



Slika 73: Maksimalne hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela20 (parametri: glej sliko 71).
Fig. 73: Maximum flow velocity in model Bela20 (parameters: see fig. 71).

Pri slikah izračunanih globin (sliki 70 in 71) vidimo, da je poplavljenno območje precej podobno, razlike pa so sicer opazne na več območjih. V zgornjem delu vršaja je pri modelu z blokiranimi celicami tok bolj skoncentriran na območje struge, medtem ko se pri modelu s povečanim koeficientom hrapavosti drobirski tok razliva na širšem območju. Ta rezultat pokaže, da blokirane celice bolje ponazorijo oviranje toka zaradi objektov.

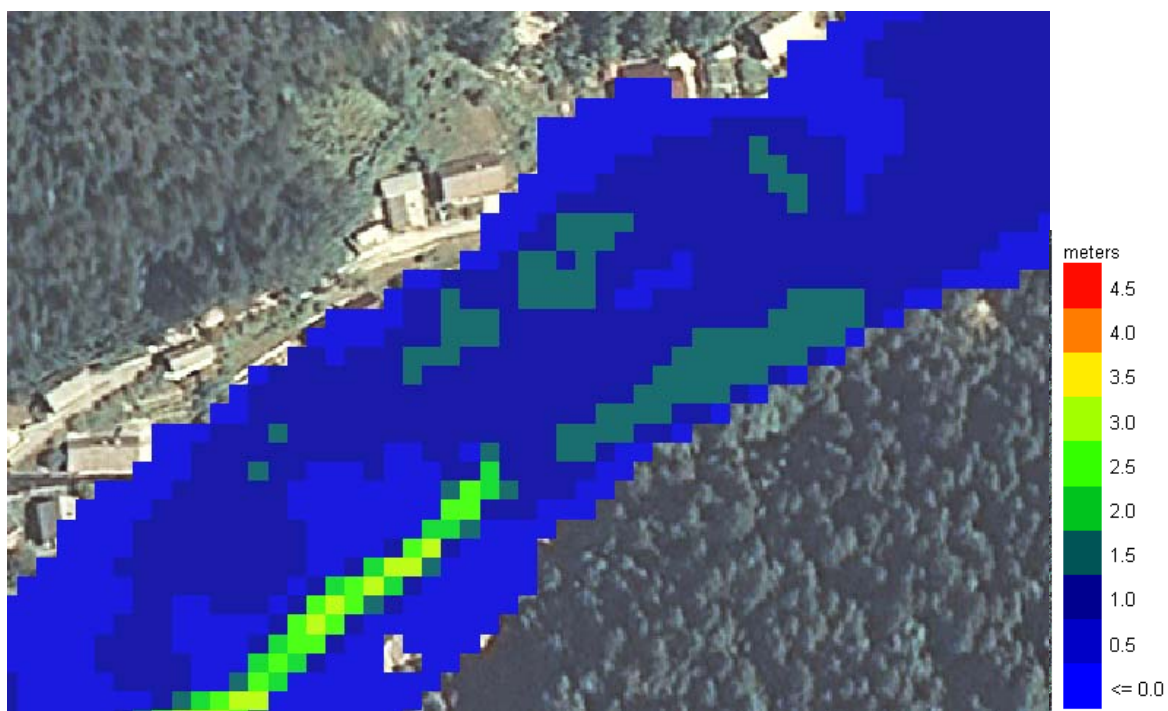
V spodnjem delu vršaja pa je opazna razlika pri dosegu drobirskega toka. Pri modelu s povečanim koeficientom hrapavosti se tok zaradi visoke vrednosti n_g na območju poselitve ustavi, medtem ko pri modelu z blokiranimi celicami in koeficientom $n_g = 0,035 \text{ ms}^{-1/3}$ med objekti, tok po površini med objekti potuje naprej in se razliva po večjem delu vršaja. Tudi ta rezultat kaže na dobro posnemanje vpliva objektov v toku z uporabo blokiranih celic.

Pri slikah maksimalnih hitrosti (sliki 72 in 73) pa se vidi, kako model uspešno ponazori lokalne pospešitve toka zaradi zožanj, ki so posledica objektov na vršaju. To je še posebej dobro vidno v zgornjem delu vršaja, kjer je poselitev gosta, širina vršaja pa dovolj majhna, da

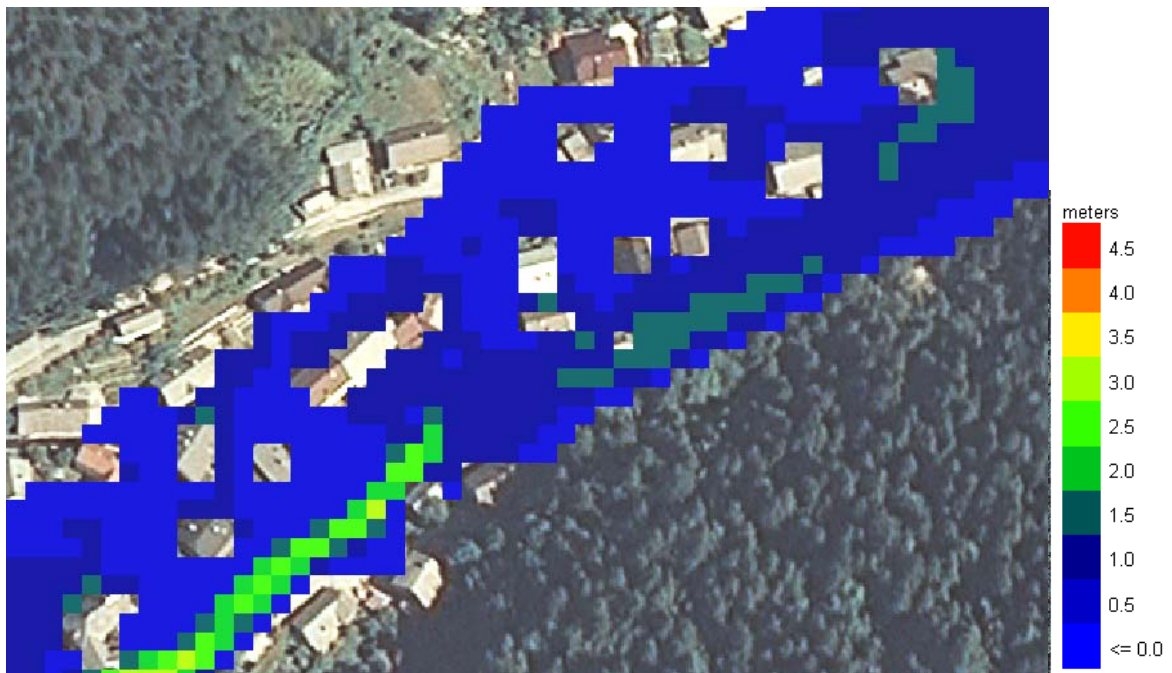
je vpliv objektov na gibanje toka velik. Ta pojav je bolje viden na podrobnejših slikah rezultatov v nadaljevanju.



Slika 74: Zgornji del vršaja (območje P1), kjer bo prikazana podrobnejša primerjava rezultatov.
Fig. 74: Upper part of Bela fan, where detailed comparison of results is prepared.

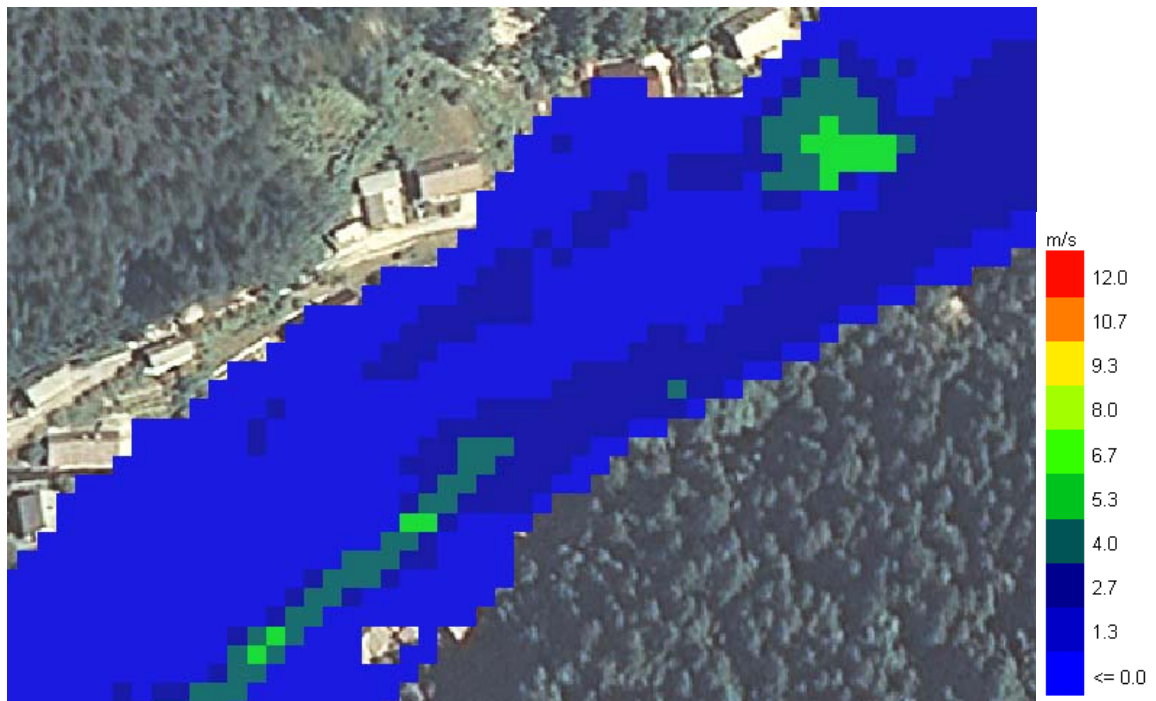


Slika 75: Podrobnejši prikaz izračuna maksimalnih globin drobirskega toka pri modelu Bela19 (5x5, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$, hiše: povečan n_g).
Fig. 75: Detailed presentation of maximum flow depth in Bela19 (grid 5x5, hydrograph Q_{100} , $C_v = 0,42$, buildings: increased n_g).



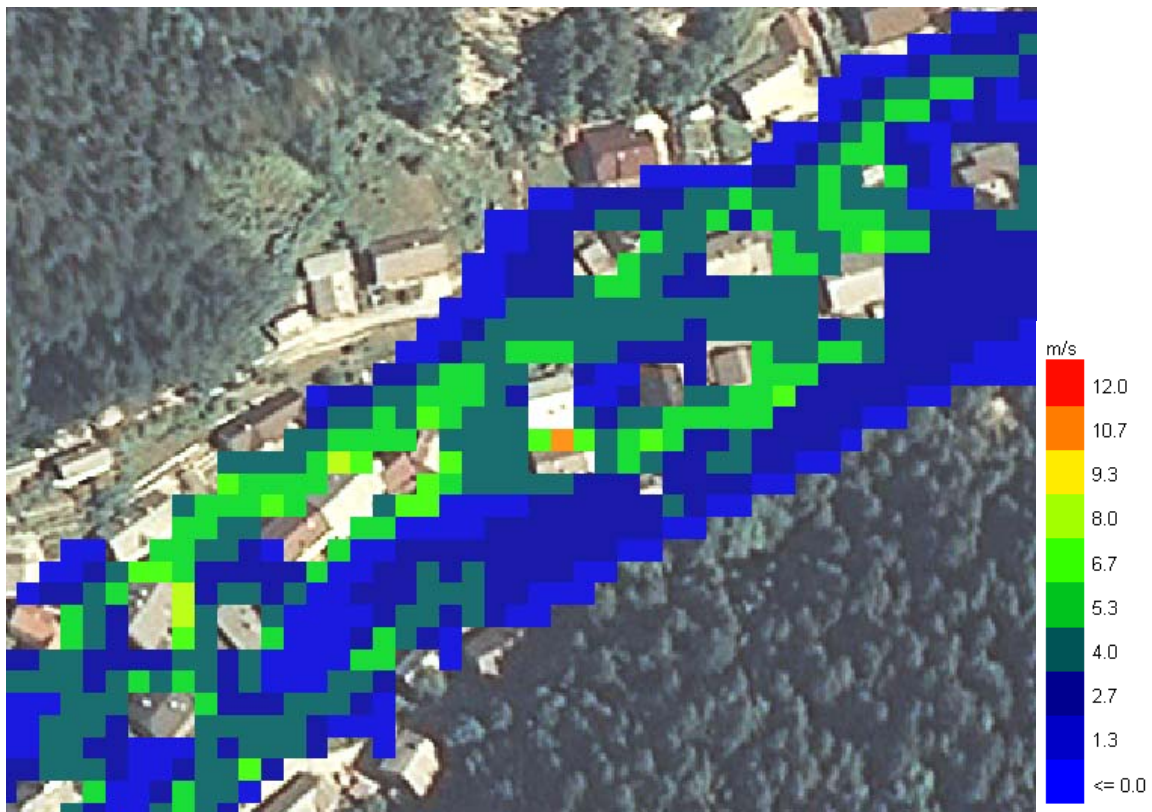
Slika 76: Podrobnejši prikaz izračuna maksimalnih globin drobirskega toka pri modelu Bela20 (5x5, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,42$, hiše: blokirane celice).

Fig. 76: Detailed presentation of maximum flow depth in Bela20 (grid 5x5, hydrograph Q_{100} , $C_v = 0,42$, buildings: blocked cells).



Slika 77: Podrobnejši prikaz izračuna maksimalnih hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela19 (parametri: glej sliko 75).

Fig. 77: Detailed presentation of maximum flow velocity in Bela19 (parameters: see fig 75).



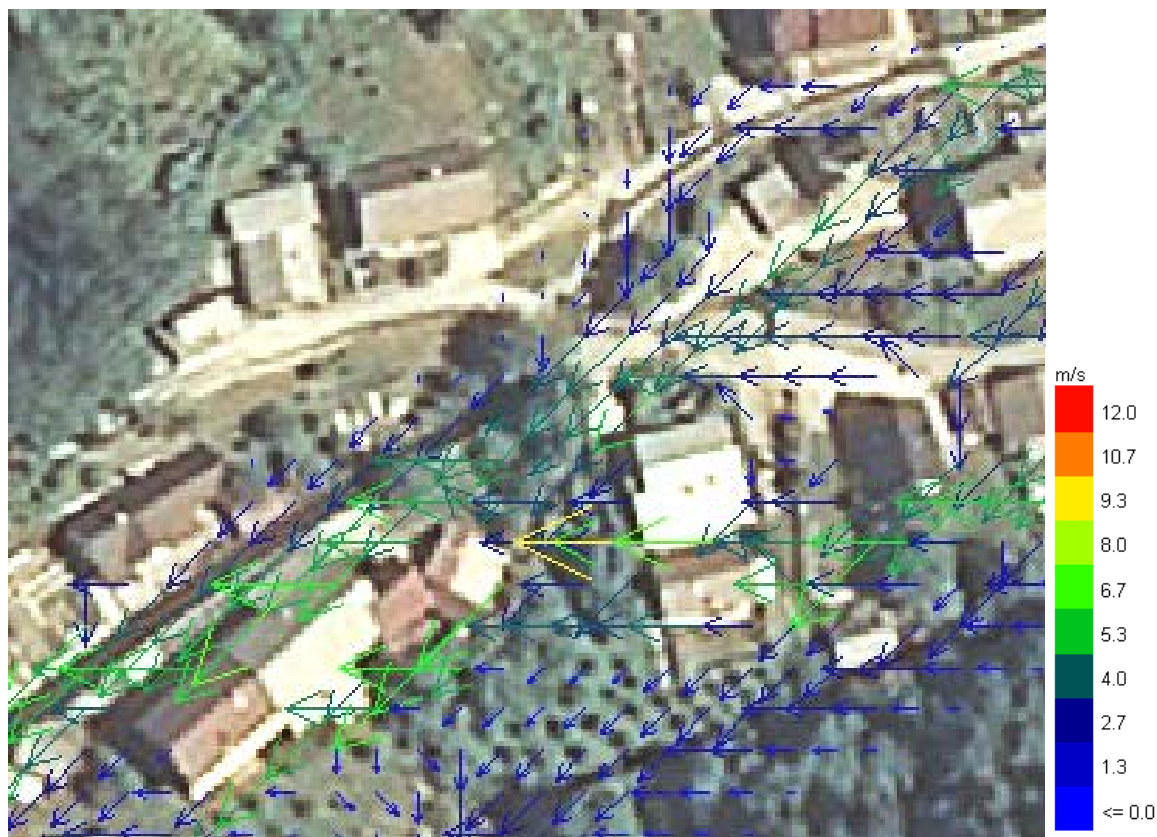
Slika 78: Podrobnejši prikaz izračuna maksimalnih hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela20 (parametri. Glej sliko 76).

Fig. 78: Detailed presentation of maximum velocity in Bela20 (parameters: see fig. 76).



Slika 79: Podrobnejši prikaz izračuna maksimalnih hitrosti (vektorski prikaz) drobirskega toka pri modelu Bela19 (parametri: glej sliko 75).

Fig. 79: Detailed presentation of maximum flow velocity- vectors (Bela19, parameters: see fig. 75).



Slika 80: Podrobnejši prikaz izračuna maksimalnih hitrosti (vektorski prikaz) drobirskega toka pri modelu Bela20 (parametri: glej sliko 76).

Fig. 80: Detailed presentation of maximum flow velocity- vectors (Bela20, parameters: see fig. 76).

Pri podrobnejšem prikazu izračunanih hitrosti (sliki 77 in 78) je jasno viden vpliv objektov, zajet z blokiranimi celicami. Najbolj so vidna lokalna povečanja hitrosti toka ob hišah, česar pri modelu s povečanim koeficientom ni opaziti. V tem primeru je hitrostno polje po celotni površini naselja konstantno, kar je posledica enakomernega koeficienta hrapavosti n_g .

Na slikah z vektorskim prikazom hitrosti (sliki 79 in 80) se tok med objekti še lepše vidi, saj je s puščico, poleg velikosti, ponazorjena tudi smer toka v posamezni celici. Na zgornji izmed obeh slik vektorjev (slika 79) pa je razvidno, da pri modelu, kjer je vpliv objektov modeliran s povečanim koeficientom hrapavosti, tok na območju hiš teče enakomerno in model lokalnih pojavov zaradi vpliva objektov ne ponazori.

Površina poplavljenega območja je sicer v zgornjem delu precej podobna. Razlike so, kot je bilo že omenjeno, večje v spodnjem delu.

Način modeliranja vpliva hiš na vršaju pomeni tudi vpliv na računске čase modelov. Časi izračuna so pri modeliranju vode, pri modelu z blokiranimi celicami, za 10 do 15 % krajši kot pri modelih s povečanim koeficientom hrapavosti n_g . Pri modeliranju drobirskih tokov pa so časi računanja pri uporabi blokiranih celic za 20 do 25 % daljši kot pri modelih s povečanim koeficientom hrapavosti. Ta razlika je posledica reoloških značilnosti drobirskega toka, ki v večji meri vplivajo na lokalne pojave toka ob objektih.

6.3.5.4 Zaključki analize različnih načinov modeliranja vpliva objektov

Ravno objekti oz. poselitev na vršaju so tisti dejavnik, zaradi katerega se ukvarjamo z delovanjem drobirskih tokov in njihovim modeliranjem. Večina modelov do danes je bila izdelanih z razlogom zaščite prebivalstva oz. zaščite objektov (Rajar et al., 2001; Hojnik et al., 2001; Hojnik, 2004; Fazarinc, 2002). Prav zato je zelo pomembno, kako so ti objekti zajeti v modelu drobirskega toka.

V tem delu naloge sta bili obravnavani dve možnosti in sicer: povečanje koeficienta hrapavosti n_g na območju objektov in blokiranje računskih celic, v katerih je na podlagi DOF posnetka prepoznani objekt. Vsaka od metod ima svoje prednosti in slabosti, ki so v nadaljevanju opisane.

Možnost s povečanim koeficientom n_g je uporabna za hitre ocene razmer na določenem območju. Določanje koeficienta hrapavosti skupinam poteka v programu Flo-2D razmeroma hitro, saj se lahko naenkrat izbere cela skupina celic, katerim želimo prepisati določeno vrednost koeficienta n_g . Slabost programa je le v tem, da nima orodja, s katerim bi lahko naenkrat spremenil vrednosti n_g , recimo vsem celicam z vrednostjo 0,4 na novo vrednost 0,6. Ta funkcija bi bila uporabna pri analiziranju vpliva koeficientov hrapavosti, kjer določeni skupini celic (travniki, gozdi, naselja) večkrat spreminjamo koeficient. Sicer so rezultati možnosti s povečanim koeficientom n_g na nivoju natančnosti naše raziskave zadovoljivi. Služijo lahko za prve preliminarne ocene ogroženih območij, kjer je potrebna ocena površine ogroženega območja.

Možnost z uporabo blokiranih celic pa je boljše predvsem z vidika lokalnih pojavov v toku. V tem primeru so boljše vidne lokalne pospešitve ob objektih, zato lahko lažje določimo udarne

sile na objekte v toku, ki so pri ocenjevanju ogroženosti pomembne. Ta metoda je sicer bolj zamudna, saj je potrebno ročno označiti kot blokirane tiste celice, v katerih so na podlagi DOF posnetkov prepoznani objekti. Program omogoča možnost, da se funkcija blokiranih celic izklopi in se lahko na istem modelu izračuna primer z blokiranimi celicami in brez. Še vedno pa je potrebno na območju hiš spremeniti koeficient n_g .

Slabost te metode je njena uporaba pri večjih računskih celicah. V našem primeru je bilo pri mreži 15 m x 15 m težko natančno označiti celice z objekti, ki so lahko tudi manjši kot velikost ene celice. Problem se pojavi tudi v primeru goste poselitve, kot je to v primeru vršaja Bele. V takem primeru je praktično nemogoče z večjimi celicami zajeti vse objekte, saj lahko v najslabšem primeru z blokiranimi celicami v vrsti naredimo pasovno oviro, skozi katero model toka ne računa. Tak primer pa ni skladen z realnim stanjem na terenu, kjer je tok med hišami lahko zelo pomemben. To se lepo kaže v primeru modela z mrežo 5 m x 5 m, ki je predstavljen v tem delu naloge.

Metoda z blokiranimi celicami je torej, objektivno gledano, boljša in natančnejša, vendar je potrebno pri tem presoditi, kakšna natančnost je cilj modela in predvsem kako natančni in zanesljivi so drugi vhodni podatki modela. Predvsem nenatančna oz. ne dovolj natančna geometrija je lahko bistveno bolj pomembna pri rezultatih (predvsem dosegu drobirskega toka) kot pa način modeliranja hiš. Prav tako je za rezultate zelo pomembna magnituda dogodka.

Vprašanje, ki se še pojavi pri vplivu objektov v toku, je porušitev najbolj prizadetih objektov, kar pri drobirskih tokovih ni redko. Pri tem bi bilo potrebno, glede na neko predpostavljeno kvaliteto gradnje, določiti do katere meje naj bi objekt udarne sile zaradi drobirskega toka prenesel, kdaj pa bi zaradi delovanja drobirskega toka prišlo do porušitve. To pomeni, da bi pri bolj natančnih modelih lahko objekte upoštevali kot blokirane celice, od določene mejne vrednosti udarnih sil, pa kot povečan koeficient hrapavosti. Porušeni objekti ne delujejo kot popolna ovira v toku ampak samo še povečuje izgube. Tak princip bi bil uporaben samo pri najbolj natančnih modelih in pri točno določenih mejah udarnih sil, ki porušijo objekt. Ker so za tak princip dela potrebni zelo natančni ostali vhodni podatki modela in določena meja porušitev objektov, ta opcija v tej nalogi ni bila uporabljena.

6.3.6 Analiza vpliva različnih reoloških karakteristik tokov

6.3.6.1 Potek analize

Glede na pretekle izkušnje in tudi glede na izkušnje, pridobljene v tej raziskavi, lahko trdimo, da je izmed vseh parametrov modela najtežje določiti reološke lastnosti drobirskega toka, in sicer strižno trdnost τ in viskoznost η , za določeno koncentracijo C_v . Ostale parametre je možno relativno dobro izbrati. Hidrološki modeli nam omogočajo analizo padavin in izračune hidrogramov odtoka vode, geometrijski podatki o terenu, ki ga obravnavamo, so javno dostopni (GURS), Manningov koeficient n_g različnih tipov površin je možno dovolj dobro določiti na podlagi izkušenj in različne literature, ekstremno magnitudo dogodka oz. največji možni pretok drobirskega toka na hudourniku je možno dovolj dobro določiti, delovanje matematičnega modela in vpliv posameznih parametrov pa je predstavljen v tej nalogi. Ena večjih neznank pri modeliranju drobirskih tokov in morebitni uporabi rezultatov za kartiranje, torej ostajajo reološki parametri.

Glavni cilj geomehanskih raziskav materiala, pridobljenega na sondažnih izkopih na vršajih Trebiže, Presušnika, Bele in Suhlja, v okviru raziskave Ocena ogroženosti zaradi delovanja drobirskih tokov (CRP, 2008), je bila določitev realnih reoloških karakteristik mešanice drobirskega toka, vendar so se naša pričakovanja izkazala za nerealna. Prvi in največji problem je ustrezna oprema za meritve karakteristik vzorcev. Parametra strižno trdnost τ in viskoznost η je možno z ustrezno opremo in ob ustrezni velikosti vzorca točno izmeriti, vendar take opreme v Sloveniji žal zaenkrat še nimamo. Drug pomislek, ki se je pojavil med raziskavo, je bil sledeč. Vsi vzorci, ki so bili odvzeti v izkopih, so bili odkladnine preteklih dogodkov, kar pomeni, da je material lahko že močno predelan in nima več karakteristik, ki jih je imel pred sprožitvijo oz. med gibanjem.

Objektivno je bilo potrebno oceniti, da na osnovi opravljenih analiz ni bilo možno določiti transportnih lastnosti materiala v času nastanka, saj je del trdnih delcev, ki so potovali s tokom, odplavilo dalje v smeri dolvodno in niso več prisotni na mestu sedanjih vršajev. Zaradi časovne odmaknjenosti dogodkov so tudi lastnosti materialov doživele določene spremembe (CRP, 2008).

Za določanje reoloških oz. transportnih lastnosti potencialnih drobirskih tokov bi bilo potrebno odvzeti vzorce materiala v zaledju hudournikov, na območju erozijskih žarišč in na ostalih potencialnih mestih proženja. Iz takih vzorcev bi se lahko pripravile različne koncentracije mešanice, ki je potencialno nevarna, in na kateri bi lahko izmerili realne vrednosti parametrov τ in η . Zaradi zgoraj omenjenih omejitev smo za večino modelov, kjer smo testirali vpliv ostalih parametrov, uporabili reološke vrednosti, ki so bile umerjene za primer Loga pod Mangartom. V tem delu analize pa je bil preizkušen vpliv različnih vrednosti reoloških parametrov na rezultate modela.

6.3.6.2 Predstavitev modelov uporabljenih v analizi

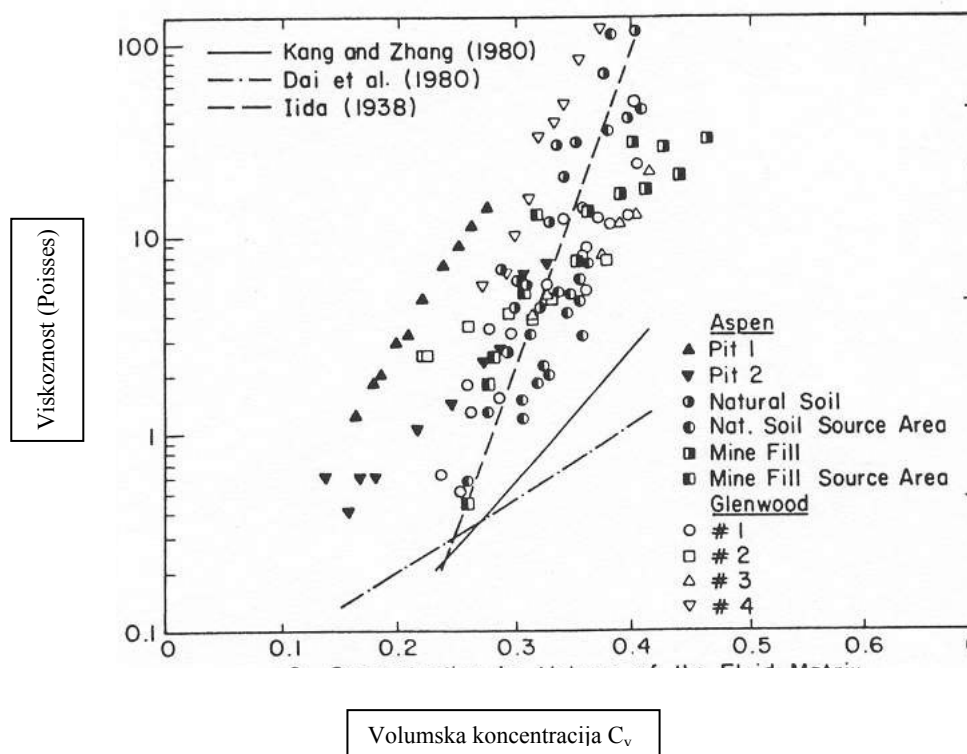
Izbrane so bile tri vrednosti volumske koncentracije C_v , za katere pa so bile izbrane mejne vrednosti parametrov τ in η . Cilj je bil dobiti mejne primere drobirskih tokov in ugotoviti, kakšne so posledice takih drobirskih tokov na vršaju. Z različnimi kombinacijami reoloških parametrov drobirskih tokov bi lahko ugotovili, katera kombinacija je najmanj ugodna. S tem bi dobili mejne dosege potencialnih dogodkov in s tem območja nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov.

Izbrane so bile vrednosti volumske koncentracije $C_v = 0,4$, $C_v = 0,45$ in $C_v = 0,5$, ki so pogoste pri pojavljanju drobirskih tokov. Nato pa so bile iz literature (O'Brien, 2006) izbrane maksimalne in minimalne vrednosti parametrov τ in η za vsako izbrano koncentracijo C_v . S temi podatki je bilo narejenih 12 kombinacij podatkov, s čimer so bile pokrite vse možne kombinacije izbranih podatkov. Analiza je bila izvedena na vršaju hudournika Bela.

Mejne vrednosti reoloških parametrov τ in η so bile izbrane na podlagi grafikonov $\tau(C_v)$ (slika 81) in $\eta(C_v)$ (slika 82) iz literature (O'Brien, 2006), kjer so zbrani podatki o reoloških karakteristikah večjega števila zabeleženih in analiziranih drobirskih tokov. Na teh grafikonih sta bili odčitani minimalna in maksimalna vrednost τ in η za posamezno vrednost volumske koncentracije C_v . Oba omenjena grafikona sta prikazana na slikah 81 in 82, pri čemer je treba pojasniti enote, ki so uporabljene na grafikonih:

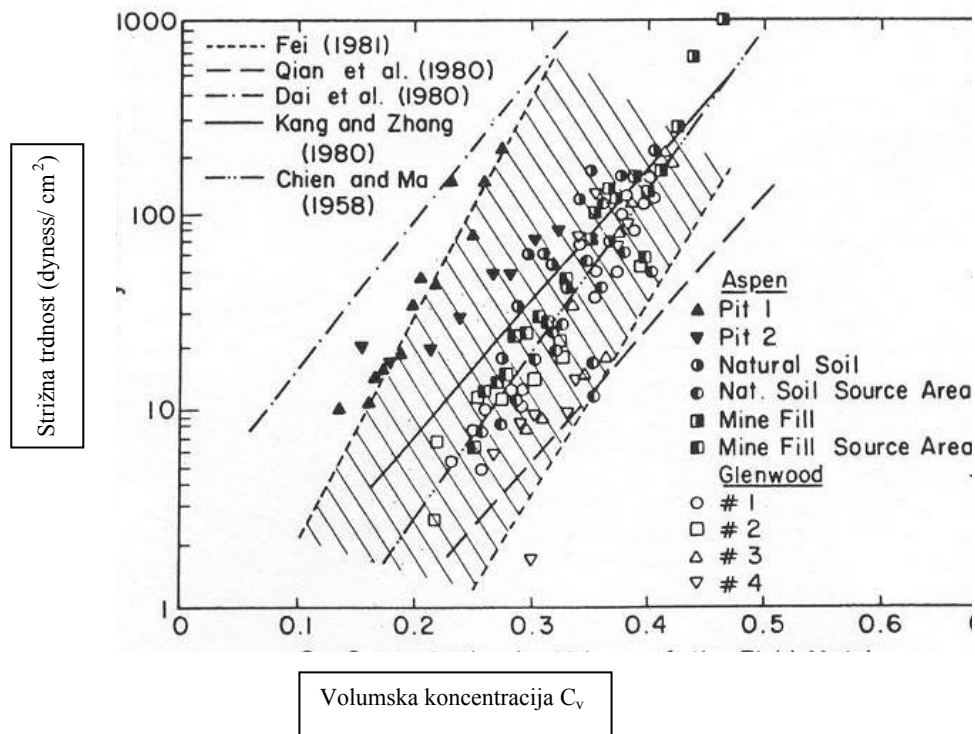
Grafikon $\tau(C_v)$: 1 Poisses = 0,1 Pas

Grafikon $\eta(C_v)$: 1 dynes/cm² = 0,1 Pa = 0,1 N/m²



Slika 81: Viskoznost v odvisnosti o volumske koncentracije (O'Brien, 2006).

Fig. 81: Dynamic viscosity versus volumetric concentration.



Slika 82: Strižna trdnost v odvisnosti od volumske koncentracije (O'Brien, 2006).

Fig. 82: Yield stress versus volumetric concentration.

Podana je preglednica z odčitanimi vrednostmi τ in η za izbrane vrednosti volumske koncentracije C_v .

Preglednica 30: Mejne vrednosti reoloških parametrov pri izbranih C_v .

Table 30: Extreme values of rheological parameters.

	Strižna trdnost τ (N/m ²)		Viskoznost η (Pas)	
	τ_{\min}	τ_{\max}	η_{\min}	η_{\max}
$C_v=0,40$	2,6	170	0,63	27
$C_v=0,45$	6,7	275	1,9	70
$C_v=0,50$	18	800	5,4	185

Kot je bilo že navedeno, je bilo z uporabo kombinacij reoloških podatkov iz preglednice 30 izdelanih 12 modelov, katerih karakteristike so podane v preglednici 31.

Preglednica 31: Pregled modelov in podatkov pri različnih kombinacijah reoloških parametrov.

Table 31: Models, included in rheological characteristics sensitivity analysis

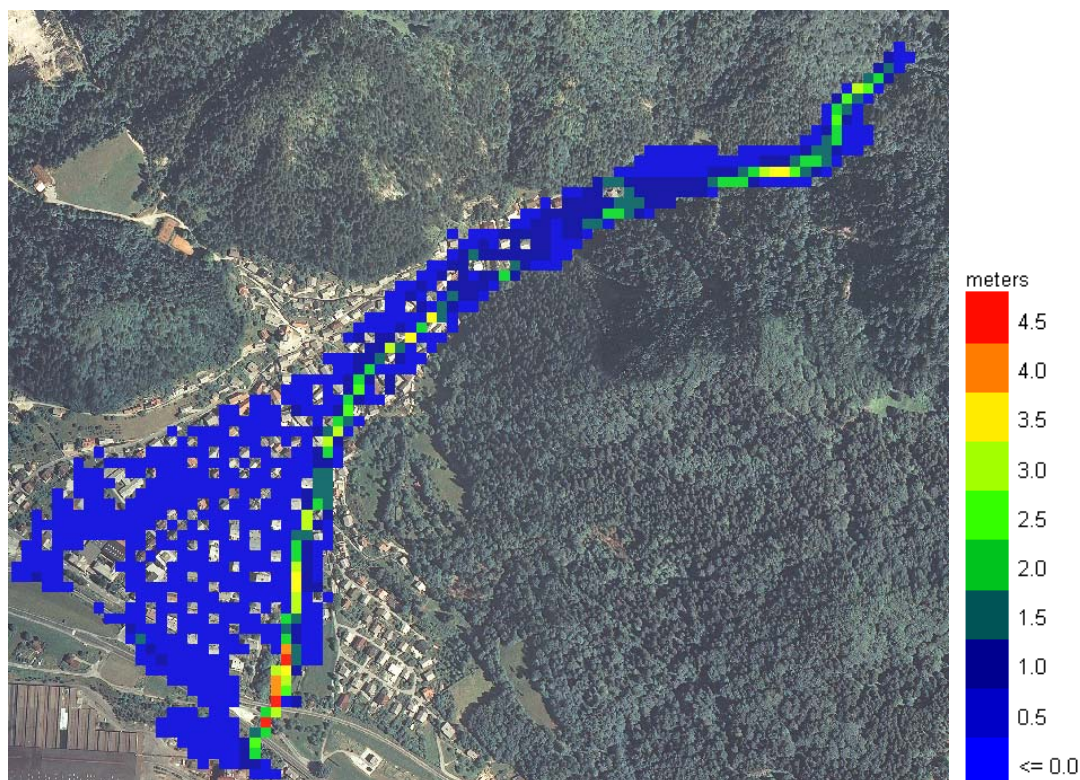
Ime modela	C_v	Hidrogram	Strižna trdnost τ (N/m ²)	Viskoznost η (Pas)
Bela21	0,5	$Q_{100,(19h)} C_v=0,5$	18	5,4
Bela22	0,5	$Q_{100,(19h)} C_v=0,5$	800	185
Bela23	0,5	$Q_{100,(19h)} C_v=0,5$	18	185
Bela24	0,5	$Q_{100,(19h)} C_v=0,5$	800	5,4
Bela25	0,45	$Q_{100,(19h)} C_v=0,45$	6,7	1,9
Bela26	0,45	$Q_{100,(19h)} C_v=0,45$	275	70
Bela27	0,45	$Q_{100,(19h)} C_v=0,45$	6,7	70
Bela28	0,45	$Q_{100,(19h)} C_v=0,45$	275	1,9
Bela29	0,4	$Q_{100,(19h)} C_v=0,4$	2,6	0,63
Bela30	0,4	$Q_{100,(19h)} C_v=0,4$	170	27
Bela31	0,4	$Q_{100,(19h)} C_v=0,4$	2,6	27
Bela32	0,4	$Q_{100,(19h)} C_v=0,4$	170	0,63

Ostali uporabljeni parametri modelov so bili pri vseh enaki. Računska celica na mreži je bila velikosti 15 m x 15 m. Pozicija vhodnega hidrograma je bila pri vseh modelih enaka. Koeficient laminarne odpornosti K je bil 2285, specifična teža sedimenta pa 27.000 N/m³. Vpliv hiš je bil zajet z blokiranimi celicami, Manningovi koeficienti n_g pa so bili za različne tipe površin sledeči: gozd 0,16 ms^{-1/3}; travnik 0,033 ms^{-1/3}; struga 0,13 ms^{-1/3}; področje med hišami 0,035 ms^{-1/3}.

6.3.6.3 Predstavitev in analiza rezultatov s komentarji

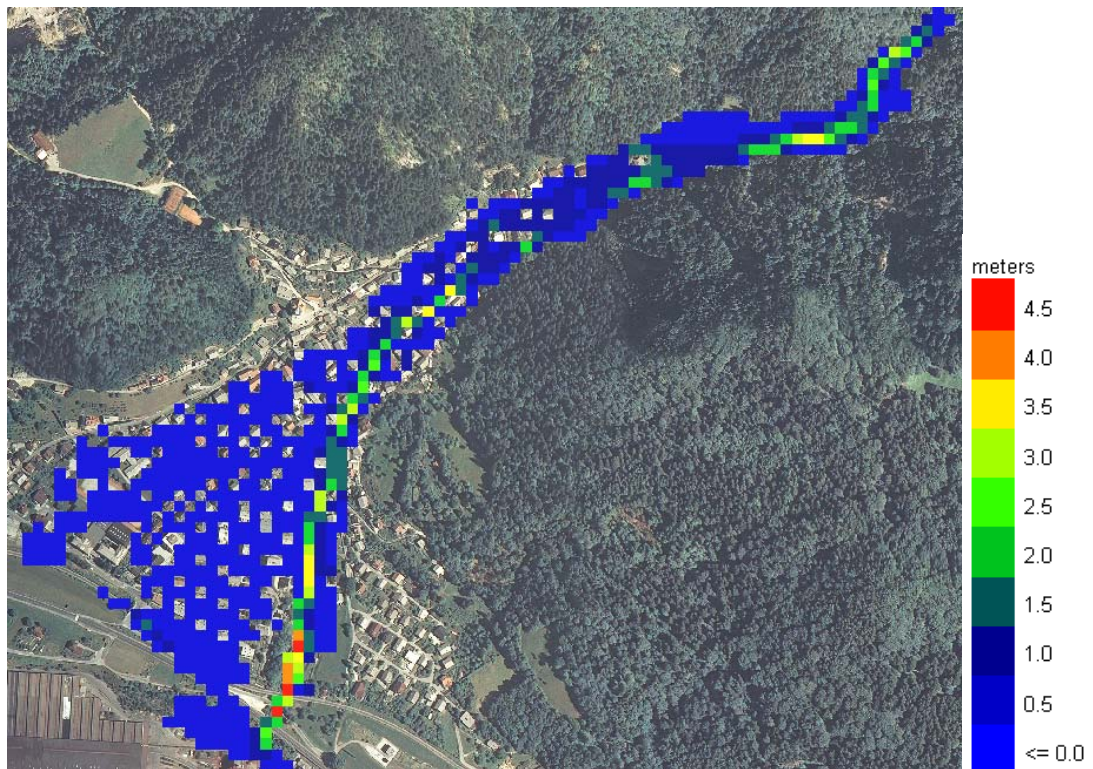
V nadaljevanju so prikazani rezultati modelov, kjer je bil testiran vpliv reologije. Pri tej analizi se je pokazalo, da imajo reološki parametri relativno majhen vpliv na rezultate v primerjavi z ostalimi parametri, analiziranimi v tej nalogi. Vpliv izbranih kombinacij reoloških parametrov, znotraj izbrane vrednosti C_v , je bil na naših modelih z mrežo 15 m x 15 m zanemarljivo majhen. Razlika v rezultatih je bila vidna samo med skupinami modelov z različnimi vrednostmi C_v .

Primerjava rezultatov je prikazana na skupini modelov z volumsko koncentracijo $C_v = 0,5$. Prikazana sta modela z največjimi oz. najmanjšimi vrednostmi reoloških parametrov.



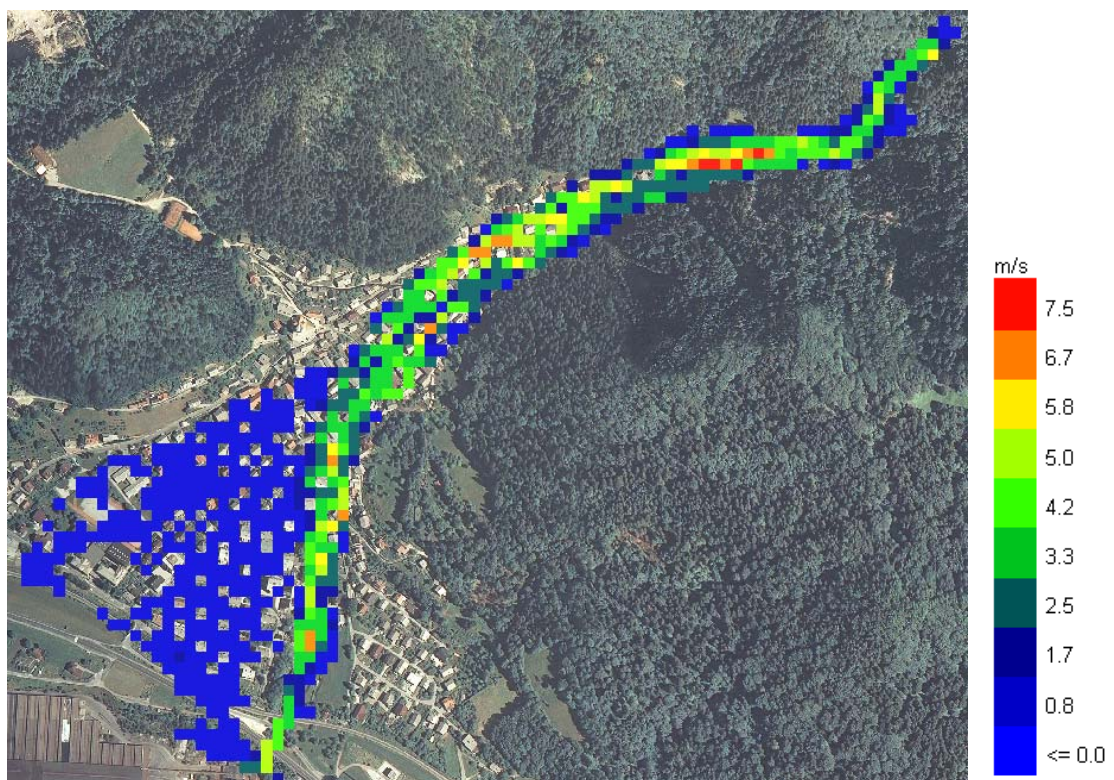
Slika 83: Maksimalne globine drobirskega toka pri modelu Bela21 (15x15, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,5$, $\tau = 18 \text{ N/m}^2$ in $\eta = 5,4 \text{ Pas}$).

Fig. 83: Maximum flow depth in model Bela21 (15x15, hydrograph Q_{100} , $C_v = 0,5$, $\tau = 18 \text{ N/m}^2$ in $\eta = 5,4 \text{ Pas}$).



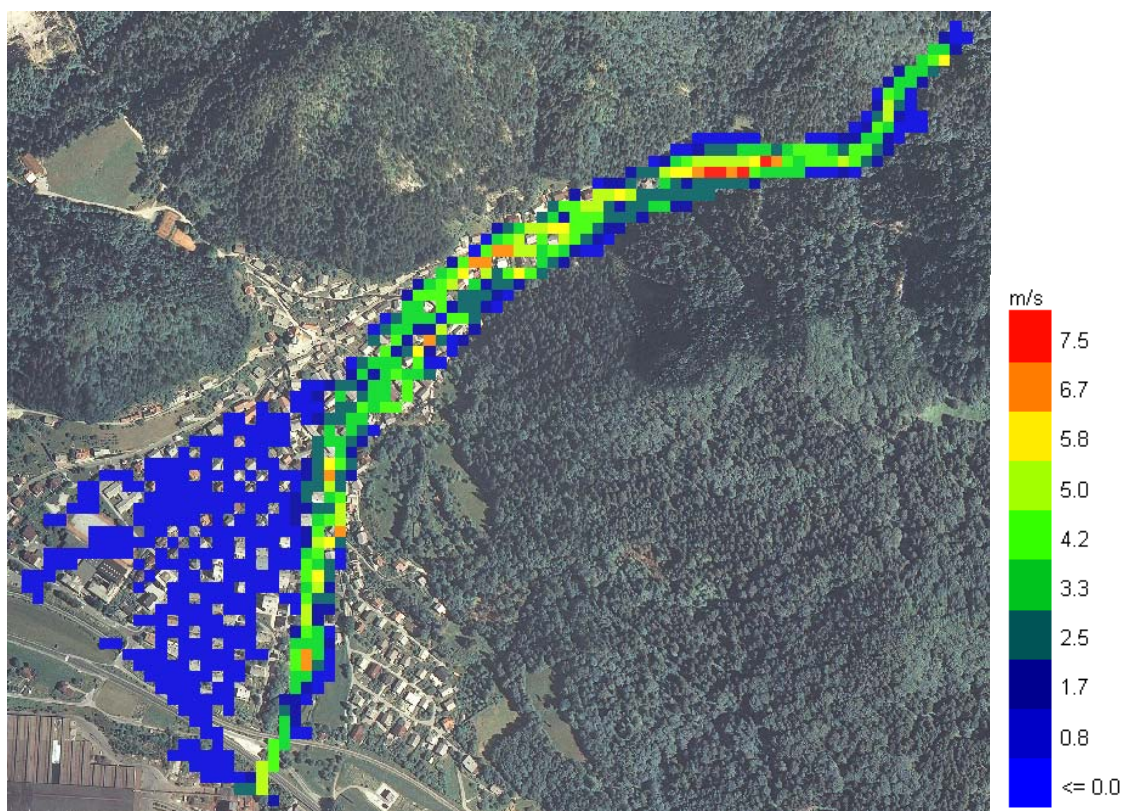
Slika 84: Maksimalne globine drobirskega toka pri modelu Bela22 (15x15, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,5$, $\tau = 800 \text{ N/m}^2$ in $\eta = 185 \text{ Pas}$).

Fig. 84: Maximum flow depth in model Bela22 (15x15, hydrograph Q_{100} , $C_v = 0,5$, $\tau = 800 \text{ N/m}^2$ in $\eta = 185 \text{ Pas}$).



Slika 85: Maksimalne hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela21 (parametri: glej sliko 83).

Fig. 85: Maximum flow velocity in model Bela21 (parameters: see fig. 83).

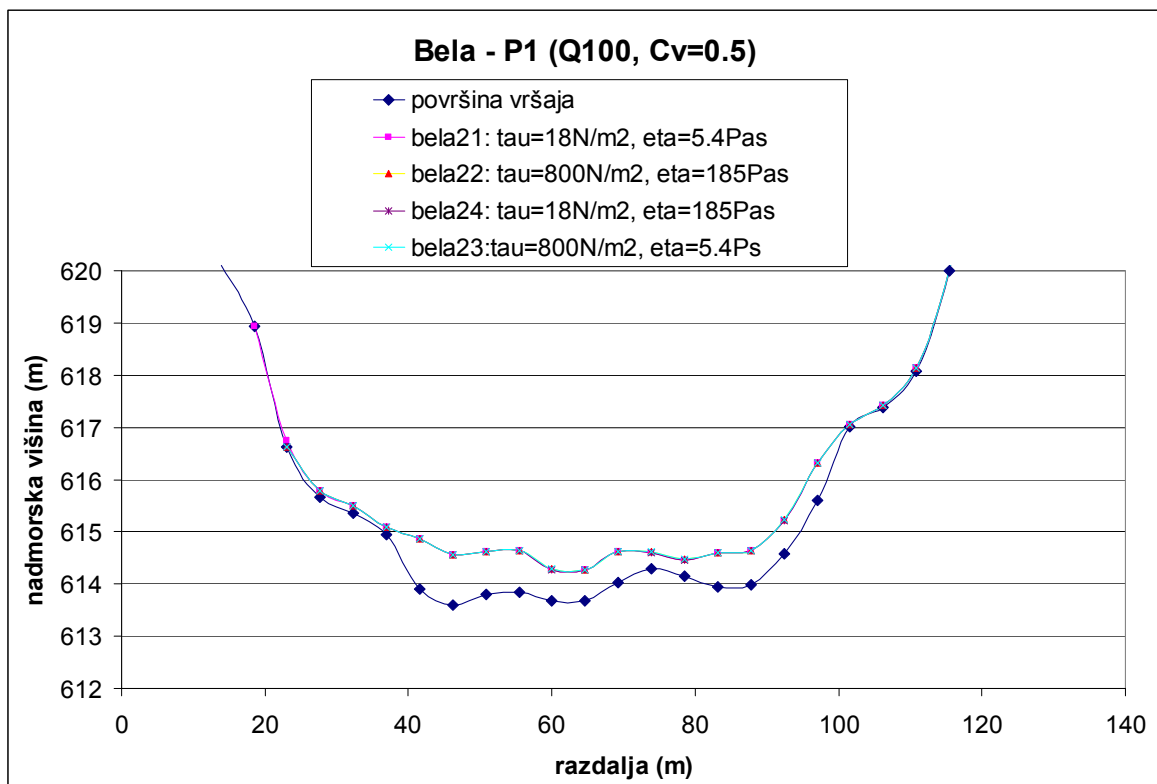


Slika 86: Maksimalne hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela22 (parametri: glej sliko 84).
Fig. 86: Maximum flow velocity in model Bela22 (parameters: see fig. 84).

Iz zgoraj prikazanih slik z rezultati (slike 83 - 86) je razvidno, da je vpliv reoloških parametrov pri naših kombinacijah vrednosti zelo majhen. Ta majhen vpliv reologije na rezultate je razviden iz praktično enakih slik rezultatov globin (sliki 83 in 84) in hitrosti (sliki 85 in 86) za dva modela z zelo različnimi reološkimi parametri. Primerjava izračunanih gladin je bila izvedena tudi v prečnem prerezu P1 v zgornjem delu vršaja.



Slika 87: Zgornji del vršaja, kjer je bil izbran primerjalni prerez P1.
Fig. 87: Cross section P1 position on Bela fan.



Slika 88: Prečni prerez P1 – primerjava gladin modelov z različnimi reološkimi parametri.
Fig.88: Influence of rheological characteristics on computed flow elevations in cross section P1(Bela).

Na prečnem prerezu P1 (slika 88) je razvidno, da so gladine modelov z različnimi reološkimi parametri praktično enake, z določenimi odstopanji zaradi prej omenjenih težav pri izrisovanju prečnih prerezov.

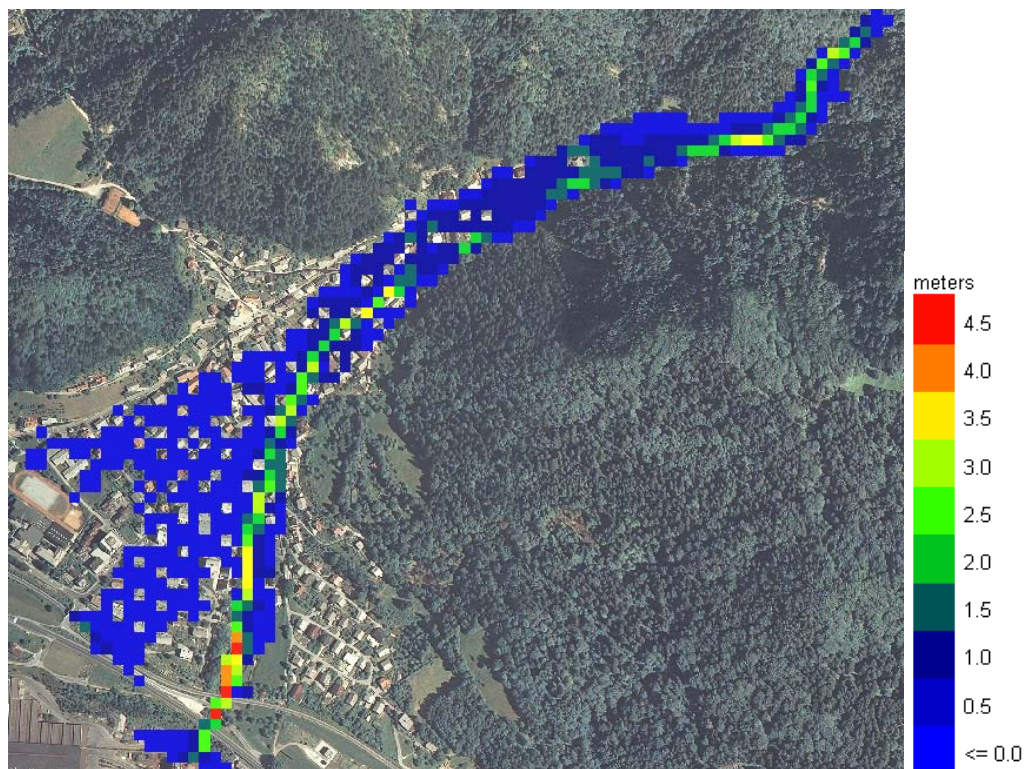
6.3.6.4 Dodatna analiza vpliva reoloških parametrov na rezultate modela

Zaradi omenjene neobčutljivosti modela je bila izdelana še ena kombinacija modelov, kjer so bile razlike med reološkimi parametri reda velikosti 10 do 20 x. Uporabljeni so bili reološki parametri, ki niso nujno realni, ampak so pokazali (ne)občutljivost modela, katere v prvem poizkusu nismo dosegli. Vsi ostali parametri modelov so ostali enaki, kot so bili uporabljeni v prvem delu analize vpliva reoloških parametrov.

Preglednica 32: Pregled modelov in reoloških podatkov modelov pri dodatni analizi modela.
Table 32: Models, included in additional rheological characteristics sensitivity analysis.

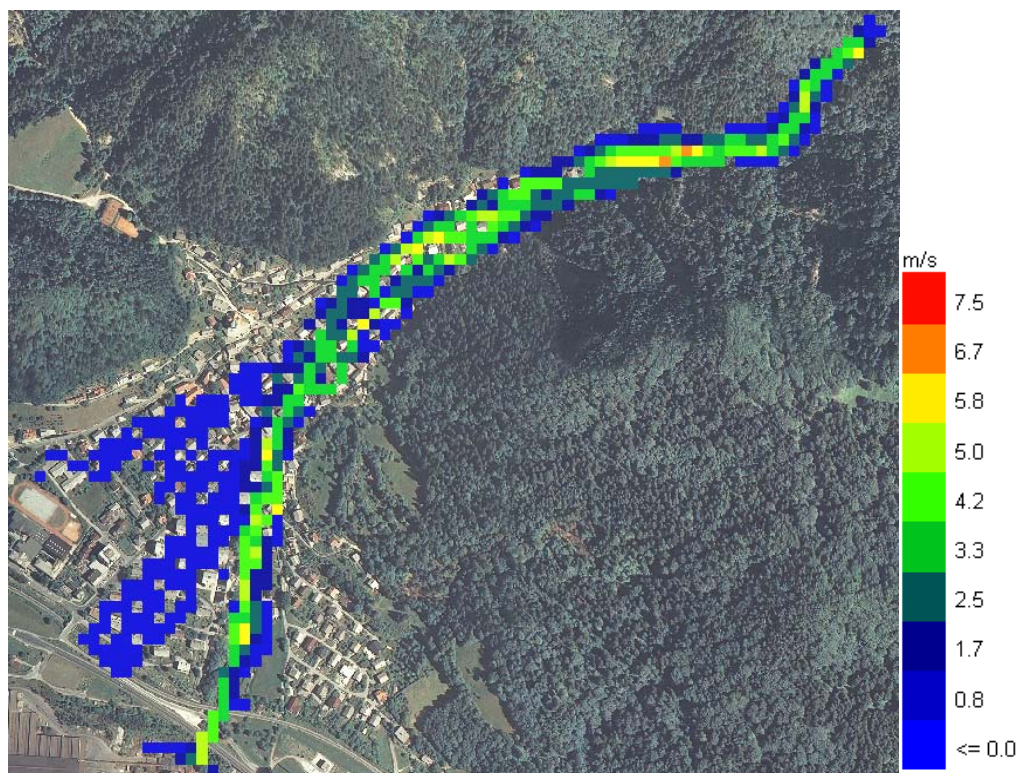
Ime modela	C_v	Hidrogram	Strižna trdnost τ (N/m^2)	Viskoznost η (Pas)
Bela22a	0,5	$Q_{100,(19h)} C_v=0,5$	18.000	185
Bela22b	0,5	$Q_{100,(19h)} C_v=0,5$	800	3.000
Bela22c	0,5	$Q_{100,(19h)} C_v=0,5$	18.000	3.000

Pri zgoraj navedenih vrednostih pa je bil vpliv reoloških karakteristik mešanice drugačen. Pri analizi rezultatov se je izkazalo, da viskoznost η ima vpliv na rezultate, medtem ko je vpliv strižne trdnosti τ pri naših modelih zanemarljiv oz. neopazen. To se je pokazalo tako, da je pri modelu Bela22a, kjer je bila v primerjavi z modom Bela22 spremenjena samo strižna trdnost τ , slika globin in hitrosti ostala praktično nespremenjena. Pri modelu Bela22b, kjer je bila spremenjena viskoznost η , pa so bile opazne manjše spremembe (maksimalna globina iz 4,3 m na 4,4 m) pri globinah toka, nekoliko večje (maksimalna hitrost iz 7 m/s na 5,8 m/s) pa pri hitrostih toka. Razlike med modeloma Bela22b in Bela22c zaradi spremembe strižne trdnosti τ ni. Prikazani so rezultati izračunanih globin in hitrosti pri modelu Bela22b.



Slika 89: Maksimalne globine drobirskega toka pri modelu Bela22b (15x15, hidrogram Q_{100} , $C_v = 0,5$, $\tau=800 \text{ N/m}^2$ in $\eta= 3000 \text{ Pas}$).

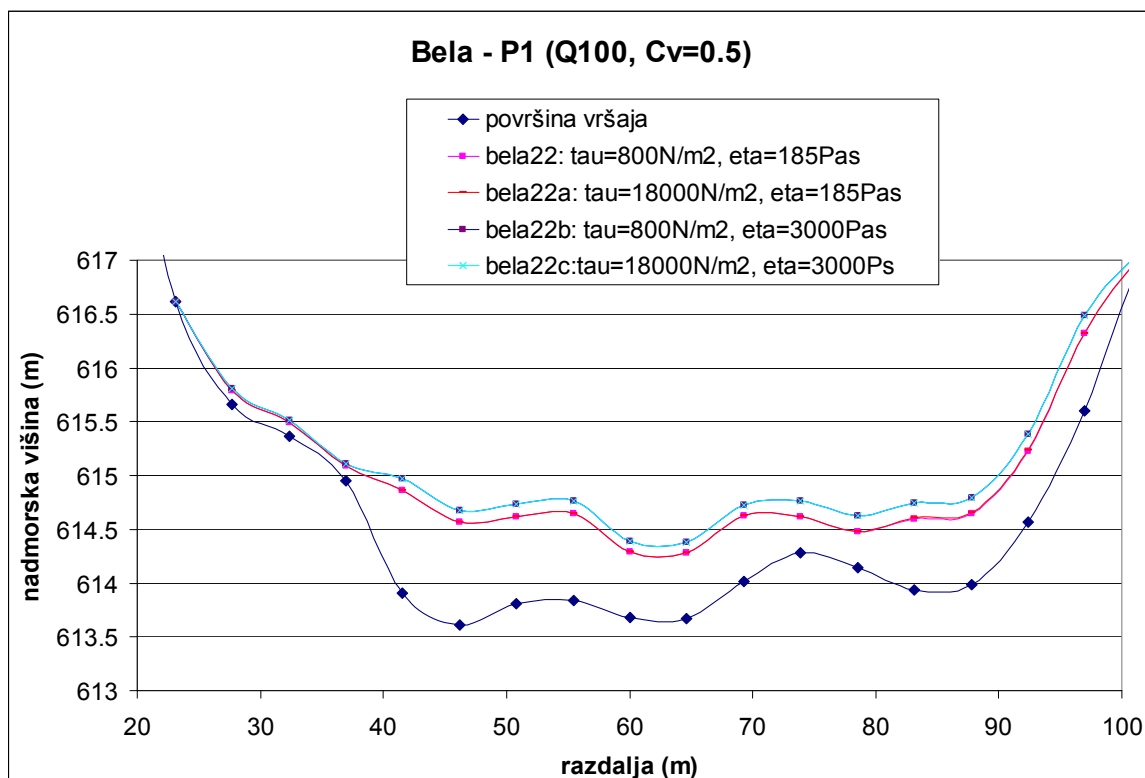
Fig. 89: Maximum flow depth in model Bela22b (15x15, hydrograph Q_{100} , $C_v = 0,5$, $\tau=800 \text{ N/m}^2$ in $\eta=3000 \text{ Pas}$).



Slika 90: Maksimalne hitrosti drobirskega toka pri modelu Bela22b (parametri: glej sliko 89).

Fig. 90: Maximum flow velocity in model Bela22b (parameters: see fig. 89).

Ker so razlike med modeloma Bela22 in Bela22b iz slik globin (sliki 85 in 89) in hitrosti (sliki 86 in 90) slabše razvidne, je primerjava podana še v prečnem prerezu P1.



Slika 91: Prečni prerez P1 – primerjava gladin modelov z različnimi reološkimi parametri – dodatna analiza.
Fig. 91: Influence of rheological characteristics on computed flow elevations in cross section P1 (Bela) – additional analysis.

V primerjavi v prerezu P1 je razvidna razlika med gladinami obravnavanih modelov. V tem prikazu se vidi, da na gladine pri modelu z mrežo 15 m x 15 m vidno vpliva samo viskoznost η . Zato sta gladini obeh modelov z isto viskoznostjo η in različno strižno trdnostjo τ praktično enaki.

6.3.6.5 Zaključki analize vpliva različnih reoloških podatkov

V tem delu analize se je pokazalo, da ima izmed dveh reoloških parametrov, vpliv na rezultate samo viskoznost η . Pa še vpliv viskoznosti je v primerjavi z vplivom drugih parametrov, ki so bili obravnavani v tej nalogi, majhen. Pri tem je potrebno poudariti, da je imel model, na katerem je bil vpliv testiran, računске celice velikosti 15 m x 15 m. Neobčutljivost modelov je lahko delno posledica tudi velikostic celic.

Ugotovitve glede vpliva reoloških parametrov so sicer podobne kot pri umerjanju modela PCFLOW2D v Logu pod Mangartom (Fazarinc, 2002). Potrebno pa je povedati, da je bila v tem primeru natančnost modela bistveno večja. Geometrijski podatki so bili bistveno bolj natančni, velikost računskih celic je bila 2 m x 2 m, maksimalni pretoki pa so bili okrog 6.000 m³/s. Razpon vrednosti viskoznosti η je bil med 0 in 1.000 Pas, vrednosti strižne trdnosti τ pa so bile med 0 in 10.000 N/m². Vpliv strižne trdnosti je bil ugotovljen kot majhen, medtem ko je bil vpliv viskoznosti ugotovljen kot zmeren do velik. Pri teh ocenah občutljivosti je potrebno povedati, da se je v primeru Loga pod Mangartom z modelom iskala natančnost nekaj metrov ali manj, česar pa s podatki o terenu DMV5, ki so uporabljeni pri naši raziskavi, ni možno pričakovati.

Torej je vpliv reoloških podatkov, v primerjavi z vplivom geometrije, izbire magnitude dogodka in izbire koeficienta hrapavosti n_g , relativno majhen. V analizo so bile vključene maksimalne in minimalne vrednosti posameznih parametrov, ki so bile zabeležene v raziskovanju drobirskih tokov (O'Brien, 2006).

To je zelo vzpodbuden podatek, saj je bila reologija ena največjih neznank pri modelu drobirskega toka. Vse ostale parametre modela je možno, v določenih mejah načrtovane natančnosti, dovolj dobro določiti, medtem ko je za realne reološke podatke potrebno jemanje vzorcev materiala in opravljanje dragih raziskav v geomehanskih laboratorijih.

Iz zgornjih ugotovitev lahko zaključimo, da so reološki podatki, pri preliminarnem ocenjevanju nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov, manj pomembni, saj je vpliv drugih parametrov, kot so geometrija, magnituda, razpoložljiva količina vode in koeficient hrapavosti bistveno večji.

6.4 Modeliranje pobočno – hudourniških drobirskih tokov

6.4.1 Modeli pobočno-hudourniških pobočnih tokov z različnimi scenariji

V tem poglavju bo prikazano modeliranje pobočno-hudourniških drobirskih tokov, ki prav tako kot hudourniški, ogrožajo naseljene vršaje. Najprej bo predstavljenih 6 modelov, na katerih je bil uporabljen vhodni hidrogram za tri različne scenarije hudourniško – pobočnih drobirskih tokov in sicer $Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\max} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ in $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$. Izbrano je bilo trajanje dogodka 180s. Več o uporabljenih vhodnih hidrogramih je bilo napisano v poglavju o hidroloških vhodnih podatkih in v obrazložitvi modelne magnitude drobirskega toka.

Preglednica 33: Pregled modelov in podatkov pri različnih variantah pobočno-hudourniških tokov.

Table 33: Models, included in slope-torrential debris flows modeling.

Ime modela	mreža	C_v	Hidrogram (t=180s)	Čas računanja
Bela33	15x15	0,5	$Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$	4 min
Bela34	15x15	0,5	$Q_{\max} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$	2 min
Bela35	15x15	0,5	$Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$	1 min
Bela36	15x15	0,42	$Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$	4 min
Bela37	15x15	0,42	$Q_{\max} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$	3 min
Bela38	15x15	0,42	$Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$	2 min

Ostali vhodni podatki so bili na vseh šestih modelih enaki. Pozicija vhodnega hidrograma je bila pri vseh modelih enaka. Koeficient laminarne odpornosti K je bil 2285, specifična teža sedimenta pa 27.000 N/m^3 . Vpliv hiš je bil zajet z blokiranimi celicami, Manningovi koeficienti n_g pa so bili za različne tipe površin naslednji:

gozd $0,16 \text{ ms}^{-1/3}$

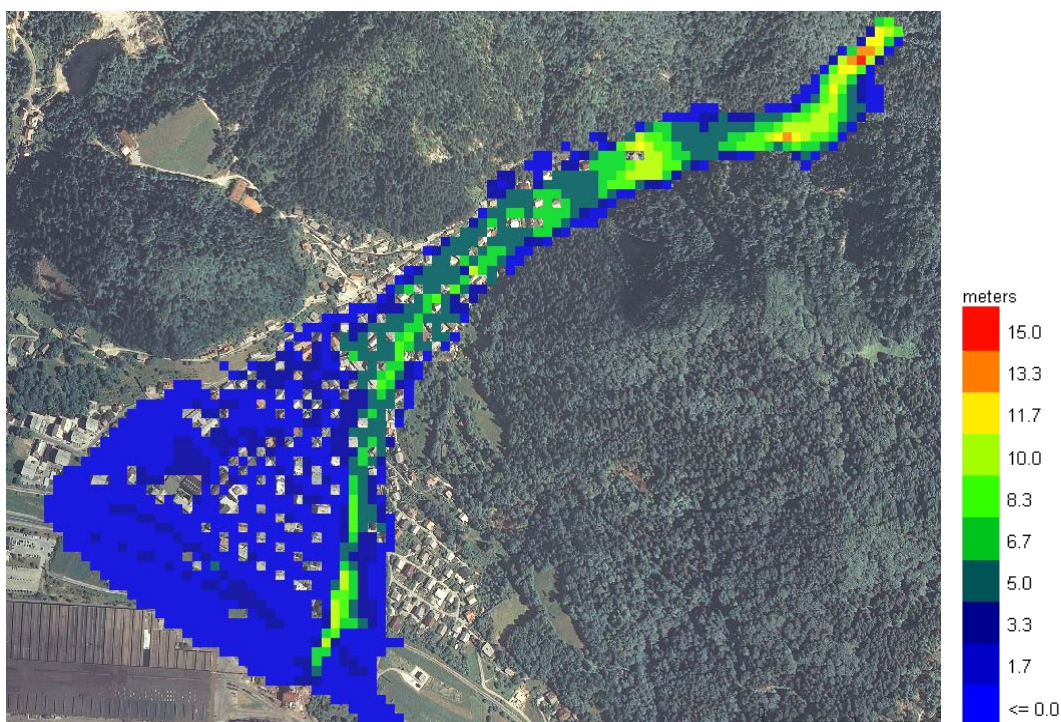
travnik $0,033 \text{ ms}^{-1/3}$

struga $0,13 \text{ ms}^{-1/3}$

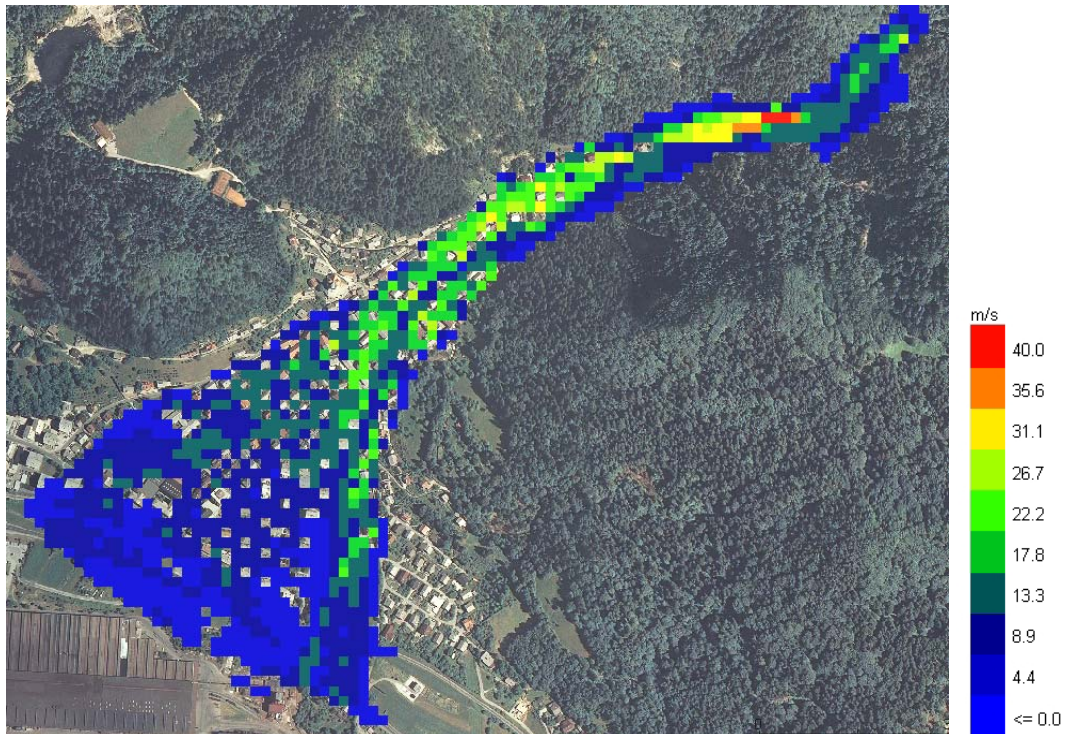
površina med objekti $0,035 \text{ ms}^{-1/3}$

Reološke karakteristike pa so bile umerjene vrednosti parametrov iz Loga pod Mangartom in sicer pri $C_v = 0,5$ ($\tau = 2000 \text{ N/m}^2$, $\eta = 156 \text{ Pas}$) in pri $C_v = 0,42$ ($\tau = 20 \text{ N/m}^2$, $\eta = 10 \text{ Pas}$).

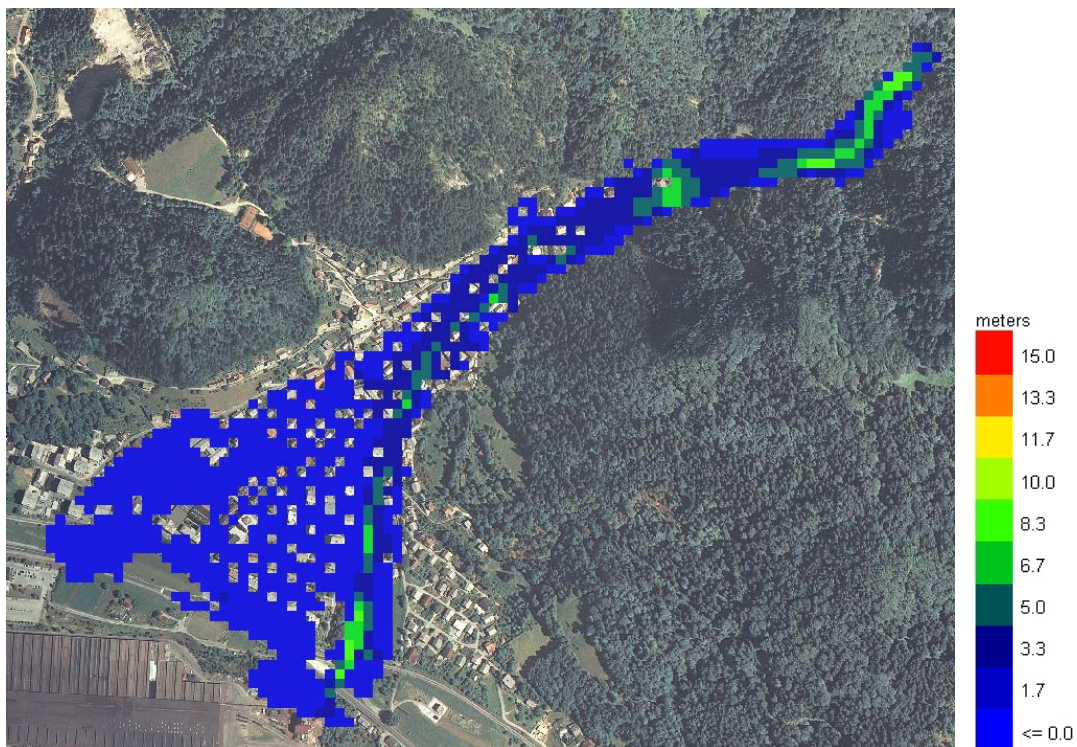
Pri modeliranju večjih maksimalnih pretokov so se pokazale nekatere specifike, ki jih pri manjših pretokih hudourniških drobirskih tokov ni bilo. Glavna izmed njih so bile zelo visoke maksimalne hitrosti toka na določenih delih vršaja. Poleg tega pa se je pokazalo, da je čas računanja pri modelih z velikimi maksimalnimi pretoki bistveno daljši. V primeru $Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$, je čas računanja za dogodek, dolg 180 s, trajal 4 min oz 240 s. To pomeni da je razmerje pri mreži 15x15 1:1,33, medtem ko je bilo pri modelu z hidrogramom $Q_{100} C_v = 0,5$ to razmerje 240:1, kar je bistveno krajši čas računanja.



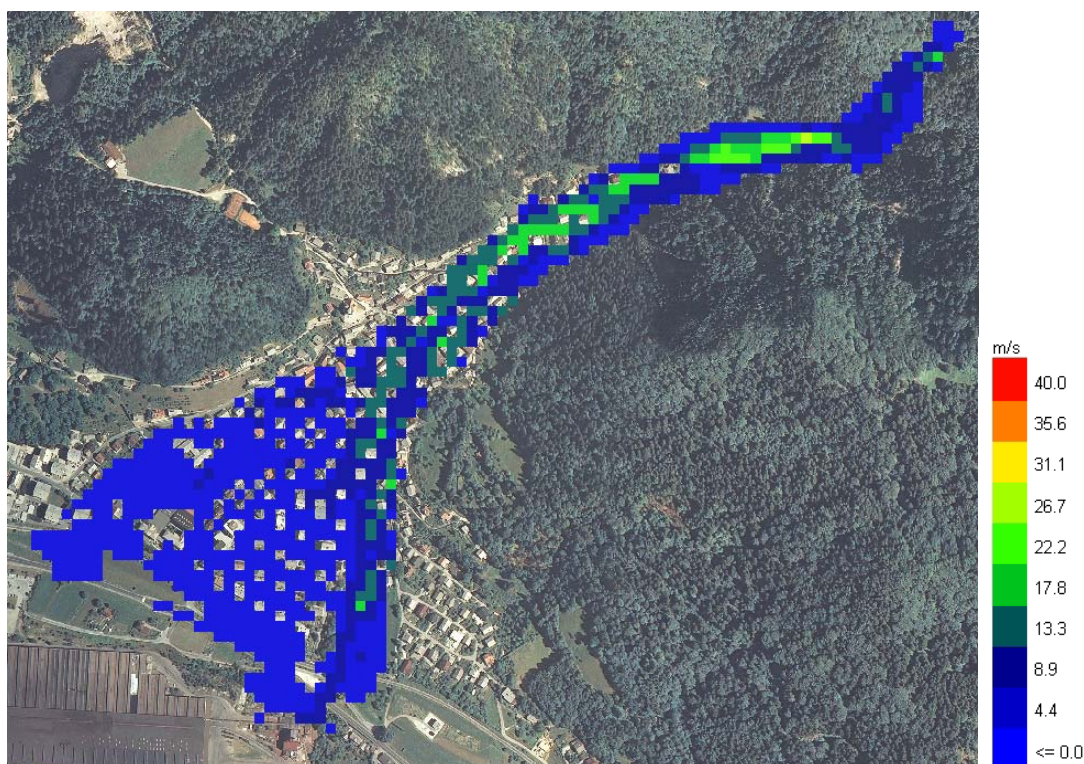
Slika 92: Maksimalne globine pri modelu Bela 36 (15x15, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$).
Fig. 92: Maximum flow depth in model Bela36 (15x15, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$).



Slika 93: Maksimalne hitrosti pri modelu Bela36 (15x15, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$).
Fig. 93: Maximum flow velocity in model Bela36 (15x15, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$).



Slika 94: Maksimalne globine pri modelu Bela 38 (15x15, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$).
Fig. 94: Maximum flow depth in model Bela38 (15x15, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$).



Slika 95: Maksimalne hitrosti pri modelu Bela38 (15x15, $C_v=0,42$, $Q_{\max} = 1500\text{m}^3/\text{s}$).
Fig. 95: Maximum flow velocity in model Bela38 (15x15, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$).

Maksimalne hitrosti (sliki 93 in 95) so večje od do sedaj zabeleženih dogodkov (Log pod Mangartom, Koseč), zato so v nadaljevanju prikazane različne možnosti pri nastavitvah modela, ki bi lahko pripeljale do bolj realnih rezultatov.

6.4.2 Analiza možnih sprememb modela za zmanjšanje hitrosti drobirskih tokov

6.4.2.1 Predstavitev različnih možnosti sprememb

Na zgornjih slikah se vidi, da so maksimalne globine na vršaju pri pretoku $Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Bela36) tudi 10 do 11 m, kar je možno, nerealne pa so maksimalne hitrosti reda velikosti 20 do 25 m/s, saj take hitrosti niso običajne pri drobirskih tokovih. V primeru modeliranja drobirskih tokov v Koseču so bile hitrosti v strugi pri pretoku $500 \text{ m}^3/\text{s}$ 12 do 14 m/s, ob robovih pa približno 1 do 2 m/s. Pri tem je potrebno povedati, da je povprečni naklon struge hudournika Brusnik na tem delu okrog 20 % (Hojnik, 2004). Povprečen naklon struge hudournika Bela čez vršaj pa je okrog 9 %. Sicer pa je povprečni naklon celotne struge hudournika Bela 11,9 % (VGI, 1995), Brusnika pa 37 % (VGI, 2002).

Določena sprememba se vidi že pri modelu Bela38, kjer je $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, in so maksimalne globine na vršaju do 6m, hitrosti pa so 12 do 15 m/s. Ta ugotovitev kaže na to, da je težava v maksimalnem pretoku, ki očitno v modelu povzroči prevelike hitrosti drobirskega toka.

Vzrokov za tako velike izračune hitrosti toka je lahko več. V nadaljevanju je obravnavanih nekaj možnosti za rešitev tega problema, ki so bile testirane tako posamično kot tudi v različnih kombinacijah:

- povečevanje računskega območja in premik vhodnega hidrograma
- vhodni hidrogram, razdeljen na več celic
- omejitev Froudovega števila

Treba je poudariti, da pri tem delu raziskave v modelih, ki bodo predstavljeni, ne gre za iskanje realnih rezultatov (hitrosti in globin), ampak gre predvsem za testiranje vpliva zgoraj naštetih parametrov na izračun pobočno - hudourniških drobirskih tokov.

6.4.2.1.1 Povečanje računskega območja in premik vhodnega hidrograma

Vzrok za izredno velike hitrosti drobirskega toka na zgornjem delu vršaja bi lahko bila tudi bližina pozicije vhodnega hidrograma z velikimi pretoki. Možno je, da na izvoru hitrosti presegajo realne vrednosti in se do mesta, ki je za našo analizo že pomembno, stanje ne stabilizira. V ta namen je bila pripravljena nova računska mreža z velikostjo celic 15 m x 15 m, ki je bila podaljšana v hudourniško grapo nad vršajem, kamor je bil premaknjen vhodni hidrogram. Pozicija hidrograma pri modeliranju hudourniških drobirskih tokov se ni izkazala za pomembno, ampak v primeru pobočno – hudourniških je lahko, zaradi zelo velikih maksimalnih pretokov, vpliv pozicije hidrograma pomembnejši.



Slika 96: Računska mreža na zgornjem delu vršaja v prvotnem modelu z mrežo 15 m x 15 m.
Fig. 96: Computational grid 15 m x 15 m on upper part of Bela fan.



Slika 97: Nova podaljšana mreža 15 m x 15 m pri novem modelu.
Fig. 97: New, prolonged, computational grid 15 m x 15 m on upper part of Bela fan.

6.4.2.1.2 Razdelitev hidrograma na več celic

Pri tako velikih pretokih, kot je $5000 \text{ m}^3/\text{s}$, je lahko kritična tudi vhodna celica na računski mreži. Tak pretok v eni celici pomeni, da je pri dolžini stranice celice 15 m in globini 10 m, hitrost toka približno 33 m/s. Za omejitev tega pojava je bilo izdelanih več modelov, kjer je bil vhodni hidrogram razdeljen na več računskih celic. Testirane so bile naslednje razdelitve: dve vzporedni celici, štiri vzporedne celice, štiri celice v kvadratni formaciji in 10 vzporednih celic.

6.4.2.1.3 Omejitev Froudovega števila

Program omogoča, da uporabnik omeji Froudovo število toka in s tem posledično omeji tudi hitrosti. Sicer je izraz za izračun Froudovega števila sledeč:

$$Fr = \frac{v^2}{gh} \quad (13)$$

Program omejevanje Froudovega števila pri računu izvaja z povečevanjem koeficienta hrapavosti n_g v celicah, kjer je bila nastavljena omejena vrednost presežena. S povečevanjem koeficienta hrapavosti pa se doseže zmanjšane hitrosti, kar je tudi naš cilj v tem delu raziskave. Te spremembe v koeficientih hrapavosti se zapišejo v datoteki *ffplain.rgh*, kjer je možno po končanem računu pogledati, katere celice so bile pri izračunu kritične in je zato program v njih povečal koeficient n_g . V isti datoteki je možno pogledati tudi končne vrednosti koeficientov n_g , kar nam je lahko v veliko pomoč pri določanju koeficientov hrapavosti pri nadaljnjem delu.

6.4.2.2 Predstavitev modelov za analizo različnih možnosti sprememb

Za testiranje vpliva zgoraj opisanih možnosti so bili izdelani različni modeli, kjer so bili kombinirani zgoraj naštetih ukrepi. Zaradi boljšega pregleda vpliva naštetih parametrov modela so bili vsi modeli v tem delu analize narejeni na novi računski mreži s celicami 15 m x 15 m, kjer je bil koeficient hrapavosti n_g povsod enak $0,04 \text{ ms}^{-1/3}$. Enoten koeficient hrapavosti je bil izbran zato, da se pri analizi vpliva obravnavanih parametrov izključi možnost vpliva različnih koeficientov n_g , ki lahko v določeni kombinaciji z drugimi parametri povzročijo tudi težave. Prav tako so bili novi modeli narejeni brez upoštevanja vpliva hiš. Model Bela36a je v bistvu model Bela36, ki je bil že predstavljen, spremenjen pa je koeficient hrapavosti n_g in izvzet je bil vpliv hiš. Ta model je bil narejen dodatno, z razlogom boljše primerjave vpliva novih nastavitvev oz parametrov modela, ki so obravnavani v tem delu naloge.

Preglednica 34: Pregled modelov in različnih dodatnih nastavitvev za omejevanje hitrosti toka.
Table 34: Models with additional velocity limiting settings.

Ime modela	mreža	C_v	Hidrogram (t=180s)	Dodatne nastavitve
Bela36a	15x15	0,42	$Q_{max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$	-
Bela39	15x15- nova	0,42	$Q_{max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$	-
Bela40	15x15- nova	0,42	$Q_{max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$	Hidrogram v 4 celicah (2 x 2)
Bela41	15x15- nova	0,42	$Q_{max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$	Hidrogram v 10 celicah
Bela47	15x15- nova	0,42	$Q_{max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$	Hidrogram v 10 celicah, $Fr \leq 1,1$
Bela48	15x15- nova	0,42	$Q_{max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$	Hidrogram v 4 celicah (linija)
Bela49	15x15- nova	0,42	$Q_{max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$	Hidrogram v 4 celicah, $Fr \leq 1,1$

Ostali parametri modelov so bili sledeči.

Hidrogram: $Q_{max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$, $t = 180 \text{ s}$

reologija pri koncentraciji $C_v = 0,42$ (umerjeno za Log pod Mangartom)

$$K = 2285 \text{ (-)}$$

$$\text{spec. teža sedimenta} = 27.000 \text{ N/m}^3$$

$$\tau = 20 \text{ N/m}^2$$

$$\eta = 10 \text{ Pas}$$

koeficienti n_g : povsod $0,04 \text{ ms}^{-1/3}$

6.4.2.3 Rezultati modelov z upoštevanimi možnimi ukrepi

6.4.2.3.1 Rezultati modelov s podaljšano računsko mrežo in višjo lego vhodnega hidrograma

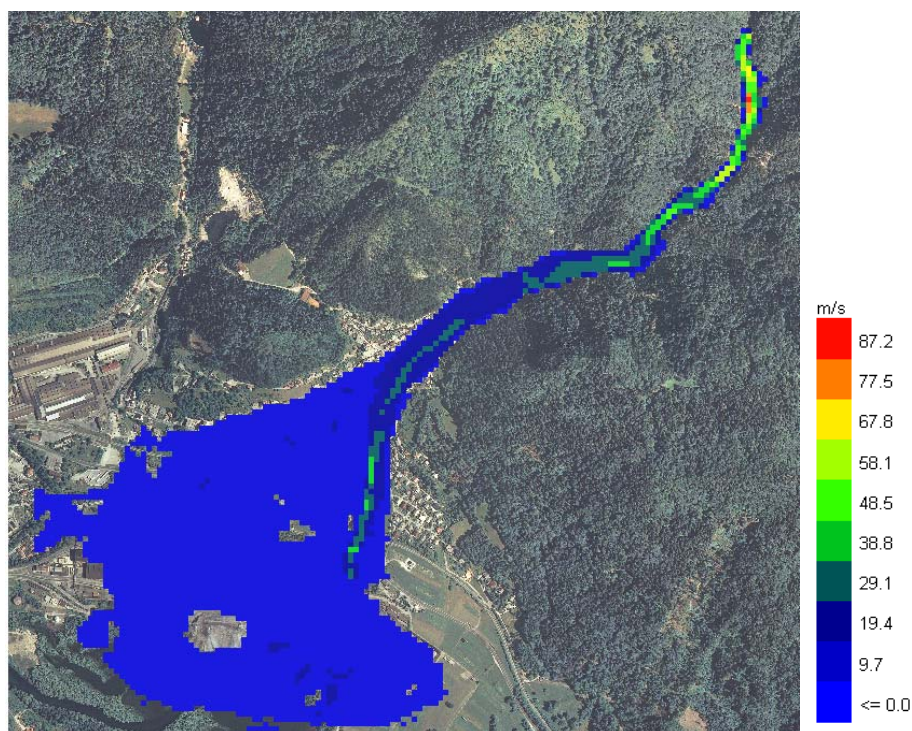
Tudi pri modeliranju hudourniško-pobočnih drobirskih tokov se je lega hidrograma, podobno kot pri hudourniških drobirskih tokovih, pokazala za manj pomemben vpliv. Primerjava hitrosti pri modelih Bela36a in Bela39 je pokazala, da so maksimalne hitrosti drobirskega toka ostale zelo podobne. Na vršaju so maksimalne hitrosti presegle 40 m/s, kar je nerealen rezultat. Ker se je lega vhodnega hidrograma izkazala za manj pomembno, je bilo testiranih še več variant vnosa vhodnega hidrograma (število vhodnih celic).

6.4.2.3.2 Rezultati modelov z vhodnim hidrogramom v več računskih celicah

Hidrogram je bil postavljen v več računskih celic hkrati, kar pomeni da se v primeru n celic, v vsako vnese $1/n$ delež celotnega vhodnega pretoka. V tem testiranju se je pokazalo, da ima vnos hidrograma v več celic vpliv na rezultate in da je pri velikih pretokih to pomemben

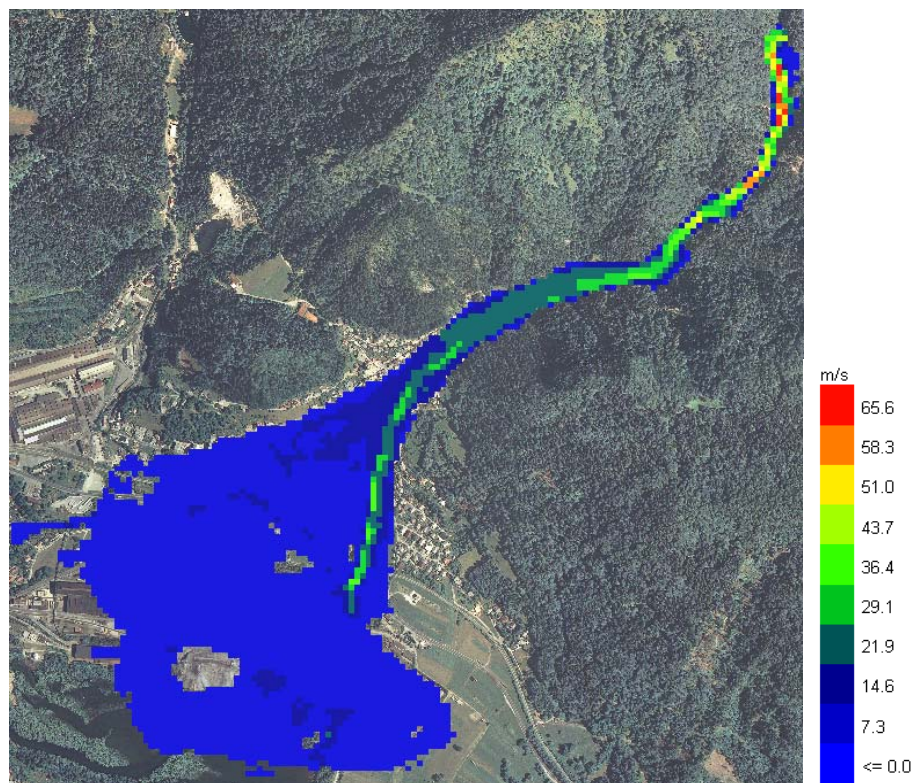
dejavnik. Pomembno pa je tudi, v kakšni obliki so te medsebojne celice. To je pokazano na primeru z vhodnim hidrogramom v 4 celicah. Če jih postavimo v linijo 1x4 (Bela48) pravokotno na padnico terena, je učinek opazen. Maksimalne hitrosti na vršaju se zmanjšajo iz 30 m/s na 20 m/s, medtem ko se pri postavitvi celic z izhodnim hidrogramom v obliki 2x2 (Bela40), hitrosti ne spremenijo. Pri postavitvi 1 x 4 lahko tok iz vsake celice steče po računski mreži, medtem ko pri obliki 2 x 2 tok iz zgornjih celic teče čez spodnji dve, ki imata še vsaka svoj izvor, s čimer se izniči učinek večjega števila celic z vhodnim hidrogramom. Po drugi strani pa preveliko število celic z vhodnim hidrogramom nima več zelenega učinka. To se je izkazalo pri modelu z vhodnim hidrogramom v 10 celicah (oblika 1 x 10, pravokotno na smer padnice) (Bela41), kjer so bile razlike v hitrostih od modela Bela48 (oblika 1 x 4) zanemarljive.

V tem delu raziskave je bilo ugotovljeno, da ima število celic z vhodnim hidrogramom nezanemarljiv vpliv na rezultate modela, ni pa to edini vzrok nerealno visokih hitrosti drobirskega toka. V nadaljevanju so prikazane hitrosti pri modelih Bela39 (1 vhodna celica) in Bela48 (4 vhodne celice, oblika 4x1). Model Bela48 je bil na podlagi tega dela raziskave izbran za optimalno varianto.



Slika 98: Maksimalne hitrosti pri modelu Bela39 (podaljšana 15x15 mreža, $C_v = 0,42$, $Q_{max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$).
Fig. 98: Maximum flow velocity in model Bela39 (prolonged 15x15 grid, $C_v = 0,42$, $Q_{max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Na rezultatih modela Bela 39 (slika 98) se vidi, da je hitrost v zgornjem delu vršaja skoraj 50 m/s in da so v osrednjem delu hitrosti tudi do 30 m/s. Hitrosti v strugi pa so med 30 in 50 m/s. Taki rezultati niso realni, zato je bilo potrebno ugotoviti vzroke in rešitev. Hitrosti med 80 in 90 m/s nad vršajem so posledica ozke in strme grape ter ekstremno velikega pretoka, kar se pokaže v »napačnih« izračunih.



Slika 99: Maksimalne hitrosti pri modelu Bela 48 (podaljšana 15x15 mreža, $C_v = 0,42$, $Q_{max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$, hidrogram v 4 celicah oblike 1x4).

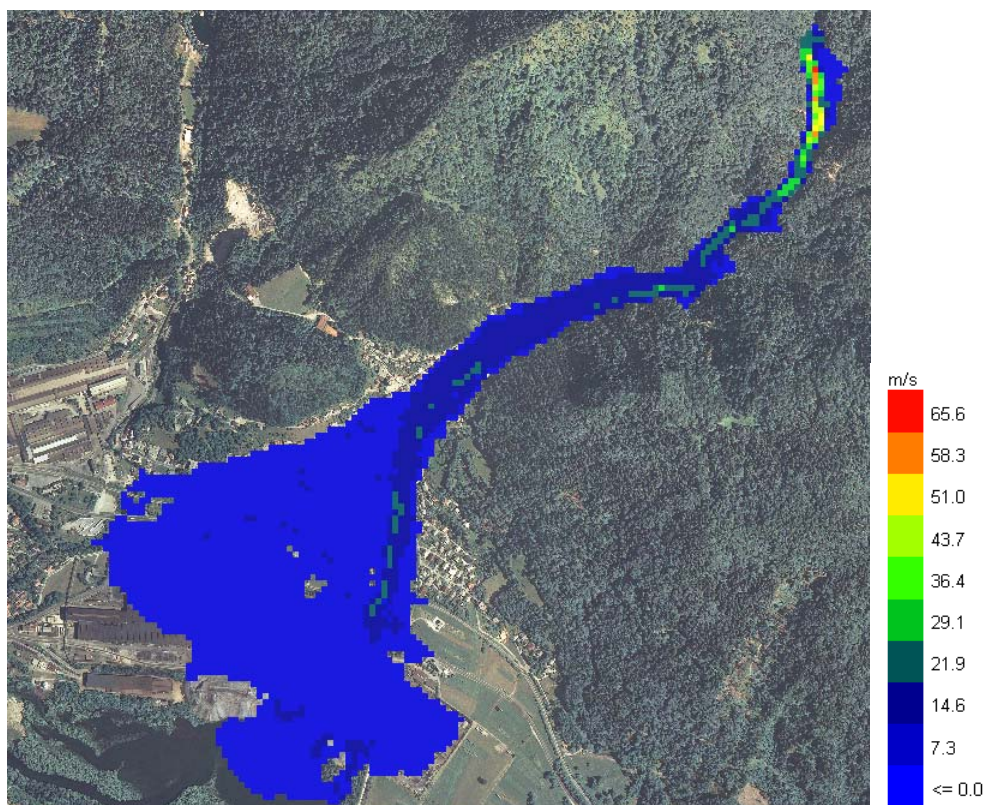
Fig. 99: Maximum flow velocity in model Bela39 (prolonged 15x15 grid, $C_v = 0,42$, $Q_{max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$, inflow hydrograph in 4 grid cells formed 1x4).

Na sliki 99 so prikazani rezultati modela Bela48, ki ima vhodni hidrogram v 4 celicah. Hitrosti so manjše kot pri modelu Bela39. Še vedno so previsoke v primerjavi z dosedanjimi izkušnjami, ampak del tega gre pripisati tudi majhemu koeficientu hrapavosti, ki je po celotni površini $0,04 \text{ ms}^{-1/3}$. Je pa iz tega rezultata jasno razviden vpliv razdelitve vhodnega hidrograma v več celic. Hitrosti na vrhu vršaja so manjše od 40 m/s, v osrednjem delu vršaja so hitrosti med 15 in 20 m/s. V strugi hudournika so hitrosti med 20 in 35 m/s. V primerjavi z modelom Bela39 to pomeni znatno zmanjšanje hitrosti drobirskega toka na obravnavanih površinah.

Ugotovitev o vnosu vhodnega hidrograma v več računskih celic je še posebej pomembna pri modelih z gostejšo računsko mrežo. V naši analizi je bila uporabljena mreža 15 m x 15 m, kar pomeni, da je potrebno pri mreži 5 m x 5 m hidrogram vnesti v 9 celic, da je vpliv enak kot pri modelu z mrežo 15 m x 15 m.

6.4.2.3.3 Rezultati modelov z omejevanim Froudovim številom

Ena od možnosti za omejevanje prevelikih hitrosti je tudi zgoraj opisana možnost omejitve Froudovega števila. Preverjeni sta bili dve varianti omejitve v kombinaciji z večimi celicami z vhodnim hidrogramom. Izdelana sta bila dva modela, kjer je bilo Froudovo število omejeno na 1,1. Enkrat pri modelu z vhodnim hidrogramom, razdeljenim v štiri celice (oblika 1x4) (Bela49) in enkrat pri varianti 1x10 (Bela47). V nadaljevanju je prikazan rezultat modela Bela49, kjer so vidne dodatne spremembe v hitrostih v primerjavi z modelom Bela48, ki so posledica omejitve $Fr \leq 1$.



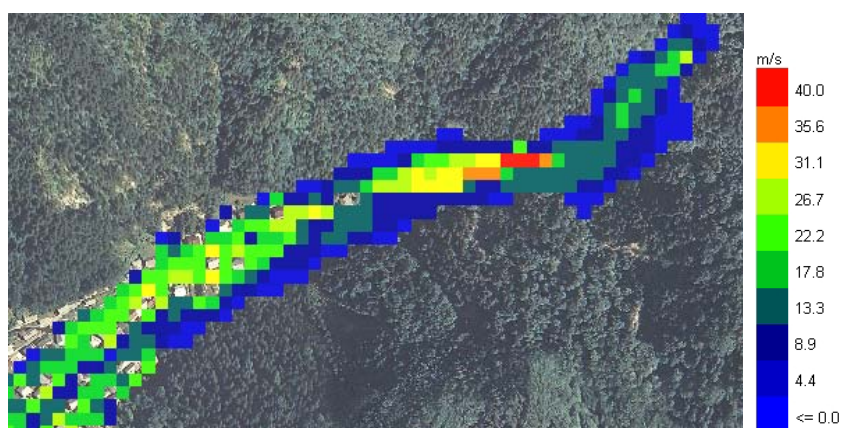
Slika 100: Maksimalne hitrosti pri modelu Bela 49 (podaljšana 15x15 mreža, $C_v=0,42$, $Q_{\max} = 5000\text{m}^3/\text{s}$, hidrogram v 4 celicah oblike 1x4, omejitev $Fr \leq 1,1$).

Fig. 100: Maximum flow velocity in model Bela49 (prolonged 15x15 grid, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 5000\text{m}^3/\text{s}$, inflow hydrograph in 4 grid cells formed 1x4, $Fr \leq 1,1$).

Vpliv omejitve $Fr \leq 1,1$ je viden predvsem v delu vršaja, kjer se tok začne razlirati na večji površini oz. na delu, kjer tok priteče iz ozke hudourniške grape na vršaj. Hitrosti na tem delu so se zmanjšale iz prvotnih (Bela48) 25 do 35 m/s na 15 do 25 m/s. Globine toka se v tem primeru povečajo za 25 do 30 %.

6.4.3 Ugotovitve pri modeliranju pobočno-hudourniških drobirskih tokov

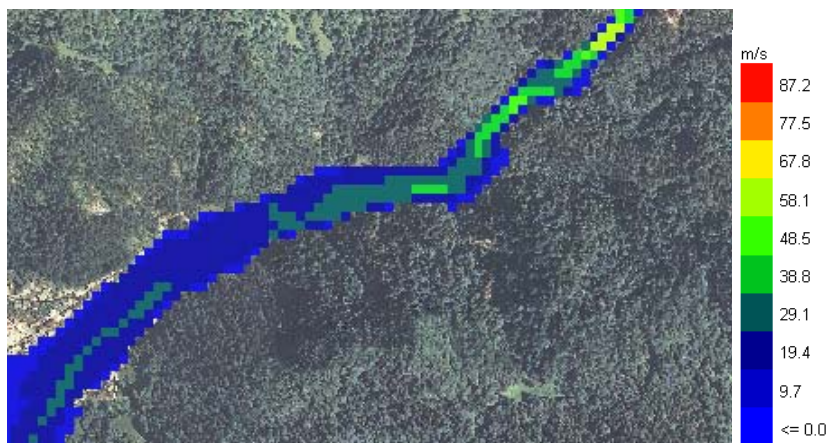
V tem delu raziskave se je pokazalo, kakšen vpliv imajo premik vhodnega hidrograma, vnos hidrograma v več celic in omejevanje Froudeovega števila. Te ugotovitve so pomembne za nadaljevanje raziskave na modelih s končno geometrijo. Poleg ugotovitev teh vplivov pa se je pokazalo še nekaj, česar pri modeliranju hudourniških drobirskih tokov ni bilo opaziti. Pri modelih Bela33 – Bela 38 se je izkazalo, da na določenem delu vršaja (na vrhu) pride do zelo velikih hitrosti. Na podlagi hitrosti sodeč bi lahko sklepali, da je to povečanje hitrosti posledica zožitve prečnega prereza.



Slika 101: Maksimalne hitrosti v zgornjem delu vršaja - Bela36 (15×15 , $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : gozd $0,16 \text{ ms}^{-1/3}$; travnik $0,033 \text{ ms}^{-1/3}$; struga $0,13 \text{ ms}^{-1/3}$; področje med hišami $0,035 \text{ ms}^{-1/3}$).

Fig.: 101: Maximum flow velocity in upper part of Bela fan - model Bela36 (15×15 , $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : forrest $0,16 \text{ ms}^{-1/3}$; meadow $0,033 \text{ ms}^{-1/3}$; channel $0,13 \text{ ms}^{-1/3}$; area between buildings $0,035 \text{ ms}^{-1/3}$).

Na sliki 102 pa je opaziti, da pa se pri modelih, kjer je bila generirana nova mreža in je bil uporabljen konstanten koeficient hrapavosti 0,04, ta ekstrem hitrosti ni pojavil. Primerjava absolutnih vrednosti hitrosti ni možna, saj so v drugem modelu koeficienti hrapavosti bistveno nižji.



Slika 102: Maksimalne hitrosti v zgornjem delu vršaja -Bela39 (podaljšana 15x15 mreža, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : celotna mreža $0,04 \text{ ms}^{-1/3}$).

Fig.: 102: Maximum flow velocity in upper part of Bela fan - model Bela39 (prolonged 15x15 grid, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : entire grid $0,04 \text{ ms}^{-1/3}$).

Ta primerjava kaže na to, da je potrebno razlog za težave z velikimi hitrostmi iskati tudi v koeficientu hrapavosti n_g , ki je pri modelu Bela36 različen za različne terene, pri modelu Bela39 pa je konstanten $0,04 \text{ ms}^{-1/3}$. V obravnavanem primeru je bila težava skrita v sami specifikaciji zgornjega dela vršaja hudournika Bela. V nadaljevanju sta omenjena specifikacija in njen vpliv na rezultate obrazložena.



Slika 103: Računska mreža na zgornjem delu vršaja Bela.

Fig. 103: Computational grid on the upper part of Bela fan.

Iz slike 103 in ogleda na terenu je razvidno, da na območju, kjer prihaja do ekstremnih hitrosti, ni zožitve prečnega profila, saj je profil precej širok in se enakomerno širi po vršaju. Težava s povečanimi hitrostmi v zgornjem delu vršaja se je pojavila pri modelu z različnimi koeficienti hrapavosti, pri modelu s konstantnim koeficientom hrapavosti $0,04 \text{ ms}^{-1/3}$ pa te težave ni bilo. To kaže na to, da je težava v tem primeru v koeficientih hrapavosti in ne v geometriji modela, kot bi lahko najprej predvidevali. Če podrobno pogledamo obravnavani del mreže vidimo, da je na tem delu prečni profil sestavljen iz gozda, struge in travnika, ki imajo različne koeficiente hrapavosti in sicer: gozd $0,16 \text{ ms}^{-1/3}$, travnik $0,033 \text{ ms}^{-1/3}$ in struga $0,13 \text{ ms}^{-1/3}$. Ker je v tem prečnem prerezu relativno ozek pas travnika in je razlika v koeficientih hrapavosti velika, se zgodi, da velik pretok v takem prerezu različne hrapavosti in ozkem pasu majhne hrapavosti, povzroči velike hitrosti po delu prereza z majhnim koeficientom hrapavosti. Rezultat pa je podoben kot pri fizični zožitvi.

Te ugotovitve ne gre posploševati za vse modele, ampak je vezana na primer vršaja Bela, lahko pa nam pove, da je modeliranje drobirskih tokov z večjimi maksimalnimi pretoki in magnitudami lahko precej različno od modeliranja manjših pretokov. Jasno pa je tudi razvidno, da je vpliv koeficienta hrapavosti pri pobočno-hudourniških drobirskih tokovih drugačen kot pri hudourniških in da je potrebno določanju tega parametra posvetiti veliko pozornosti pri vsakem primeru posebej, saj je lahko kombinacija večih, sicer povsem nepovezanih dejavnikov, vzrok za napake v modelu. To nakazuje tudi pozitiven vpliv omejevanja Froudovega števila, katerega posledica je povečan koeficient hrapavosti na kritičnih celicah.

6.4.4 Modeli pobočno-hudourniških drobirskih tokov s konstantnim koeficientom n_g

6.4.4.1 Predstavitev modelov uporabljenih v analizi

Na podlagi zadnjih ugotovitev na primeru hudournika Bela, je bil izdelan sistem modelov pobočno-hudourniških drobirskih tokov, ki imajo po vsej računski mreži konstanten koeficient hrapavosti n_g . Vrednosti so bile izbrane na podlagi izhodnih datotek prejšnjih modelov, pri katerih je bila uporabljena funkcija omejevanja Froudovega števila. V teh datotekah je zapisano, koliko je znašal končni koeficient hrapavosti pri celicah, kjer je bila zaradi omejitev Froudovega števila potreba sprememba. V vseh modelih je bil uporabljen

scenarij z maksimalnim pretokom $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ in trajanjem 180 s. Vhodni hidrogram je bil vnesen v eni računski celici.

Namen tega dela naloge ni bil iskanje realnih, končnih rezultatov ampak predvsem analiziranje vpliva na modeliranje pobočno-hudourniških drobirskih tokov, ki so se zaradi velikih maksimalnih pretokov izkazali za bolj kompleksne od originalnih drobirskih tokov, vsaj kar se modeliranja tiče. Analizirana je možnost, da se gibanje toka modelira na računski mreži s konstantnim koeficientom hrapavosti. Tudi sicer je pri pobočno-hudourniških drobirskih tokovih več neznank kot pri hudourniških drobirskih, predvsem kar se tiče magnitude dogodka, ki najbolj pogojuje morebitne posledice takega dogodka.

Preglednica 35: Pregled modelov s konstantno vrednostjo koeficienta hrapavosti n_g .
Table 35: Models with constant n_g values.

Ime modela	mreža	C_v	Hidrogram ($t=180\text{s}$)	Koeficient n_g
Bela54	15x15	0,42	$Q_{\max} = 1500\text{m}^3/\text{s}$	0,25
Bela57	15x15	0,42	$Q_{\max} = 1500\text{m}^3/\text{s}$	0,225
Bela55	15x15	0,42	$Q_{\max} = 1500\text{m}^3/\text{s}$	0,20
Bela58	15x15	0,42	$Q_{\max} = 1500\text{m}^3/\text{s}$	0,175
Bela56	15x15	0,42	$Q_{\max} = 1500\text{m}^3/\text{s}$	0,15

Reološki parametri pri koncentraciji $C_v = 0,42$ so bili naslednji: (umerjeno za Log pod Mangartom)

$$K = 2285 \text{ (-)}$$

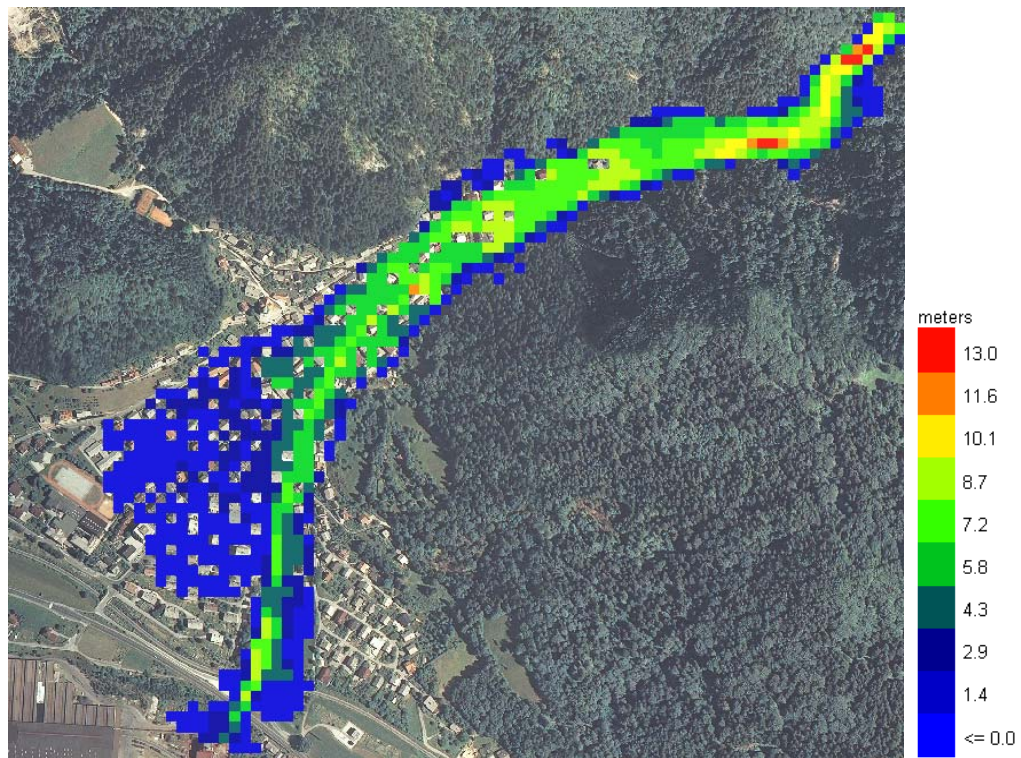
$$\text{spec. teža sedimenta} = 27.000 \text{ N/m}^3$$

$$\tau = 20 \text{ N/m}^2$$

$$\eta = 10 \text{ Pas}$$

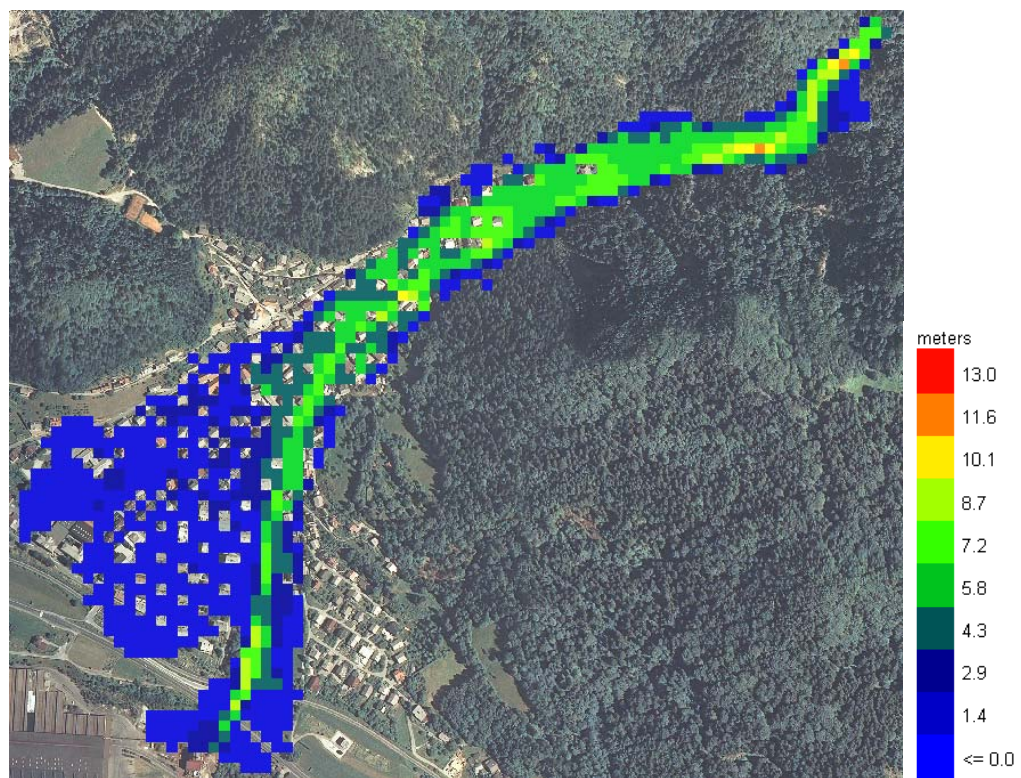
6.4.4.2 Predstavitev in analiza rezultatov s komentarji

Prikazani so rezultati in primerjava vpliva koeficienta hrapavosti pri pobočno-hudourniških drobirskih tokovih. Prikazani so rezultati modelov Bela54 ($n_g = 0,25 \text{ ms}^{-1/3}$) in Bela56 ($n_g = 0,15 \text{ ms}^{-1/3}$), ki sta modela z največjim oz. najmanjšim koeficientom hrapavosti.



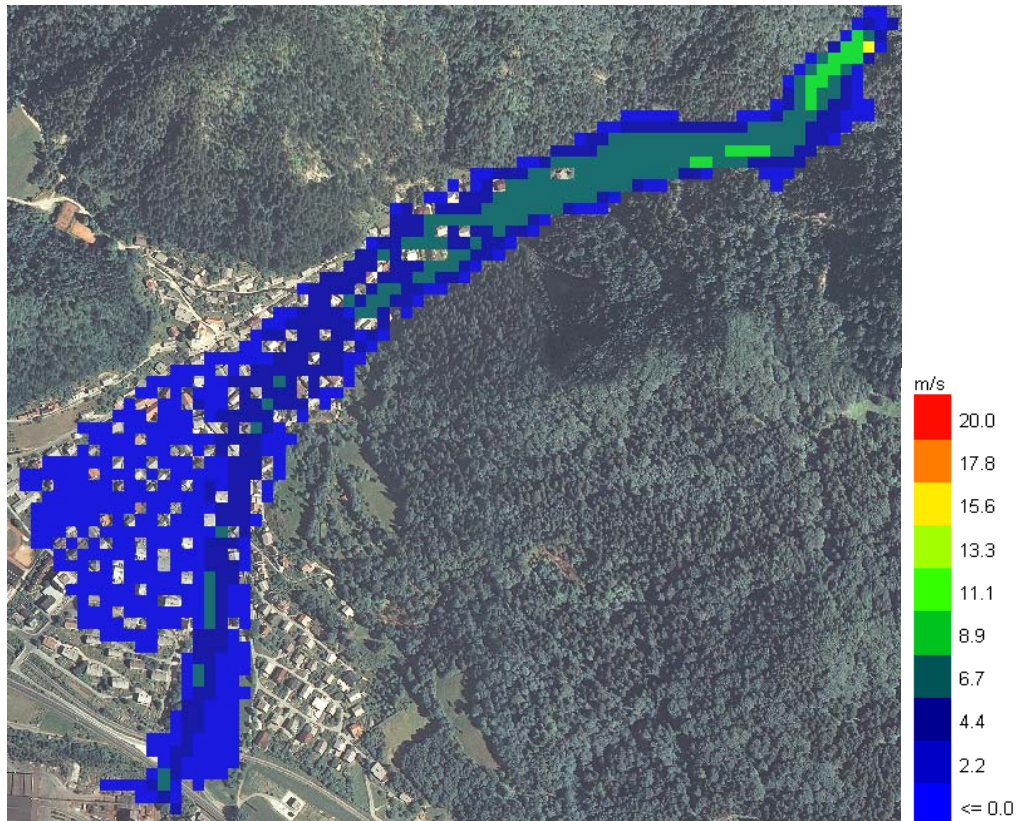
Slika 104: Maksimalne globine pri modelu Bela54 (15x15 mreža, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : povsod $0,25 \text{ ms}^{-1/3}$).

Fig. 104: Maximum flow depth in model Bela54 (15x15, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : $0,25 \text{ ms}^{-1/3}$).

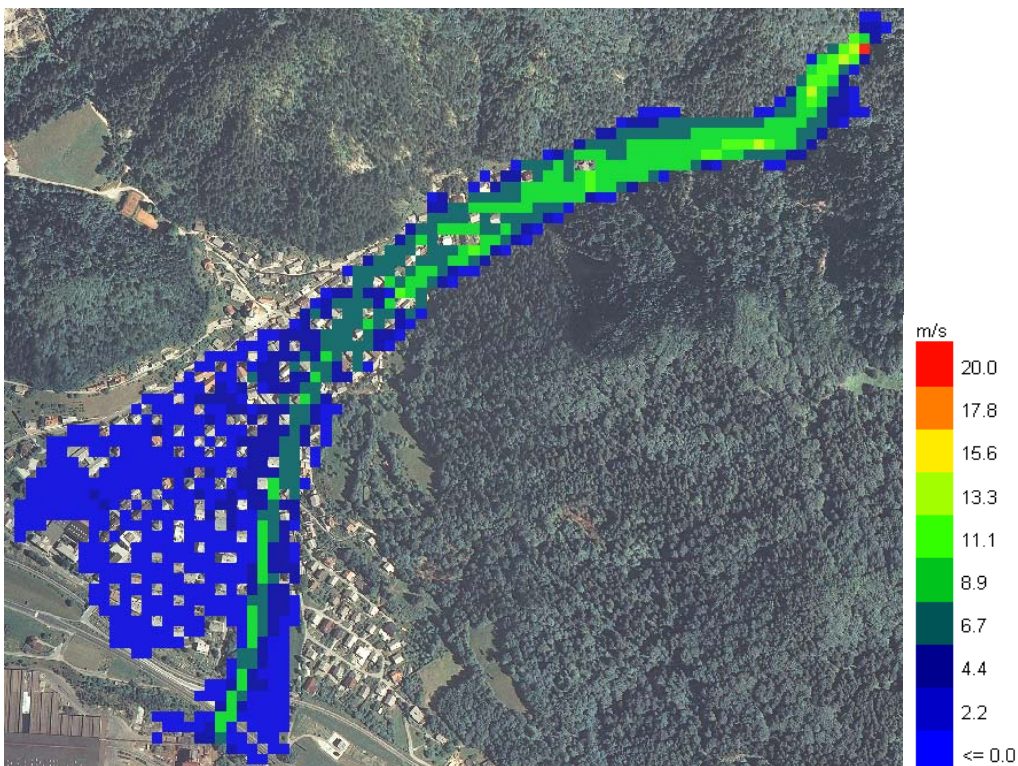


Slika 105: Maksimalne globine pri modelu Bela56 (15x15 mreža, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : povsod $0,15 \text{ ms}^{-1/3}$).

Fig. 105: Maximum flow depth in model Bela56 (15x15, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : $0,15 \text{ ms}^{-1/3}$).



Slika 106: Maksimalne hitrosti pri modelu Bela54 (parametri: glej sliko 104)
Fig. 106: Maximum flow velocity in model Bela54 (parameters: see fig. 104)



Slika 107: Maksimalne hitrosti pri modelu Bela56 (parametri: glej sliko 105)
Fig. 107: Maximum flow velocity in model Bela56 (parameters: see fig. 105).

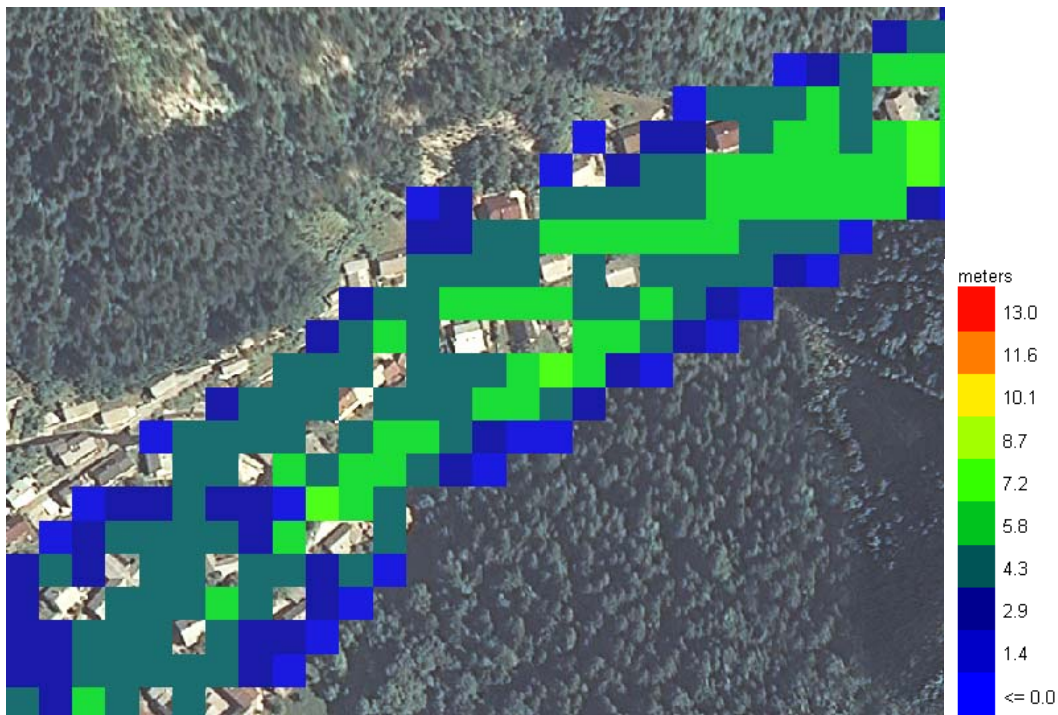
Iz primerjave slik rezultatov (slike 104-107) je vidno, da pri pobočno-hudourniških drobirskih tokovih sprememba Manningovega koeficienta hrapavosti bolj vpliva na hitrosti toka kot pa na njegove globine. Vpliv na globine toka je relativno manjši kot pri hudourniških drobirskih tokovih, kjer so bile razlike v globinah, ob spreminjanju koeficienta n_g , večje. Boljša primerjava razlik gladin bo možna v nadaljevanju, kjer je podana primerjava v prerezu P1.

Večja razlika med modeloma je v izračunanih maksimalnih hitrostih. Razlike maksimalnih hitrosti so tudi do 5 m/s. Ker je hitrost toka pomemben dejavnik pri ocenjevanju ogroženosti in ranljivosti, je ta razlika zelo pomembna.

Glede dosega toka, pa je slika precej podobna. V zgornjem delu vršaja, kjer so hitrosti in globine največje, so razlike med modeloma relativno majhne. Iz prvih dveh slik št. 104 in 105 se vidi, da je razlika večja v spodnjem delu, kjer je pri modelu z nižjimi vrednostmi koeficienti hrapavosti, doseg toka večji. Vendar je ta razlika v območju, kjer so tako hitrosti kot globine toka majhne, in je zato tudi intenzivnost delovanja manjša. Za boljšo primerjavo rezultatov je podana še podrobnejša primerjava globin in hitrosti modelov Bela54 ($n_g = 0,25 \text{ ms}^{-1/3}$) in Bela56 ($n_g = 0,15 \text{ ms}^{-1/3}$). Za boljšo primerjavo je pripravljen tudi prečni prerez P1 v katerem so podane gladine vseh obravnavanih modelov.

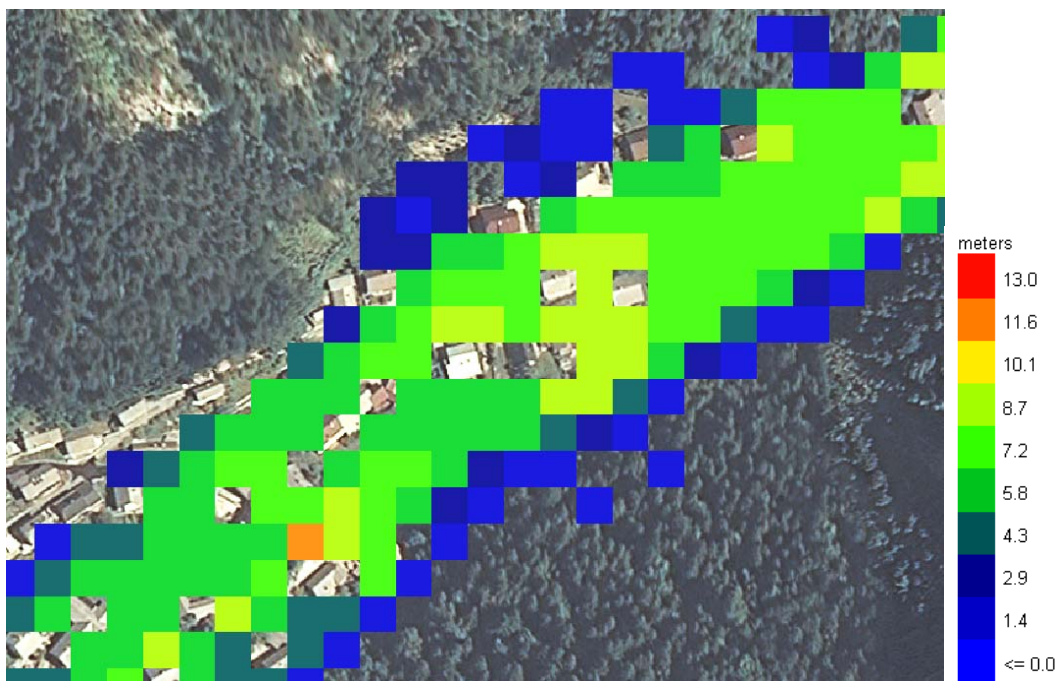


Slika 108: Zgornji del vršaja Bela, kjer je prikazana podrobnejša preiskava in je bil izbran primerjalni prerez P1.
Fig. 108: Upper part of Bela fan, where detailed comparison of results is prepared.



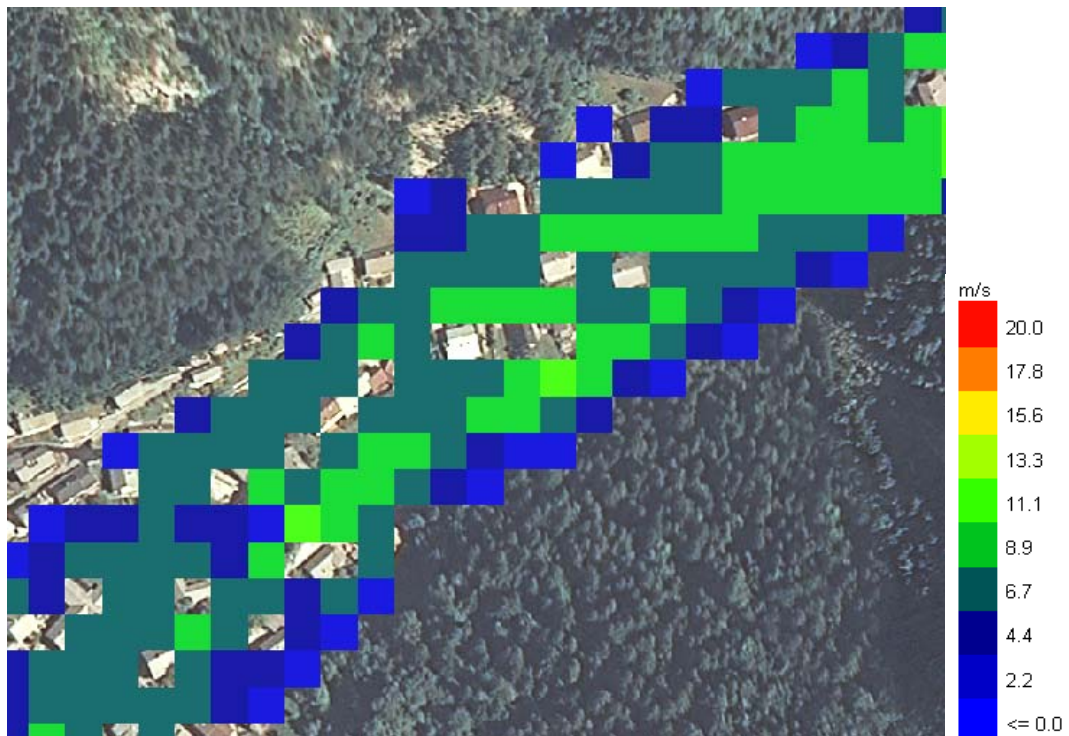
Slika 109: Podrobnejši prikaz maksimalnih globin v zgornjem delu vršaja, pri modelu Bela56 (15x15 mreža, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : povsod $0,15 \text{ ms}^{-1/3}$).

Fig. 109: Detailed presentation of maximum flow depth in Bela56 (grid 15x15, hydrograph Q_{100} , $C_v = 0,42$, $n_g = 0,15 \text{ ms}^{-1/3}$).



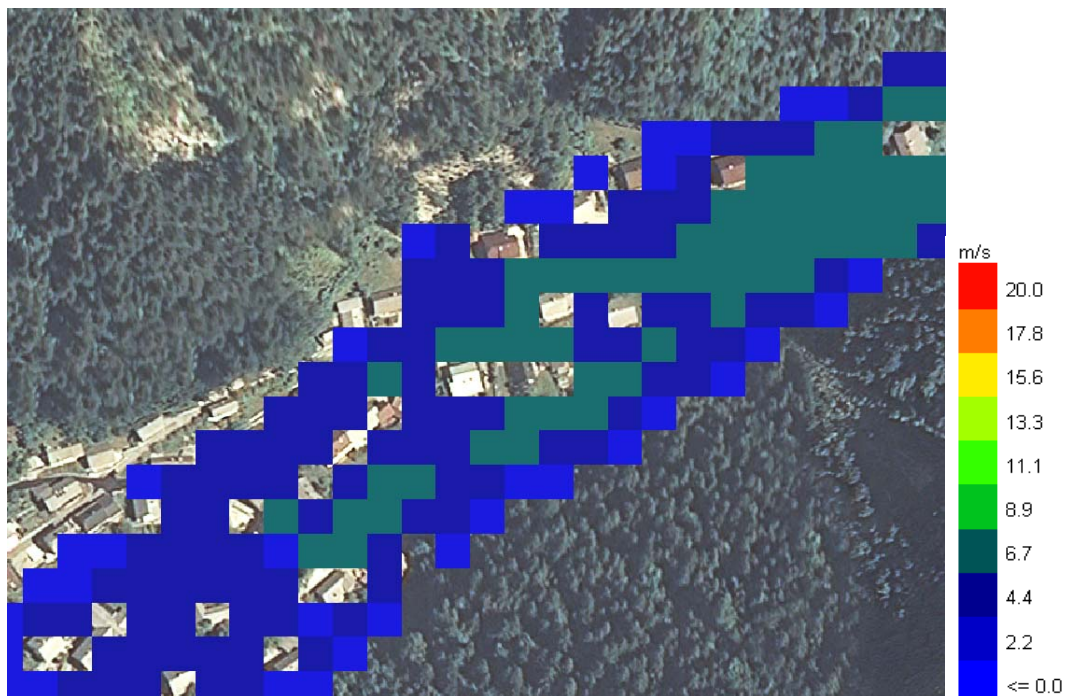
Slika 110: Podrobnejši prikaz maksimalnih globin v zgornjem delu vršaja, pri modelu Bela54 (15x15 mreža, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : povsod $0,25 \text{ ms}^{-1/3}$).

Fig. 110: Detailed presentation of maximum flow depth in Bela54 (grid 15x15, hydrograph Q_{100} , $C_v = 0,42$, $n_g = 0,25 \text{ ms}^{-1/3}$).



Slika 111: Podrobnejši prikaz maksimalnih hitrosti v zgornjem delu vršaja, pri modelu Bela56 (15x15 mreža, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : povsod $0,15 \text{ ms}^{-1/3}$).

Fig. 111: Detailed presentation of maximum velocity in Bela56 (grid 15x15, hydrograph Q_{100} , $C_v = 0,42$, $n_g = 0,15 \text{ ms}^{-1/3}$).



Slika 112: Podrobnejši prikaz maksimalnih hitrosti v zgornjem delu vršaja, pri modelu Bela54 (15x15 mreža, $C_v = 0,42$, $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, n_g : povsod $0,25 \text{ ms}^{-1/3}$).

Fig. 112: Detailed presentation of maximum velocity in Bela54 (grid 15x15, hydrograph Q_{100} , $C_v = 0,42$, $n_g = 0,25 \text{ ms}^{-1/3}$).

Iz zgornjih slik (sliki 109 in 110) je vidna podobnost v območju poplavljanja obeh modelov. Vidne pa so tudi razlike v izračunanih globinah in hitrostih. Podan je še vektorski prikaz izračunanih hitrosti.



Slika 113: Podrobnejši prikaz maksimalnih hitrosti (vektorski prikaz) v zgornjem delu vršaja, pri modelu Bela56 (parametri: glej sliko 111).

Fig. 113: Detailed presentation of maximum flow velocity - vectors (Bela56, parameters: see fig. 111).

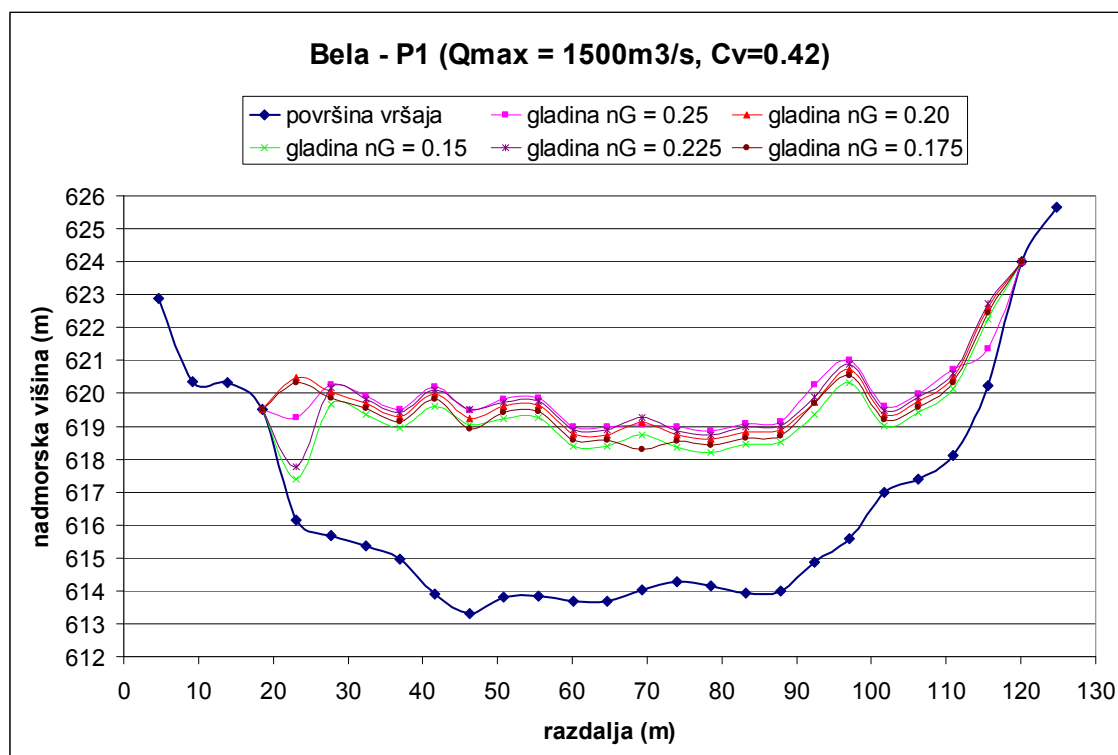


Slika 114: Podrobnejši prikaz maksimalnih hitrosti (vektorski prikaz) v zgornjem delu vršaja, pri modelu Bela54 (parametri: glej sliko 112).

Fig. 114: Detailed presentation of maximum flow velocity- vectors (Bela54, parameters: see fig. 112).

V podrobnejših slikah hitrosti, kjer so smer in velikost ponazorjene z vektorji (sliki 113 in 114) je opaziti, da se pri manjših koeficientih hrapavosti pojavljajo večje hitrosti tudi ob objektih, kar pa vpliva na udarno moč drobirskih tokov in s tem tudi na njihovo rušilnost. Na tem mestu se še enkrat pokaže pozitiven vpliv modeliranja hiš na vršaju z uporabo funkcije blokiranih celic.

V prečnem prerezu P1 so prikazane gladine drobirskih tokov vseh modelov, kjer so bile vrednosti n_g od $0,15 \text{ ms}^{-1/3}$ pa do $0,25 \text{ ms}^{-1/3}$. V prerezu se vidi, da je vpliv koeficienta n_g na gladine relativno majhen. Maksimalna sprememba izračunanih gladin v prerezu P1 je iz 6,31 m na 5,73 m kar znaša 9 %. Pri hudourniških drobirskih tokovih je ta sprememba znašala 20 do 30 %. Po tem lahko sklepamo, da je vpliv koeficienta hrapavosti pri modeliranju pobočno-hudourniških drobirskih tokov manjši kot pri modeliranju originalnih hudourniških drobirskih tokov.



Slika 115: Gladine v prerezu P1 v odvisnosti od koeficienta hrapavosti n_g .
Fig. 115: Influence of n_g on computed flow elevations in cross section P1 (Bela).

6.4.5 Zaključki modeliranja pobočno-hudourniških drobirskih tokov

Pobočno-hudourniški drobirski tokovi so manj pogosti kot originalni hudourniški drobirski tokovi. Pri modeliranju pobočno-hudourniških drobirskih tokov se je pokazalo nekaj posebnosti v primerjavi s hudourniškiimi. Na tem mestu gre predvsem omeniti določene težave pri samem modeliranju, ki zahtevajo nekaj dodatnih nastavitvev modela oz. dodatnih ukrepov. Poleg tega je bilo ugotovljeno, da ima spreminjanje koeficienta hrapavosti relativno manjši vpliv kot pri hudourniških drobirskih tokovih.

Sicer pa pri pobočno-hudourniških drobirskih tokovih največja neznanka ostaja scenarij oz. magnituda dogodka. Pri hudourniških drobirskih tokovih se lahko določi oz. predpis določi (podobno kot za visoke vode), kakšen delež sedimenta se bo upošteval pri ocenjevanju vpliva drobirskih tokov, medtem ko je pri pobočno-hudourniških drobirskih tokovih količina sproženega materiala zelo različna od primera do primera, saj so geološke in geomehanske razmere tiste, ki določajo verjetnost nastanka in predvsem količino potencialno nevarnega materiala. In prav scenarij dogodka in z njim magnituda in trajanje dogodka so tisti faktorji, ki bistveno vplivajo na posledice, ki jih tak dogodek povzroči.

Namen modeliranja pobočno-hudourniških drobirskih tokov v tej nalogi ni bil iskanje optimalnega modela ali izdelava kart nevarnosti, ampak predvsem pokazati razliko med obema tipoma drobirskih tokov, ki vplivajo tudi na modeliranje te vrste drobirskih tokov. Vnaprej poiskati scenarij pobočno-hudourniških drobirskih tokov, ki bi veljal za vse hudournike je nemogoče, saj je vsako hudourniško območje zelo specifično. Geološke razmere v zaledju so glavni dejavnik pri nastanku, proženju in oceni magnitudo pobočnih drobirskih tokov, ki lahko potujejo naprej po strugi, kot pobočno-hudourniški, in ogrožajo prebivalstvo in infrastrukturo na vršaju.

7 ZAKLJUČKI

7.1 Uporabnost vhodnih podatkov in vpliv na rezultate

7.1.1 Uvod

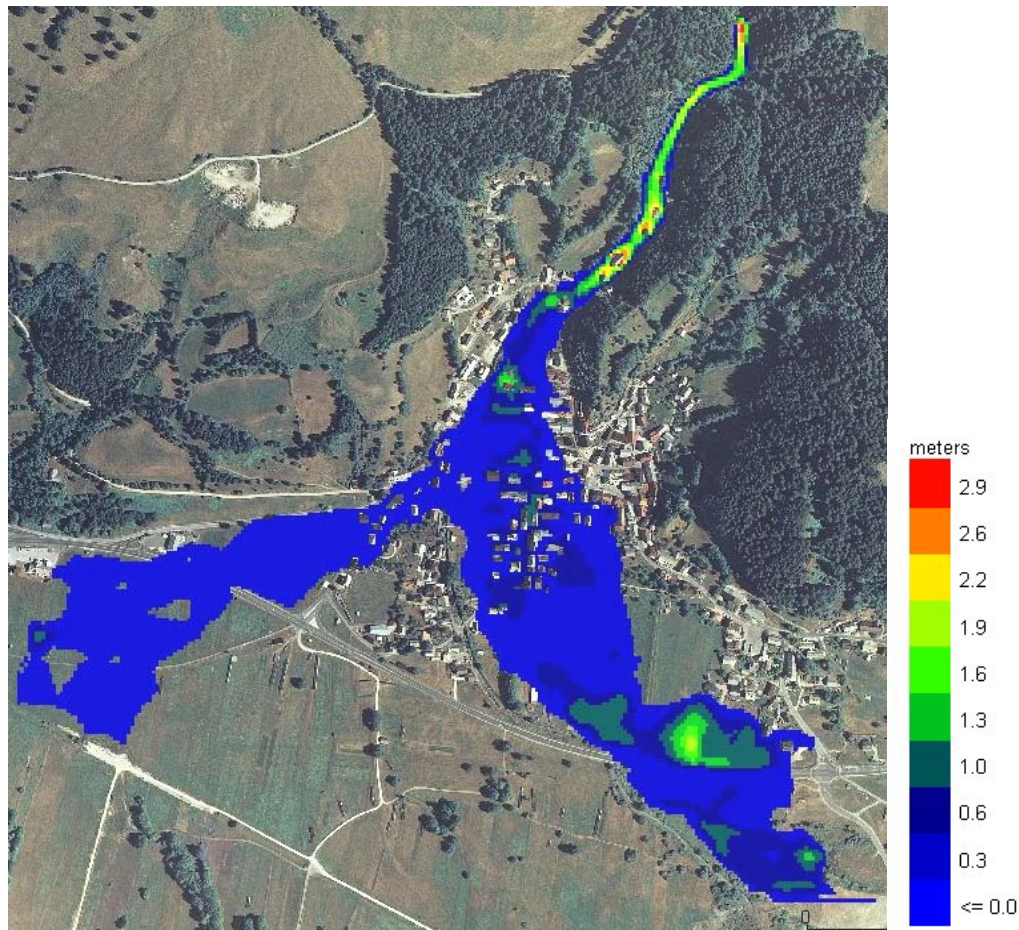
V nalogi je bil analiziran vpliv posameznih vhodnih podatkov oz. parametrov modela drobirskega toka v programu Flo-2D. Namen te analize je bil ugotoviti, koliko na rezultate modela vpliva posamezen parameter in predvsem to, kako uporabni so javno dostopni podatki (podatki o terenu DMV in podatki o padavinah). Cilj naloge je bil ugotoviti do katere mere so rezultati modelov drobirskih tokov, izdelani z uporabo teh podatkov, uporabni za izdelavo podrobnejših kart nevarnosti. Izdelani in analizirani so bili modeli hudourniških in pobočno-hudourniških drobirskih tokov, ki imajo vsak svoje posebnosti in lastnosti. Te posebnosti vplivajo tako na izdelavo modelov, kot tudi na njihove rezultate.

7.1.2 Podatki o terenu DMV

Glavna prednost podatkov o terenu DMV je to, da so javno dostopni (Geodetska uprava RS) in to, da so na voljo za vso Slovenijo. Trenutno so na voljo podatki DMV25, DMV12,5 in DMV5, pri katerih so višine terena posnete na medsebojni razdalji 25, 12,5 oz. 5m. V tej nalogi so bili uporabljeni podatki DMV5, ki so najnovejši in najbolj natančni. Za celo Slovenijo je GURS te podatke izdelal oz. izdal poleti 2007.

Podatki DMV5 so bili izdelani avtomatsko in niso bili dodatno ročno obdelani. Slabost avtomatske izdelave je v tem, da so lahko kljub relativno natančnemu snemanju (5 m), določeni elementi površja, ki so za model drobirskega toka lahko zelo pomembni, slabo zajeti v podatkih. V našem primeru je to predvsem struga hudournika, ki ni dovolj natančno posneta. Prav tako so v podatkih opazni drugi vplivi, ki lahko prinesejo v model napake. To je predvsem netočen posnetek terena na vršaju, ki lahko v najslabšem primeru bistveno preusmeri gibanje toka, kar pa pomeni napako v rezultatih. Sicer pa je bila za glavno pomanjkljivost pri uporabljenih podatkih DMV5 ugotovljena slabo posneta struga hudournika. Ta problem je bil še posebej očiten v primeru vršaja hudournika Trebiža, kjer je voda zapustila strugo v zgornjem delu vršaja in se razlivala preko drugih površin, medtem, ko

je spodnji del struge ostal popolnoma suh. V nadaljevanju je prikazana slika modela vode na Trebiži, kjer se je pojavila težava z razlivanjem vode izven struge.

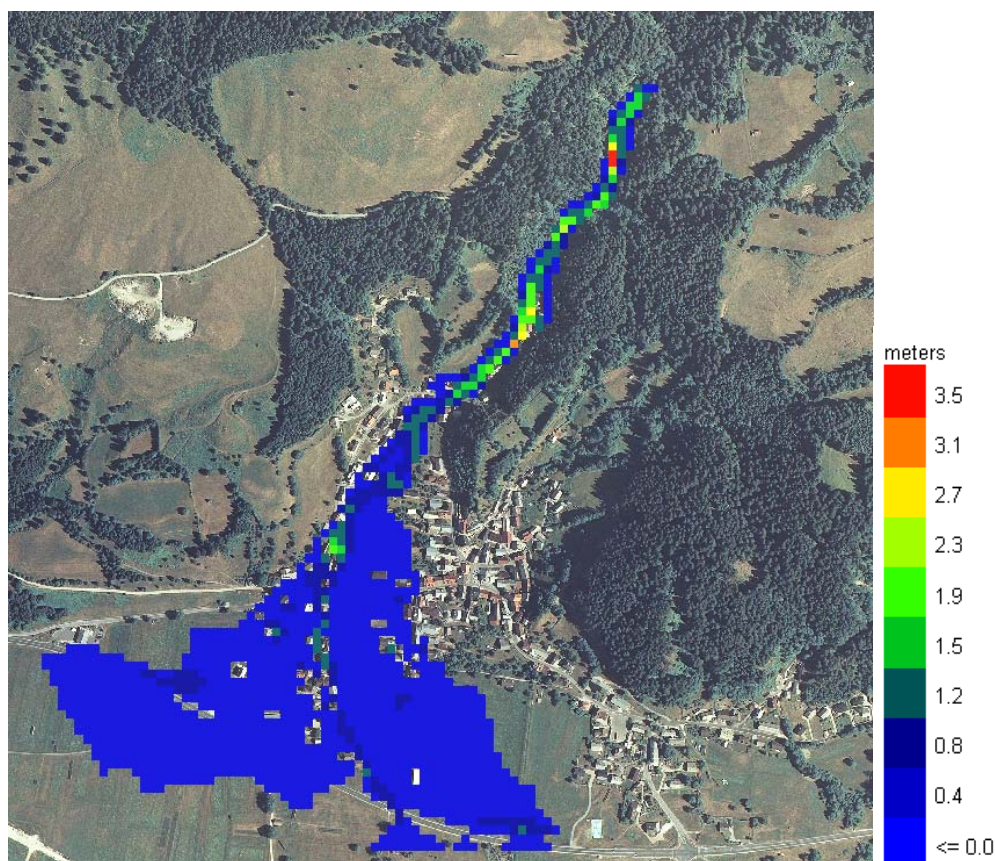


Slika 116: Model Trebiža, kjer se voda razliva izven struge že v zgornjem delu vršaja (voda, Q100, mreža 5x5) (Sodnik et al., 2009).

Fig. 116: Water spilling overbanks in the upper part of Trebiža fan (water, Q100, mreža 5x5).

Slika izračunanih globin (slika 116) kaže na to, da je očitno v podatkih DMV5 za območje vršaja hudournika Trebiža napaka in da je struga v zgornjem delu slabo posneta oz. je v podatkih sploh ni. Ob podrobnem pregledu območja, kjer se pojavlja napaka, je bilo ugotovljeno, da na tem odseku struga poteka po terenu, ki ima prečni naklon in je bil verjetno pri snemanju terena v podatke zajet samo teren, struga pa ne. Podobno se lahko zgodi pri premostitvah, kjer se lahko v podatkih most avtomatsko zajame kot dno struge, kar v podatkih pomeni pregrado v toku, ki lahko pomembno vpliva na rezultate modela, izdelanega z uporabo takih podatkov.

Na Trebiži je bil za primerjavo izdelan model z uporabo podatkov DMV 12,5, ki so sicer manj natančni, a so bili ročno obdelani in so zato lahko bolj pravilni od DMV5, vsaj kar se tiče elementov površja, kot so struge vodotokov, ceste in podobno.



Slika 117: Model Trebiže z uporabo podatkov DMV12,5 (voda, Q_{100} , mreža 12,5 x 12,5) (Sodnik et al., 2009).
Fig. 117: Trebiža model using DEM12,5 topographic data (water, Q_{100} , mreža 12,5 x 12,5).

Na zadnji sliki izračunanih globin (slika 117) je vidno, da v primeru uporabe podatkov DMV12,5 in uporabi mreže 12,5 m x 12,5 m voda teče po strugi čez celoten vršaj. To kaže na dejstvo, da je v podatkih DMV12,5 struga v zgornjem delu vršaja pravilno upoštevana oz. posneta. Toda kljub temu je mreža 12,5 m x 12,5 m preredka in so zato rezultati premalo natančni za končno uporabo. Natančnost je podobna kot pri mreži 15 m x 15 m, ki je bila v tej nalogi najpogosteje uporabljena pri analiziranju vpliva posameznih parametrov.

Na podlagi rezultatov te naloge lahko zaključim, da je vpliv geometrije na rezultate modela zelo velik in da lahko napaka v geometriji popolnoma spremeni rezultate. Napaka v primeru Trebiže kaže na to, da je potrebno pri vsakem modelu, v fazi testiranja, preveriti morebitne napake in jih po možnost odpraviti ali pa vsaj upoštevati pri interpretaciji rezultatov.

Kar se tiče natančnosti podatkov o terenu, je potrebno na tem mestu omeniti še zajem podatkov s tehnologijo LIDAR, ki omogoča bistveno bolj natančen zajem podatkov in njihovo obdelavo. Tehnologija LIDAR omogoča zajem podatkov tudi z resolucijo 1m, kar teoretično pomeni, da bi lahko vse modele izdelali z mrežo 1 m x 1 m. Taki podatki, če bi bili na voljo za celotno Slovenijo, bi pomenili velik korak naprej pri natančnosti in zanesljivosti rezultatov modelov, kakršni so prikazani v tej nalogi. Ob tem pa se je potrebno zavedati, da tako gosta mreža pomeni zelo dolge čase računanja, kar je že bilo omenjeno. Vnaprejšnja ocena časov z mrežo 2,5 m x 2,5 m ali celo 1 m x 1 m je zaradi delovanja modela, ki zagotavlja stabilnost računa s skrajševanjem računskega koraka, ni možna oz. bi bila netočna.

7.1.3 Podatki o padavinah in visokih vodah

V Sloveniji je razmeroma gosta mreža dežemernih postaj, ki jih upravlja Agencija RS za okolje. Na podlagi meritev in obdelave teh podatkov o padavinah Inštitut za vode RS (bivši Vodnogospodarski inštitut VGI) izdeluje hidrološke študije posameznih povodij, ki so bile uporabljene tudi v tej nalogi (VGI, 1995). Zanesljivost teh podatkov je dobra in se uporablja v vodnogospodarskem načrtovanju in projektiranju, zato je uporaba teh podatkov pri ocenjevanju nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov povsem na mestu.

Pri uporabi hidroloških podatkov je pomembna samo odločitev glede povratne dobe dogodka, na katerega računamo pri ocenjevanju nevarnosti. V vodnogospodarski praksi se ukrepe in ureditve najpogosteje dimenzionira na dogodke s 100-letno povratno dobo. Tudi Pravilnik o metodologiji za določanje ogroženih območij zaradi poplav in erozije (UL RS 60/2007) pri določanju razredov poplavne in erozijske nevarnosti za merilo predpisuje dogodke s 100-letno povratno dobo. Tudi v tej nalogi so bili hudourniški drobirski tokovi modelirani na osnovi visokih voda s 100-letno povratno dobo. Več o izbirah magnitud dogodkov in vplivu tega parametra na rezultate je napisano v poglavju 7.1.4.7.

7.1.4 Ostali parametri in vhodni podatki modela

7.1.4.1 Nastavitve kontrolnih parametrov modela

V nalogi je na seriji modelov prikazano, da je možno z nastavitvami kontrolnih parametrov v programu privarčevati na času izračuna brez izgube natančnosti ali stabilnosti izračuna. To je

pomemben podatek, saj so razlike v časih izračuna tudi 50% in več. Najbolj pomembno pa je, da na račun skrajševanja računskega časa ne izgubljam na točnosti in stabilnosti računov.

7.1.4.2 Pozicija vhodnega hidrograma

Pozicija hidrograma na računski mreži se je izkazala za manj pomemben faktor, kar je zelo pozitivno. To pomeni, da lahko mrežo izberemo optimalno na območju, kjer nas zanimajo rezultati in je ni potrebno podaljševati v zaledje, s čimer se povečuje število računskih celic in s tem čas računanja. Do enakih zaključkov smo prišli tako pri hudourniških kot tudi pobočno-hudourniških drobirskih tokovih.

7.1.4.3 Manningov koeficient hrapavosti n_g

Manningov koeficient hrapavosti n_g se ponavadi pri modeliranju drobirskih tokov umerja. Ker pa smo v tej nalogi uporabljali matematični model za ocenjevanje nevarnosti na hudournikih, kjer drobirski tokovi v bližnji preteklosti niso bili zabeleženi in ne obstajajo zgodovinski zapisi o magnitudi, dosegu ali čem podobnem, umerjanje modelov ni bilo mogoče. Zato je bilo iz literature in na podlagi dosedanjih izkušenj izbranih nekaj kombinacij različnih vrednosti koeficientov n_g , na katerih je bil testiran vpliv tega parametra na rezultate modela. Vpliv koeficienta n_g se je izkazal za pomembnega in je zato potrebno izbrati vrednosti posvetiti veliko pozornosti. Vpliv koeficienta n_g se je izkazal za večjega pri manjših globinah, kjer so, relativno gledano, spremembe večje. Posebnosti določanja koeficientov n_g pri modeliranju pobočno-hudourniških drobirskih tokov so podrobneje opisane v poglavju o zaključkih pri modeliranju pobočno-hudourniških drobirskih tokov.

7.1.4.4 Izbor velikosti računske celice

Velikost računskih celic pomembno vpliva tako na natančnost rezultatov, kot na čas računanja. V tej nalogi je opravljena primerjava mreže 5 m x 5 m in mreže 15 m x 15 m. Z uporabo mreže 15 m x 15 m je bila opravljena večina testiranj vpliva parametrov modela. Razmerje v času računanja je pri mreži 15 m x 15 m enako 240:1, medtem ko je pri mreži 5 m x 5 m to razmerje od 1:2 do 1:3. To pomeni, da račun 20 h dogodka traja pri mreži 15 m x 15 m na sodobnem računalniku (Core2Duo 3,0 GHz) okrog 5 minut, pri mreži 5 m x 5 m pa 40 do 60 ur. Razlika v časih računanja je zelo velika, zato je optimalen izbor velikosti računskih celic zelo pomemben. Razlika pa je tudi v natančnosti računov in rezultatov. Pri mreži 5 m x 5

m je boljše zajeta topografija terena, bolj natančni so izračuni na robu poplavljenih območij, bolj natančno se da simulirati vpliv objektov v toku, predvsem pa so boljše zajeti lokalni pojavi zaradi ovir v toku. Zaključek v tej nalogi je bil, da je mreža 15 m x 15 m uporabna za prve ocene in testiranje vpliva različnih parametrov, za končne račune pa je zagotovo boljše gostejša mreža, v našem primeru 5 m x 5 m. Gostejša mreža boljše posnema realni potek terena in zato omogoča bolj natančne rezultate. Je pa potrebno biti pri manjših računskih celicah pozoren na vnos vhodnega hidrograma. Pri večjih pretokih ga je potrebno razdeliti na več celic in s tem preprečiti previsoke hitrosti, ki so posledica premajhne skupne površine vhodnih celic. Več o tem je napisano tudi v poglavju o zaključkih glede modeliranja pobočno-hudourniških drobirskih tokov, pri katerih je to, zaradi velikih pretokov, še posebej pomembno.

7.1.4.5 Način modeliranja objektov na vršaju

Objekti na vršaju so lahko pomemben faktor pri gibanju toka, odvisno od gostote poselitve. Ker so prav hiše in prebivalci tisti, zaradi katerih se izvajajo študije nevarnosti in ogroženosti, je pomembno, da se vpliv objektov korektno upošteva. V preteklih primerih modeliranja je bila največkrat uporabljena možnost, ko se vpliv poselitve upošteva s povečanim koeficientom hrapavosti n_g . V tej nalogi pa je bila testirana tudi možnost uporabe funkcije blokiranih celic (ang. blocked cell), s katero se določene celice označi za blokirane oz. suhe, kar pomeni, da model v njih ne računa toka. Ta možnost se je izkazala za najugodnejšo, saj najboljše ponazori lokalne pojave toka ob objektih kot so lokalni pospeški in zaježitve. Izkazalo se je tudi, da je ta funkcija najbolj uporabna v kombinaciji z manjšimi računskimi celicami, saj je pri velikih težko posneti objekte na način, da v modelu še ne povzročamo situacij, ki jih v naravi ni. Npr. pasovno oviro (več objektov v vrsti), skozi katero ni pretoka, čeprav je v naravi tok med objekti mogoč in lahko pomembno vpliva na površine, kjer se razliva modeliran tok.

7.1.4.6 Reološki parametri mešanice (strižna trdnost in viskoznost)

Reološka parametra, strižna trdnost τ in viskoznost η , sta najtežje določljiva. V ta namen so bili na obravnavanih hudournikih izvedeni sondažni izkopi, kjer naj bi iz vzorcev v laboratoriju določili oba reološka parametra. Vendar se je izkazalo, da so vzorci neprimerni, ker so to odkladnine in bi bilo potrebno za potencialne drobirske tokove vzeti vzorce iz

zaledja, poleg tega pa v Sloveniji zaenkrat ni primernih naprav, ki bi omogočale potrebne meritve. Zato so bile v večini primerov modelov uporabljene karakteristike, ki so bile umerjene za primer drobirskega toka v Logu pod Mangartom. Izvedena pa je bila tudi primerjava modelov, kjer so bile izbrane mejne kombinacije reoloških parametrov τ in η iz literature (O'Brien, 2006), s čimer sem želel pokazati vpliv reologije na rezultate modela. Pri analizi rezultatov se je izkazalo, da je vpliv reoloških parametrov relativno majhen, posebej pri modelu z mrežo 15 m x 15 m. Pri izbrani volumski koncentraciji C_v so bili izdelani 4 modeli s kombinacijami minimalnih in maksimalnih vrednosti. Izkazalo se je, da je pri modelih z mrežo 15 m x 15 m razlika samo med skupinami modelov z različnimi koncentracijami C_v . Koncentracija C_v pa je tisti faktor, ki pri izbranem hidrogramu vode določa magnitudo dogodka in maksimalni pretok. Dodatno so bili za primerjavo izdelani modeli, z nerealno visokimi vrednostmi parametrov τ in η , pri katerih se je pokazalo, da ima vpliv na rezultate samo viskoznost η . Viskoznost najbolj vpliva na hitrosti toka. Ugotovitev, da je vpliv reologije na rezultate modela majhen, je vzpodbudna. Ta ugotovitev kaže na to, da je pri ocenah nevarnosti z natančnostjo, ki je zagotovljena z vhodnimi podatki, uporabljenimi v tej nalogi, najbolj pomemben vpliv magnitude dogodka. Magnituda je lažje določljiva, oziroma bi morala biti, podobno kot pri poplavah in eroziji, določena s predpisom. Reologija mešanice potencialnega drobirskega toka je težko, če že ne nemogoče določljiva. Poleg tega so reološke značilnosti odvisne od sestave oz. granulacije drobirja. Če je material bolj grob, prevladujejo strižne napetosti, če pa je večji delež finih delcev, ima večji vpliv viskoznost.

Na podlagi teh ugotovitev lahko zaključimo, da imajo ostali vhodni podatki, predvsem geometrija terena in magnituda drobirskega toka, veliko večji vpliv od reologije. To pomeni, da lahko za prve podrobnejše ocene nevarnosti uporabimo povprečne vrednosti parametrov τ in η za izbrano volumsko koncentracijo C_v .

7.1.4.7 Magnituda

Magnituda je tisti parameter, ki poleg geometrije najbolj vpliva na rezultate in pogojuje največje globine in hitrosti drobirskega toka na obravnavanem vršaju in s tem tudi nevarnost in ogroženost območja. V tej nalogi so obravnavani hudourniški in pobočno-hudourniški drobirski tokovi, njihove magnitude pa so bile določene na različne načine.

Pri hudourniških drobirskih tokovih je osnova hidrogram vode s 100-letno povratno dobo, kateremu je dodan sediment. Količina sedimenta je odvisna od podane volumske koncentracije C_v . Hidrogram s 100-letno povratno dobo je bil uporabljen zato, ker tudi Pravilnik o metodologiji za določanje ogroženih območij zaradi poplav in erozije (UL RS 60/2007) za merilo postavlja dogodke s 100-letno povratno dobo. Za drobirske tokove to pomeni, da bi bilo, poleg povratne dobe, potrebno predpisati še količino sedimenta oz. volumsko koncentracijo, s čimer bi bila na vsakem hudourniku definirana tudi magnituda potencialnega dogodka.

Določanje magnitude je veliko bolj zapleteno pri pobočno-hudourniških drobirskih tokovih, kjer je magnituda v veliki meri odvisna od plazov, usadov in podorov v zaledju. V tej nalogi so bili pri pobočno-hudourniških drobirskih tokovih izbrani trije potencialni dogodki, na katerih je bilo testirano delovanje modela in morebitne posebnosti. Več o teh posebnostih in težavah pri modeliranju pobočno-hudourniških drobirskih tokov je napisano v poglavju 7.1.5.

Če povzamem, določanje magnitude pri pobočno-hudourniških drobirskih tokovih je bolj zapleteno kot pri hudourniških, predvsem pa je zelo specifično za vsako hudourniško območje. Za določanje magnitude bi morali iz predhodne ocene ali opozorilne karte izbrati območja, kjer je potrebno detajlno geološko kartiranje zaledja in na podlagi katerega bi lahko okvirno določili potencialne scenarije pobočno-hudourniških drobirskih tokov.

7.1.5 Modeliranje pobočno-hudourniških drobirskih tokov

Pri modeliranju pobočno-hudourniških drobirskih tokov, kjer so maksimalni pretoki bistveno večji kot pri hudourniških drobirskih tokovih, so se pojavile določene posebnosti oz. težave v primerjavi s hudourniškiimi. Hitrosti toka na vršaju so bile previsoke v primerjavi z dosedanjimi izkušnjami in glede na podatke o hitrostih drobirskih tokov v literaturi. Preizkušenih je bilo več možnosti nastavitvev v programu, s katerimi bi dosegli bolj realne rezultate. Eden od zaključkov je bil, da je pri modeliranju pobočno-hudourniških drobirskih tokov bolje uporabljati mrežo s konstantnim koeficientom hrapavosti n_g , saj se je na primeru vršaja hudournika Bela izkazalo, da je lahko kombinacija lastnosti terena in vrednosti koeficientov hrapavosti n_g razlog za napačne rezultate modela. Temu v prid govori tudi ugotovitev, da je vpliv koeficientov hrapavosti pri večjih globinah, relativno gledano, manjši

kot pri majhnih globinah. Pomembna ugotovitev je tudi, da je potrebno pri večjih pretokih vhodni hidrogram razdeliti v več celic in s tem preprečiti nestabilnost oz. prevelike hitrosti na vhodnem delu računske mreže. To je še posebej pomembno pri modelu z manjšimi računskimi celicami. Pri modeliranju pobočno-hudourniških drobirskih tokov sicer ostaja največja neznanka scenarij oz. magnituda dogodka, o čemer je bilo več napisanega v prejšnjem poglavju. In ravno magnituda oz. količina sproščenega materiala je tisti parameter, ki zelo pomembno vpliva na globine in hitrosti drobirskega toka na vršaju.

Torej lahko glede pobočno-hudourniških tokov zaključim sledeče. Z določenimi spremembami v primerjavi s hudourniški tokovi, jih je možno dobro simulirati z matematičnim modelom, vendar je brez dodatnih raziskav zaledja oz. podrobnega geološkega kartiranja določanje magnitude takega dogodka vse prej kot točno.

7.2 Delovanje in uporabnost modela Flo-2D

7.2.1 Uvod

V tej nalogi je bil uporabljen komercialni 2D matematični model Flo-2D. Program je kupila FGG-UL, za potrebe Katedre za splošno hidrotehniko in Katedre za mehaniko tekočin z laboratorijem. Program je sicer zelo obsežen in omogoča modeliranje več stvari, med drugim pa vsebuje tudi modul za modeliranje blatnih in drobirskih tokov. Sicer je bil ta model že večkrat uspešno uporabljen za modeliranje drobirskih tokov v tujini in v Sloveniji (Hojnik et al., 2001; Hojnik, 2004; Mikoš et al., 2006). V tej nalogi je bil namen preveriti možnosti kombinacije uporabe modela Flo-2D in javno dostopnih podatkov pri izdelavi podrobnejših kart nevarnosti, katerih v Sloveniji še ni, niti ni predpisana metodologija njihove izdelave.

V nadaljevanju bodo napisane moje izkušnje z delovanjem modela, ki sem si jih pridobil med dveletno uporabo. Napisane izkušnje in kritike modela so moje izkušnje in so napisane predvsem z namenom, da bi tisti, ki bodo še uporabljali ta model, lažje in hitreje napredovali z delom. Povedati je potrebno tudi to, da je bilo naše delo z modelom Flo-2D omejeno zgolj na določen del tega programa in so zato tudi mnenja in zaključki napisani v tem smislu.

7.2.2 Izdelava modela

Program Flo-2D je uporabniku prijazen (ang. user-friendly) program. S pomočjo navodil in primerov modelov je izdelava novega modela, kljub nepoznavanju modela od prej, razmeroma preprosta. Delovanje programa je relativno hitro in stabilno (ne »zmrzuje«).

Vmesnik GDS je uporaben in pregleden ter omogoča vnos skoraj vseh vhodnih podatkov. Težava nastane pri vnosu podatkov za drobirski tok, kjer je treba hidrogram obdelati v GUI, kjer pa niso vidni ostali geometrijski podatki modela. To je težava, ki zmanjšuje preglednost in hitrost dela. Sicer je GDS zelo pregleden, saj program omogoča, da se za ozadje uporabi ortofoto posnetek DOF, ki služi za boljšo orientacijo in kasneje tudi za predstavitev rezultatov. Več o možnostih obdelave rezultatov je napisano v poglavju 7.2.3.

Slabosti oz. pomanjkljivosti sem opazil tudi pri vnosu koeficientov hrapavosti n_g , kjer program sicer omogoča, da se izbere večja skupina celic, katerim se hkrati predpiše določena vrednost. Težava nastane pri spreminjanju teh vrednosti. Ponovno je potrebno izbrati iste celice, kar pa je pri velikem številu celic praktično nemogoče narediti. Tako vedno ostane dilema, ali smo določili vse celice, kjer je npr. gozd, ali smo del teh celic izpustili in jim pustili »napačno« vrednost koeficienta n_g . Ta težava se pokaže v primerih, kjer recimo testiramo vpliv različnih koeficientov na rezultate. Za rešitev teh težav bi bil priročen vmesnik, kjer bi programu predpisal, naj npr. vsem celicam na računski mreži z vrednostjo koeficienta 0,03 določi vrednost 0,05.

Sicer je zelo uporabno, da program zapisuje model po komponentah in je tako možno pri izdelavi novega modela od prejšnjega uvoziti npr. hidrogram ali reološke podatke in s tem prihraniti čas s ponovnim vnašanjem vseh vrednosti.

Časi računov modelov so pri manjših računskih celicah razmeroma dolgi. Sicer avtor programa priporoča velikosti celic od 10 pa do 150 m, kjer so časovni koraki med 0,1 in 30 s. Priporočena velikost celic kaže na to, da je program namenjen predvsem simuliranju dogodkov na večjih površinah. Sicer manjša mreža kot so priporočene ne pomeni za samo delovanje modela ničesar, samo časi računanja se zelo podaljšajo. Pri mreži 5 m x 5 m in

skupnem številu celic 22.000 je časovni korak 0,01 ali celo krajši. Avtor sicer opozori da lahko pri modelih s številom celic, večjim od 100.000, računi trajajo več dni. Nam se je to dogajalo že pri približno 5x manjšem številu celic. Glede na to, da je bil za naše izračune uporabljen leta 2007 kupljen state-of-the-art osebni računalnik (Core2Duo 3,0 GHz procesor) bi osebno pričakoval krajše čase računanja.

7.2.3 Prikaz in obdelava rezultatov

Za prikaze in obdelavo rezultatov je v Flo-2D namenjen vmesnik MAPPER. V tem vmesniku je možen prikaz rezultatov na DOF podlagi. Na ta način je prikazanih tudi večina rezultatov v tej nalogi. Pri tem prikazu je težava v barvni skali, ki ponazarja 10 razredov globin ali hitrosti. Program avtomatsko skalo razdeli v 10 razredov od vrednosti 0 pa do največje izračunane vrednosti. To pa pomeni težave pri primerjavi rezultatov večih modelov, saj isti barvi na dveh slikah ne pomenita istih hitrosti. To težavo je možno rešiti, če pred prikazom rezultatov v tekstualnih izhodnih datotekah ročno vneseš rezultat v eno od celic. Na ta način lahko pri vseh modelih ročno vneseš hitrost ali globino, ki je večja od vseh izračunanih maksimalnih vrednosti. MAPPER nato barvno skalo hitrosti ali globin naredi pri vseh primerjanih modelih od 0 pa do maksimalne vrednosti, ki je, po ročnem popravku, pri vseh modelih ista. Tako celico sem izbral na robu računske mreže, da ni vplivala na sliko rezultatov.

Za izris prečnih prerezov je v MAPPER-ju na voljo funkcija, s katero uporabnik izbere dve točki na računski mreži, med katerima potem program izriše prečni prerez s površino terena in maksimalno gladino. Program razdaljo med izbranimi točkama razdeli na 30 odsekov in na teh razdelitvenih točkah izpiše višino površine terena in globino toka. Vrednosti ne odčitava v središčih računskih celic, ki so v osi izbranega prereza, ampak v točkah, kjer je izbrana delitev na prej omenjenih 30 odsekov. To pomeni, da je otežena primerjava rezultatov več modelov v enem prerezu. Za primerjavo je potrebno rezultate obdelati v drugem programu, saj Flo-2D tega ne omogoča. V tej nalogi je bil uporabljen MS Excel. Pri več modelih z isto mrežo je pri natančnem izbiranju obeh mejnih točk prereza primerjava rezultatov še izvedljiva, medtem ko je pri dveh modelih z različnima mrežama to praktično nemogoče. Težava se pojavi že pri razdelitvi prereza na 30 delov, ki so zaradi izbora mejnih točk vsakič malenkost drugačni, različni pa so zato tudi odčitki višin terena. Zato je v prerezih, kjer je prikazana primerjava globin večih modelov, za teren upoštevan samo prvi odčitek, globine pa so upoštewane od

vsakega modela posebej. To pomeni pri prikazu primerjave globin v enem prerezu določeno napako. Iz istega razloga je primerjava dveh modelov z različnimi mrežami praktično nemogoča, saj so lahko že odčitki višin terena zelo različni. Zgodi se lahko, da je v enem primeru višina terena + globina toka nižja od višine terena v drugem modelu, čeprav je mišljeno, da je to primerjava v isti točki in razlike med višinami terena ne bi smelo biti. Na to napako poleg načina zajema prečnega prereza vpliva tudi zajem višin terena pri različnih gostotah računske mreže. Več o tem je napisano tudi v zaključkih glede vpliva velikosti računskih celic. Program bi moral omogočati vnaprej izbrati os računskih celic v katerih bi kasneje lahko primerjal rezultate večih modelov. Na ta način bi bil možen tudi izris vzdolžnega prereza struge hudournika, ki trenutno ni možen, saj lahko uporabnik izbere samo dve točki, struga pa je razgibana in bi za dober posnetek potrebovali precej več točk. V GDS-ju je sicer možnost da pred izračunom uporabnik izbere prečni prerez, v katerem bo po zaključku pregledal rezultate, ampak ta možnost je zopet omejena na ročen izbor točk v GDS-ju. Uporabnik mora ročno izbrati serijo točk, ki bodo upoštevane v prečnem prerezu. V tem prerezu program izračuna maksimalni pretok, maksimalno globino, pretok čez celoten prerez in hidrograme pretoka čez prerez in posamezne celice. Ti podatki omogočajo veliko obdelave podatkov za določen model, vendar primerjave med modeli ni možno oz. jo je težko narediti. Uporabnik je zopet omejen na večkratno ročno izbiranje serije celic, kar je pri modelih z gostejšo mrežo zelo težko izvedljivo.

Izmed obeh možnosti je bila v tej nalogi prva opcija, ki je bila tudi uporabljena, izbrana za boljšo. Optimalna pa bi bila varianta, ki bi bila kombinacija obeh opisanih možnosti.

MAPPER omogoča poleg prikaza izračunanih hitrosti in globin toka še prikaz udarne sile (N/m^2) (ang. impact force), pritiska (N/m^2) (ang. static pressure) in specifične energije (m) (ang. specific energy) v računskih celicah. Ne omogoča pa prikaza vrednosti globina x hitrost toka, ki je pogosto merilo za ocenjevanje ogroženosti. Za prikaz te vrednosti je potrebno izhodni datoteki, kjer so zapisane hitrosti in globine po celicah, izvoziti v drug program, izračunati produkt vrednosti in nato te vrednosti vnesti nazaj v izhodno datoteko, iz katere potem MAPPER izriše sliko rezultatov. To se lahko naredi v izhodni datoteki hitrosti ali globin.

Poleg zgoraj naštetih rezultatov pa ima MAPPER vdelan modul, ki omogoča izdelavo kart nevarnosti (ang. hazard maps). V tem modulu uporabnik določi meje treh razredov nevarnosti, ki so definirani s tremi vrednostmi maksimalnih hitrosti in maksimalnih vrednosti produkta $g \times h$. Več o tem bo napisanega v naslednjem poglavju, ki govori o možnostih uporabe rezultatov za pripravo podrobnejših kart nevarnosti.

7.3 Možnosti uporabe rezultatov za pripravo podrobnejših kart nevarnosti

7.3.1 Uvod

Kot je napisano že v uvodu naloge, je eden izmed ciljev priprava podrobnejših kart nevarnosti oz. ugotoviti, ali je možno omenjene karte pripraviti z javno dostopnimi podatki, ki so uporabljeni v tej nalogi. Najprej bo predstavljen način izdelave kart, ki ga omogoča v tej nalogi uporabljen program Flo-2D oz. vmesnik za prikaz rezultatov MAPPER. Nato pa je podan še predlog izdelave kart in ocena, ali je možno samo z uporabo javno dostopnih podatkov, uporabljenih v tej nalogi, izdelati karte nevarnosti. V tem delu bodo obdelani samo hudourniški drobirski tokovi, saj je določanje magnitude pobočno-hudourniških tokov in s tem enega glavnih parametrov modela, brez podrobnih ogledov zaledja praktično nemogoče in zato tudi izdelava kart na način oz. brez dodatnih raziskav, kot je prikazano v tej nalogi, ni mogoča. Vsaj z dovolj veliko zanesljivostjo ne. V nadaljevanju predstavljena možnost priprave kart nevarnosti za hudourniške tokove, je sicer primerna tudi za pobočno-hudourniške, a je osnovni prepogoj natančnejša določitev magnitude oz. scenarija dogodka.

7.3.2 Priprava kart nevarnosti v modelu Flo-2D

Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti (UL RS 2007), v nadaljevanju Pravilnik, predpisuje za določanje razredov nevarnosti določene mejne vrednosti globin in vrednosti produkta globine in hitrosti toka. Pri eroziji Pravilnik določa tudi meje pri debelini nanosov in globini erozije. Predpisane vrednosti za vodo s 100-letno povratno dobo so sledeče:

razred velike nevarnosti: globina $\geq 1,5$ m oz. globina * hitrost $\geq 1,5$ m²/s

<i>razred srednje nevarnosti:</i>	$0,5\text{m} \leq \text{globina} \leq 1,5 \text{ m}$ oz. $0,5 \text{ m}^2/\text{s} \leq \text{globina} * \text{hitrost} \leq 1,5 \text{ m}^2/\text{s}$
<i>razred preostale nevarnosti:</i>	$\text{globina} \leq 0,5 \text{ m}$ oz. $\text{globina} * \text{hitrost} \leq 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$
<i>razred zelo majhne nevarnosti.</i>	kjer je verjetnost nastanka poplav pogojena z izrednim dogodkom ali poružitvijo kakega objekta za zadrževanje voda

Tudi pri drobirskih tokovih je potrebno določiti omenjene mejne vrednosti. Te vrednosti pa bi morale biti nižje, ker ima drobirski tok večjo gostoto kot voda in zato tudi večjo rušilno moč pri enaki hitrosti. V pravilniku je za erozijsko nevarnost definirana tudi maksimalna debelina nanosov oz. maksimalna globina erozije. Debelina nanosov in globina erozije je pri drobirskih tokovih z modelom Flo-2D težko določljiva, saj model slabo pokaže odlaganje toka po zaustavitvi. Globina erozije pa z modelom ni določljiva, saj sta funkciji modeliranja drobirskih tokov in transporta sedimentov, ki omogoča prikaz erozije in odlaganja sedimentov, v modelu Flo-2D nezdružljivi. To pomeni, da je model drobirskega toka v programu Flo-2D model s fiksnim dnom. Poleg tega pa je pri drobirskih tokovih najbolj nevarna faza potovanja oz. gibanja, kjer so prisotne velike hitrosti toka, ki ima s tem veliko rušilno moč. Sama debelina končnega nanosa, ki je predpisana za erozijo, je zato za ocenjevanje nevarnosti manj pomembna.

Mejne vrednosti globin in vrednosti produkta hitrosti in globine bi morale biti za drobirske tokove, podobno kot za poplave, podane s predpisom.

V modelu Flo-2D oz. MAPPER-ju je možno pripraviti tudi karte nevarnosti (ang. hazard map). Za ta namen je vdelan vmesnik, kjer se definira mejne vrednosti posameznih razredov nevarnosti. Uporabnik lahko mejne vrednosti posameznih razredov določa poljubno, ena od možnosti pa je že predlagana s strani avtorjev in je narejena posebej za vodo in posebej za drobirski tok. Za vodo oz. poplave so predlagane naslednje mejne vrednosti:

<i>razred velike nevarnosti:</i>	$\text{globina} \geq 1,5 \text{ m}$ oz. $\text{globina} * \text{hitrost} \geq 1,5 \text{ m}^2/\text{s}$
<i>razred srednje nevarnosti:</i>	$\text{globina} \geq 0,5 \text{ m}$ oz. $\text{globina} * \text{hitrost} \geq 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$
<i>razred majhne nevarnosti:</i>	$\text{globina} \geq 0,1 \text{ m}$ oz. $\text{globina} * \text{hitrost} \geq 0,1 \text{ m}^2/\text{s}$

Za drobirske tokove so predlagane vrednosti manjše, nevarnost pa je razdeljena v samo dva razreda:

razred velike nevarnosti: globina ≥ 1 m oz. globina * hitrost ≥ 1 m²/s (rdeča)

razred majhne nevarnosti: globina $\geq 0,2$ m oz. globina * hitrost $\geq 0,2$ m²/s (oranžna)

V nadaljevanju je prikazan primer karte nevarnosti na vršaju hudournika Bela, pripravljene po kriterijih, predlaganih v modelu Flo-2D. Za pripravo karte je bil uporabljen model Bela20 s karakteristikami, ki so bile tekom analize izbrane za najbolj optimalne:

Mreža: 5 m x 5 m

Hidrogram: Q_{100} , $C_v = 0,42$

Koeficienti n_g : gozd 0,16 ms^{-1/3}; travnik 0,033 ms^{-1/3}; struga 0,13 ms^{-1/3};

površina med objekti 0,035 ms^{-1/3}

Reologija: $K = 2285$ (-); spec. teža sedimenta = 27.000 N/m³; $\tau = 20$ N/m²; $\eta = 10$ Pas



Slika 118: Karta nevarnosti pri modelu Bela20 (rdeča barva – velika nevarnost, oranžna barva - majhna nevarnost).

Fig. 118: Hazard map using results of Bela20 model (red –maximum hazard, orange – minimum hazard).

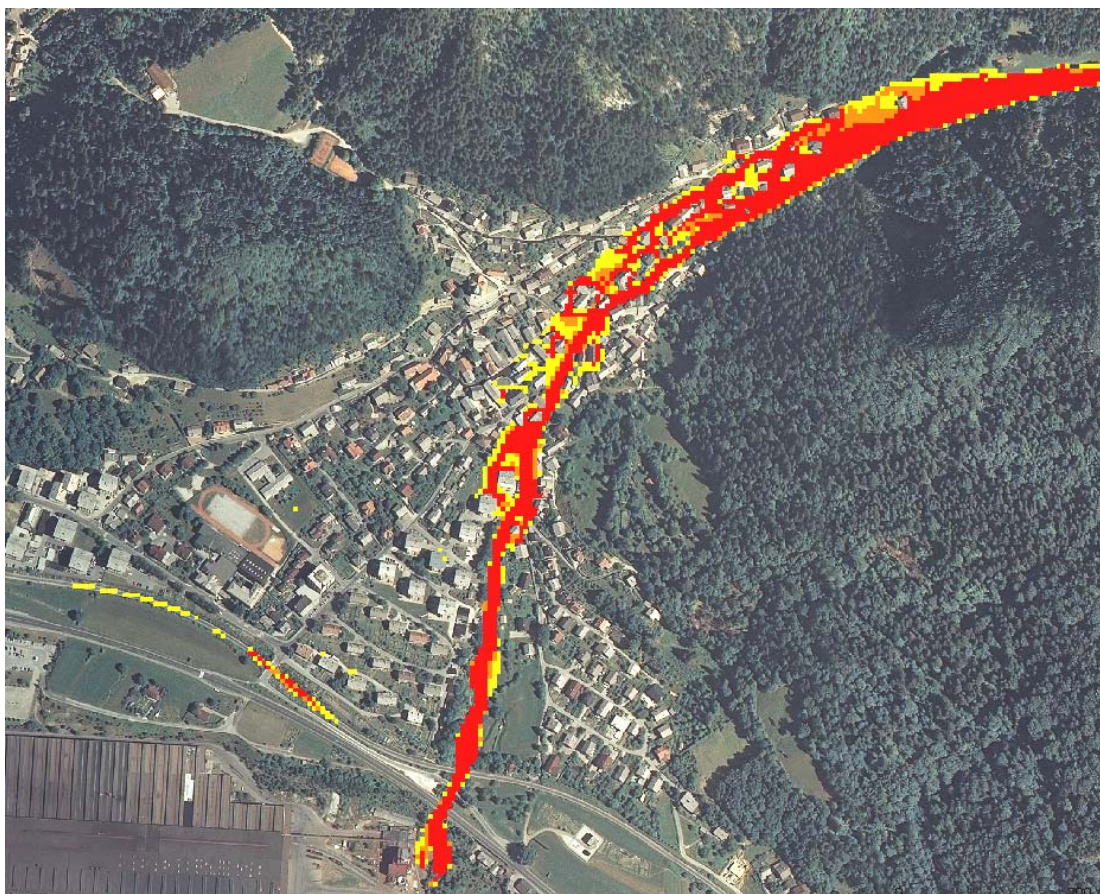
Na sliki 118 je razvidno, kako sta razdeljena razreda nevarnosti, katerih meje so predlagali avtorji programa Flo-2D.

Podan pa je še moj predlog, kjer je nevarnost razdeljena v tri razrede in sicer:

razred velike nevarnosti: globina $\geq 1,0$ m oz. globina * hitrost $\geq 1,0$ m²/s (rdeča)

razred srednje nevarnosti: globina $\geq 0,5$ m oz. globina * hitrost $\geq 0,5$ m²/s (oranžna)

razred majhne nevarnosti: globina $\geq 0,2$ m oz. globina * hitrost $\geq 0,2$ m²/s (rumena)

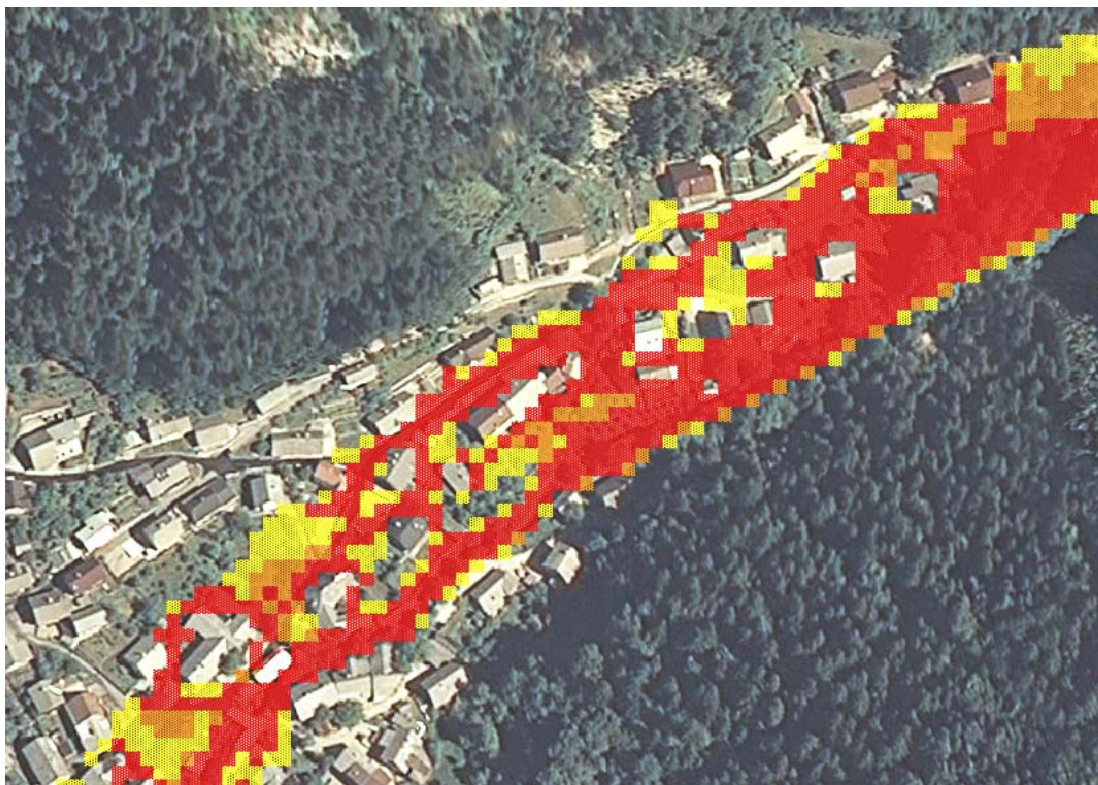


Slika 119: Karta nevarnosti pri modelu Bela20 (moj predlog razdelitve razredov: rdeča barva – velika nevarnost, oranžna barva- srednja nevarnost, rumena – majhna nevarnost).

Fig. 119: Hazard map using results of Bela20 model (my suggestion of classes: red – maximum hazard, orange – medium hazard, yellow - minimum hazard).

Prikazano je, da je možno s programom Flo-2D razmeroma enostavno pripraviti karte nevarnosti, saj ima model že vdolan vmesnik, potrebno je le definirati meje med razredi.

V nadaljevanju je prikazan še izsek iz zgornje karte (slika 120), ki prikazuje razrede na zgornjem delu vršaja, kjer je bila opravljena podrobnejša primerjava rezultatov že pri analizi vpliva posameznih parametrov modela.



Slika 120: Karta nevarnosti v zgornjem delu vršaja Bela (rdeča barva – velika nevarnost, oranžna barva- srednja nevarnost, rumena – majhna nevarnost).

Fig. 120: Hazard map on the upper part of Bela fan (red – maximum hazard, orange – medium hazard, yellow - minimum hazard).

7.3.3 Možnosti uporabe rezultatov modelov za pripravo kart nevarnosti

Pravilnik za poplave in erozijo predpisuje za karte nevarnosti merilo 1:5000 ali večje, kar pomeni, da morajo biti meje območij nevarnosti določene skoraj na meter natančno. Na tem mestu se pojavi vprašanje, ali je možno z javno dostopnimi podatki, uporabljenimi v tej nalogi, doseči to natančnost in tudi za drobirske tokove izdelati karto nevarnosti v merilu 1:5000.

Če pregledamo parametre, testirane v tej nalogi in upoštevamo zaključke, ki so bili povzeti po zaključku analiz vpliva teh parametrov na rezultate, lahko rečemo, da je za natančnost modela najbolj problematična geometrija na osnovi DMV5. Pri pobočno-hudourniških drobirskih tokovih pa tudi magnituda oz. določitev scenarija takega dogodka (količina materiala, maksimalni pretok, čas trajanja dogodka).

Visoke vode oz. hidrogram odtoka je možno dovolj natančno določiti, velikost računskih celic je možno prilagoditi zahtevani natančnosti rezultatov, za zajem vpliva objektov pa je bilo pokazano, da v modelu Flo-2D obstaja možnost, ki zelo dobro simulira vpliv objektov v toku. Reološka parametra strižna trdnost in viskoznost sta se izkazala za manj pomembna pri prvih ocenah nevarnosti in bi za željeno natančnost zadostovale neke povprečne vrednosti obeh parametrov. Te vrednosti je možno določiti na podlagi velikega števila zabeleženih in analiziranih tokov v literaturi. Manningove koeficiente hrapavosti za posamezne tipe površin je možno določiti na podlagi literature in preteklih izkušenj z modeliranjem drobirskih tokov.

Za magnitudo hudourniških drobirskih tokov, ki je pomemben parameter, bi moral biti sprejet predpis, ki bi določil, s kakšno povratno dobo mora biti upoštevan hidrogram in kakšna je kritična koncentracija sedimenta, dodana temu hidrogramu vode. S tema dvema podatkom bi bila določena magnituda, ki bi pomenila najslabši možni scenarij, za katerega bi bile pripravljene karte nevarnosti. Obstaja namreč realna možnost, da v strugi in zaledju sploh ni zadostne količine materiala za doseganje predpisane koncentracije sedimenta v drobirskem toku.

Največja težava je torej v avtomatsko izdelanih podatkih DMV5, ki so trenutno v Sloveniji sicer najnatančnejši podatki. V teh podatkih so lahko napake, ki lahko bistveno vplivajo na rezultate modela, kot se je pokazalo na primeru Trebiže, kjer je struga hudournika preslabo posneta. Na ostalih treh hudournikih, Suhlju, Presušniku in Beli podobnih težav ni bilo. Seveda pa se zavedamo, da geometrija struge tudi pri teh treh primerih ni posneta dovolj dobro. Omenjene težave z geometrijo pomenijo, da bi bilo potrebno pri izdelavi kart od primera do primera preverjati geometrijo in jo morebitno ročno popravljati, kar pa je lahko zelo zamudno in včasih celo neizvedljivo.

Poseben primer so še pobočno-hudourniški drobirski tokovi, kjer je potrebno za določitev magnitude potencialnega drobirskega toka opraviti še dodatne geološke raziskave hudourniškega območja, kjer bi podrobneje določili količine labilnega materiala, ki bi lahko bil začetek drobirskega toka.

Na koncu lahko zaključim, da je uporaba modela Flo-2D in javno dostopnih podatkov vsekakor ugodna in dobra rešitev za izdelavo podrobnejših kart nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov, vendar je potrebno upoštevati pomanjkljivosti geometrijskih podatkov DMV5. Upravičeno je pričakovati, da bodo v prihodnje podatki o terenu oz. njihova natančnost napredovala, kar pomeni, da bo tudi izdelava kart brez posebnih sprememb geometrijskih podatkov lahko dovolj natančna.

7.4 Napotki za nadaljnje delo

Kot se je izkazalo v tej nalogi, je v prihodnje potrebno pridobiti ali izdelati predvsem boljše podatke o terenu, ki so trenutno najšibkejši člen modela potencialnega drobirskega toka. Možnosti za rešitev tega problema je več.

Prva je, da se podatke DMV5, podobno kot DMV12,5, ročno obdela in odpravi nepravilnosti, ki se pojavljajo in zmanjšujejo natančnost modela. Ta rešitev bi bila dobra, saj je sicer mreža 5 m x 5 m dovolj natančna tudi za izdelavo podrobnejših kart nevarnosti.

Druga možnost je, da se na vršajih struga dodatno posname in se doda v model še element struge. To bi pomenilo najnatančnejše rezultate modela na območju struge. Vendar ta rešitev terja veliko terenskega dela, ki pa pomeni veliko stroškov. Poleg tega pa bi tako natančno posneta struga zahtevala zelo gosto računsko mrežo, ki pa za izdelavo kart nevarnosti načeloma ni potrebna.

Tretja možnost pa je snemanje terena s tehnologijo LIDAR, ki je zelo natančna in je bila že večkrat uspešno uporabljena tudi pri matematičnem modeliranju vode (Rak et al., 2006; Četina in Krzyk, 2007a in 2007b), prav tako pa pri ostalih raziskavah: analiziranje velikih drobirskih tokov (Breien et al., 2008) in analiziranje pojavljanja zemeljskih plazov (Sato et al., 2007). S tehnologijo LIDAR je možno posneti teren z resolucijo 1 m in manj, kjer so višine posnete na nekaj decimetrov natančno. Ta možnost je verjetno najboljša, saj je na ta način še vedno mogoče drobirske tokove modelirati kot površinske tokove (ang. overland flow) s poljubno računsko mrežo, kot v tej nalogi. Uporabljen način je dovolj natančen in

omogoča pregledno analizo rezultatov ter izdelavo kart nevarnosti. S tehnologijo LIDAR je dovolj dobro posneta tudi struga in ni potrebno dodatno snemanje, poleg tega pa v modelu ni potrebna dodatna komponenta struge. Glede na napredek tehnologije in tudi nivoja prostorskega načrtovanja je upravičeno pričakovati, da bodo kmalu podatki LIDAR na voljo za celotno območje Slovenije. Ti podatki se konec koncev potrebujejo tako pri načrtovanju javne infrastrukture, prostorskem načrtovanju, prav tako pa bi bili podatki LIDAR zelo uporabni pri izdelavi kart nevarnosti zaradi poplav in erozije.

Druga stvar, ki bi morala biti prednostno obdelana v prihodnje, je geološko kartiranje hudourniških območij, kjer bi lahko označili in zabeležili potencialna mesta, kjer bi lahko nastali pobočni drobirski tokovi, ki bi nato kot pobočno-hudourniški ogrožali naselja na vršajih.

Predvsem pa je potrebno v Sloveniji podobno kot za poplave in erozijo sprejeti Pravilnik o metodologiji za določanje območij nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov, kjer bi bili natančno definirani robni pogoji oz. nekateri parametri, ki so bili v tej nalogi izbrani na podlagi izkušenj in literature. Na tem mestu imam v mislih predvsem povratno dobo izbranega hidrograma in volumsko koncentracijo sedimentov v drobirskem toku. Po predpisu o metodologiji določanja območij nevarnosti je potrebno podobno kot pri poplavah določiti še sistem ocenjevanja ranljivosti in na podlagi tega ogroženosti območij. Z ocenami ogroženosti območij bi lahko preprečili oz. vsaj omejili gradnjo na območjih delovanja drobirskih tokov, s čimer bi preprečili škodljivo delovanje tega pojava na človeška življenja in njihovo premoženje. Taka preventiva bi lahko preprečila veliko gmotne škode, ki nastane ob pojavljanju drobirskih tokov. Navedemo lahko samo primer poplav septembra 2007, ko je bilo gmotne škode za 81 milijonov € (Statistični urad RS). Te številke nazorno prikazujejo, kakšne so lahko posledice naravnih nesreč in koliko bi lahko država privarčevala ob ustreznih preventivnih ukrepih (karte nevarnosti in ogroženosti), ki bi privedli do omejevanja oz. prepovedi naseljevanja, na že naseljenih območjih pa ustrezne omilitvene ukrepe, ki bi zmanjšali škodljive posledice takih ekstremnih dogodkov.

8. POVZETEK

Raziskovanje drobirskih tokov in spoznavanje tega pojava je v zadnjem času v Sloveniji precej napredovalo. K temu so botrovali dogodki v bližnji preteklosti, ki so opozorili na to, da je pojav drobirskih tokov lahko zelo intenziven in povzroči veliko škode.

Del raziskovanja je tudi matematično modeliranje gibanja drobirskih tokov, ki so dvofazna nenevtonska tekočina. Tudi v Sloveniji je bilo matematično modeliranje že večkrat uporabljeno za analiziranje preteklih dogodkov in za napovedovanje posledic morebitne ponovitve dogodka na obravnavanih lokacijah.

V zadnjih letih je bila v Sloveniji sprejeta zakonodaja, ki predpisuje metodologijo za izdelavo kart zaradi delovanja voda in s tem povezanih poplav in erozije. V teh dokumentih so predpisane vrste kart, meje za razdelitev nevarnosti in ranljivosti na razrede in postopek določanja ogroženosti posameznih območij. Sprejeta je bila tudi uredba, ki omejuje posege in dejavnosti na ogroženih območjih zaradi poplav in erozije. Podobne zakonodaje, ki bi obravnavala drobirske tokove v Sloveniji, zaenkrat še ni, pretekli dogodki pa kažejo na to, da bo take vrste preventiva zagotovo potrebna. V nalogi je predlagan način izdelave opozorilnih kart in kart nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov. Za opozorilne karte je predlagana dodelava modela verjetnosti nastanka drobirskih tokov, razvitega v ciljnem raziskovalnem projektu »Ocena ogroženosti zaradi delovanja drobirskih tokov« in kombinacija le tega s klasifikacijo hudourniških vršajev. Za pripravo kart nevarnosti pa je predvidena uporaba matematičnega modela, ki je predpisan tudi pri izdelavi kart nevarnosti poplav in erozije. Pri pripravi kart zaradi delovanja drobirskih tokov so ti razdeljeni na hudourniške in pobočne, glede na način potovanja in ogrožanje hudourniškega vršaja.

V glavnem delu naloge je predstavljen matematični model Flo-2D, s katerim je možno modelirati blatne in drobirske tokove in je bil uspešno uporabljen tudi v Sloveniji. Glavna ideja je bila preveriti možnost uporabe javno dostopnih podatkov za izdelavo modela drobirskih tokov in ugotoviti, do kakšne mere so taki rezultati uporabni za izdelavo podrobnejših kart nevarnosti. Poudarek je na modeliranju hudourniških drobirskih tokov.

Bistvena razlika med dosedanjim modeliranjem in modeliranjem v tej nalogi je v tem, da je bilo pri modeliranju preteklih dogodkov možno umerjanje modela, medtem ko v našem primeru to ni bilo mogoče. Raziskava je bila izvedena na hudourniških vršajih Trebiže, Suhlja, Bele in Presušnika. V občutljivostni analizi je bil analiziran vpliv nastavitve kontrolnih parametrov modela, pozicije vhodnega hidrograma, Manningovega koeficienta hrapavosti n_g , velikosti računskih celic, različnih reoloških karakteristik in vpliv različnih načinov modeliranja objektov na hudourniških vršajih.

Za najmanj natančne so se izkazali vhodni podatki o geometriji terena, za kar so bili uporabljeni javno dostopni podatki DMV5. V teh podatkih je zaradi avtomatske izdelave lahko veliko nepravilnosti, ki lahko bistveno vplivajo na rezultate modela in s tem na natančnost končnih rezultatov. To se je najbolj očitno pokazalo na vršaju hudournika Trebiža. Ostali vhodni podatki so manj problematični, saj so dobro določljivi ali pa jih bo potrebno določiti z ustrežno zakonodajo, kot je npr. pri poplavah določena povratna doba visokih voda za določanje razredov nevarnosti in ogroženosti.

Od ostalih vhodnih parametrov je bil največji pomislek pri določanju reoloških karakteristik drobirskih tokov, za določitev katerih so potrebne podrobne geomehanske raziskave vzorcev, za katere pa v Sloveniji nimamo ustreznih naprav. Občutljivostna analiza različnih vrednosti reoloških karakteristik je pokazala, da je vpliv reoloških parametrov pri naši natančnosti modela zanemarljiv. Razlike v rezultatih modela so se pojavile šele pri ekstremnih in včasih nerealnih spremembah vrednosti. Ta ugotovitev je zelo pomembna, saj smo ugotovili, da je za ocenjevanje nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov veliko bolj kot reološke karakteristike pomembna magnituda dogodka.

Na koncu naloge je prikazana še možnost izdelave kart nevarnosti z vmesnikom v programu Flo-2D. Prikazani so različni izrisi kart nevarnosti, glede na mejne vrednosti posameznih razredov nevarnosti.

Na podlagi občutljivostne analize modela in analize rezultatov je bilo zaključeno, da je izdelava kart nevarnosti z uporabo javnih podatkov in matematičnega modeliranja možna, a so trenutno javno dostopni geometrijski podatki premalo natančni in ne omogočajo

modeliranja z zahtevano natančnostjo. Prihodnost je zagotovo v tehnologiji LIDAR, ki se uporablja v več panogah in bi pomenila velik napredek tudi pri matematičnem modeliranju drobirskih tokov.

Predvsem pa je potrebno, da se na področju drobirskih tokov sprejme podobna zakonodaja kot na področju poplav in erozije. V njej naj se definira povratne dobe in magnitude dogodkov ter ostale pomembne parametre, ki naj bodo upoštevani pri ocenjevanju nevarnosti. Prav tako je treba predpisati meje razredov nevarnosti in način določevanja ranljivosti zaradi delovanja drobirskih tokov. Tako bi lahko določili ogroženost območij in lahko na teh območjih omejili posege in dejavnosti ali pa vsaj predpisali potrebne omilitvene ukrepe.

9. SUMMARY

Lately, debris flow research and its comprehension in Slovenia have advanced greatly. This progress is the result of several debris flow events in the recent past that brought to our attention the fact that debris flow event can be very severe and therefore cause a lot of damage.

A part of the research is also the mathematical modeling of debris flow movement which was successfully applied in analyzing the past events and predicting the consequences of the possible recurrence of the event in the surveyed Slovenian torrential areas. Debris flows are two-phase and non-Newtonian fluids.

In the past years, the legislation on flooding and erosion hazard was passed. This legislation prescribes the preparation of different types of maps and standards for defining the classes of hazard, the vulnerability classes and risk classes. The restrictions for regional planning are defined for the established risk areas. So far no similar legislation dealing with debris flow hazard has been passed, but the recent events in Slovenia clearly show that precautions of this kind would be greatly needed to limit the damaging effects of such events. The protocol of preparing the preliminary hazard maps and hazard maps regarding the debris flow effects is proposed in this thesis. In this process, the debris flows are divided into torrential and slope debris flows, according to the type of transport and torrential fan threatening. The combination of the classification of torrential fans and the model of probability of triggering debris flows, evaluated in the targeted research project »Debris-flow risk assessment«, is suggested as a method for preparing the preliminary hazard maps. For the preparation of hazard maps, mathematical modeling is suggested. Mathematical modeling is also prescribed in the regulations about preparing the hazard maps regarding flooding and erosion processes.

Debris flow modeling with Flo-2D and its description is the main part of this thesis. The Flo-2D model enables mud and debris flow modeling and was also successfully applied in Slovenia. The main idea of the present research was to evaluate the possibility of using publicly available data in the combination with mathematical modeling in the process of

preparing debris flow maps and, most importantly, to evaluate to what extent these results could be used in preparing more detailed hazard maps. The emphasis is on modeling torrential debris flows. The main difference between our research and the past modeling is the lack of field data that did not enable us to calibrate the debris flow model. The alpine valley of Sava Dolinka River was selected as a test region for our research. In the sensitivity analysis of the Flo-2D model, the influence of different parameters was tested: the control parameters settings of the model, the position of the incoming hydrograph, the Manning roughness coefficient, the computational grid size, different rheological characteristics and the influence of different ways of modeling objects on alluvial fans.

The publicly available topographic data DEM5 turned out to be the main deficiency of all the input data used in the research. Due to the automatic derivation of DEM5 data, there can be a lot of flaws in the terrain representation. The latter has an extensive influence on the modeling results and therefore also on the final preciseness of the entire mathematical model. This is most evident in the case of the Trebiža fan, where the fluvial channel is not represented sufficiently.

Other input data are less problematic because they can be defined well enough to be efficient. A few of these data should also be defined in proper regulations, as is the case with the return period of flooding events for defining flood hazard.

Concerning the other input data, we mostly focused on the rheological characteristics of debris flows. Detailed geotechnical researches are necessary for defining these characteristics. The main problem is that Slovenia does not have an appropriate laboratory to provide such data. The sensitivity analysis of different values of rheological characteristics has, however, shown that the influence of these parameters is almost negligible for our model. The differences in the model results were only noted in the case of extreme or even irrational changes of the values. Based on this very important finding, we can conclude that the magnitude of the event is far more important than the rheological characteristics when evaluating the debris flow hazard.

The possibility of preparing hazard maps using the application in Flo-2D is demonstrated at the end of the thesis. Different variations of hazard maps are presented according to the various limiting levels of the hazard classes. Based on the sensitivity analysis and the evaluation of the modeling results we can conclude that it is possible to prepare hazard maps with publicly available data and mathematical modeling; however, the currently available topographic data DEM5 are not sufficiently exact and therefore do not enable modeling with the prescribed accuracy. The next step in modeling natural hazards such as debris flows will eventually be the application of even more precise topographic data, such as DEM 1 from laser scanning using the LIDAR technology.

Above all it is important to prepare and pass appropriate legislation regarding debris flow processes, similar to the flooding and erosion regulations. This legislation should determine the return periods, the magnitudes of events and other important parameters which should be considered in mathematical modeling and evaluating the debris flow hazard. The limiting values of hazard classes and vulnerability assessing should also be determined. In this way, the risk factor of different areas could be evaluated, the regional planning could be adjusted and the mitigation measures for already inhabited areas could be taken.

VIRI

- Breien, H., De Blasio, F.V., Elverhøi, A., Høeg, K. 2008. Erosion and morphology of a debris flow caused by a glacial lake outburst flood, Western Norway. *Landslides* 5-3, 271-280.,
- Ceriani, M., Crosta, G., Frattini, P., Quattrini, S. 2000. Evaluation of hydrological hazard on alluvial fans. *Zbornik mednarodnega simpozija INTERPRAEVENT 1984*, Villach, št. 2: 213-225
- Chow, V.T. 1959. *Open-Channel Hydraulics*. New York, Mc-Graw Hill.
- Costa, J.E. 1984. Physical geomorphology of debris flows. *Developments and Applications of Geomorphology*, Ed. J.E. Costa & P.J. Fleischer, p.p. 268-317
- CRP 2004. Metodologija za določanje območij in način razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti zaradi zemeljskih plazov, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo- KSH. Končno poročilo.
- CRP 2008. Ocena ogroženosti zaradi delovanja drobirskih tokov, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Geološki zavod RS, končno poročilo.
- Četina, M., Krzyk, M. (2007a). 2D modeliranje poplavnih valov na območju HE Brežice. UL Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 47 str.
- Četina, M., Krzyk, M. (2007b). 2D modeliranje poplavnih valov na območju HE Mokrice. UL Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 48 str.
- Fazarinc, R. 2002. Matematično modeliranje drobirskega toka v Logu pod Mangartom. – Magistrsko delo, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, oddelek za gradbeništvo, podiplomski študij gradbeništva, hidrotehnična smer.
- Hojnik, T. 2004. Dvodimenzijski matematični model drobirskih tokov na območju Koseča z oceno ogroženosti naselja Koseč zaradi njihovega delovanja. Mišičev vodarski dan 2004, Dvorana narodnega doma SNG Maribor, december 2004. Maribor.
- Hojnik, T., Četina, M., Krzyk, M., Rajar, R. 2001. 2D model drobirskega toka na območju Zgornjega in Spodnjega Loga. *Zbornik Mišičev vodarski dan 2001*, Dvorana narodnega doma SNG Maribor, december 2001. Maribor. str. 84-91.

- Jackson, L. E. Jr., Kostaschuk, R. A., Macdonald, G. M., 1987. Identification of debris flow hazard on alluvial fans in the Canadian Rocky Mountain. *Reviews in Engineering Geology*, 4: 115-124
- Jakob, M. 2005. A size classification for debris flows: (article in press). *Engineering geology*, Canada.
- Julien, P.Y. 2002. *River Mechanics*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Kronfellner-Krauss, G. 1984. Extreme sedimentations and Gullyings of Torrents: Zbornik mednarodnega simpozija INTERPRAEVENT 1984, Villach, št. 2, str. 109-118
- Majes, B., Petkovšek, A., Logar, J. 2002. Primerjava materialnih lastnosti drobirskih tokov iz plazov Stože, Slano blato in Strug, *Geologija*, št.45/2, str. 457-463.
- Melton, M. A., 1965. The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in Southern Arizona, *Journal of Geology* 73: 1 – 38.
- Mikoš, M. 2001. Značilnosti drobirskih tokov. *Ujma*, št. 14-15: 295-299
- Mikoš, M., Fazarinc, R., Majes, B., Rajar, R., Žagar, D., Krzyk, M., Hojnik, T., Četina, M. 2006. Numerical simulation of debris flows triggered from the Strug rock fall source area, W Slovenia, *Natural hazards and Earth System Sciences* 6: 261-270.
- Marchi, L., Pasuto, A. in Tecca, P. R. 1993. Flow processes on alluvial fans in the Eastern Italian Alps.
- Marchi, L. CNR IRPI Padova, in D'agostino, V. 2002. Estimation of debris-flow magnitude in the eastern Italian Alps: *Earth Surface Processes and Landforms*, št. 29: 207-220
- O'Brien, J.S. 2006. Users manual FLO-2D, version 2006.1.
- O'Brien, J.S., Julien, P.Y., Fullerton, W.T., 1993. Two dimensional water flood and mudflow simulation., *Journal of Hydraulic Engineering* 119: 244-261
- Petje, U. 2005. Analiza nevarnosti padajočega kamenja na cestah v alpskem prostoru. – Magistrsko delo, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, oddelek za gradbeništvo, podiplomski študij gradbeništva, hidrotehnična smer
- Petkovšek, A. 2002. Pomen geotehničnih raziskav pri preučevanju drobirskih tokov in prve slovenske izkušnje, *Gradbeni vestnik*, št.51, str.346-361.
- Rajar, R., Hojnik, T., Četina, M., Zakrajšek, M., Krzyk, M. 2001. Enodimenzijski model drobirskega toka na področju Loga pod Mangartom. Zbornik Mišičev vodarski dan 2001, Dvorana narodnega doma SNG Maribor, december 2001. Maribor. str. 92-101.

- Rak, G., Gosar, L., Steinman, F. 2006. Uporaba LIDAR podatkov v povezavi GIS in hidravličnega modela. Zbornik Mišičev vodarski dan 2006, Dvorana narodnega doma SNG Maribor, december 2006. Maribor. str. 108-114.
- Ribičič, M. 2001. Značilnosti drobirskega toka Stože pod Mangartom. Ujma, št. 14-15: 102-108.
- Ribičič, M. 2002. Zemeljski plazovi, usadi in podori: Nesreče in varstvo pred njimi. Urednik B. Ušeničnik, Uprava RS za zaščito in reševanje, Ministrstvo za obrambno, str. 260-266
- Sto, H.P., Yagi, H., Koari, M., Iwahashi, J., Sekiguchi, T. 2007. Airborne LIDAR Data Measurement and Landform Classification Mapping in Tomari-no-tai Landslide Area, Shirakami Mountains, Japan. In: Sassa, K., Fukuoka, H., Wanf, F., Wang, G. (eds.): Progress in Landslide Science, Poglavje 17, 237-249. Springer.
- Schnöberl, F., Stöttner, J., Sschönlaub, H., Ploner, A., Sösner, T., Jenewein, S., Rinderer, M. 2004. PROMAB^{GIS}: A GIS-based tool for estimatin runoff and sediment discharge in alpine catchment areas. Članek. Internationales Symposion INTERPRAEVENT 2004 – RIVA/TRIENT, zbornik št. 3: 271-282.
- Skaberne, D. 2001. Prispevek k slovenskemu izrazoslovju za pobočna premikanja. Ujma, št. 14-15. str. 454-485
- Sodnik, J. 2005. Metode za ocenjevanje ogroženosti z drobirskimi tokovi. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, oddelek za gradbeništvo, hidrotehnična smer
- Sodnik, J., Mikoš, M., 2006. Ocena magnitude drobirskih tokov v izbranih hudourniških območjih v Sloveniji. Acta geographica Slovenica 46-1: 93-123
- Sodnik, J., Mikoš, M. 2005. Ocenjevanje magnitude drobirskih tokov. Ljubljana. Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko.
- Sodnik, J., 2007. Drobirski tok nad Kropo, Slovenski vodar, št. 18, 53-55
- Sodnik, J., PETJE, U., Mikoš, M. 2009 Terrain topography and debris-flow modelling = Topografija površja in modeliranje gibanja drobirskih tokov. Geod. vest. 53,-2-: 271—297
- Takahashi, T. 1980. Debris flow on prismatic channels, Transactions ASCE, vol. 106, Journal of Hydraulic Division, pp. 381-396

Takei, A. 2002 Interdependence of sediment budget between individual torrents and river-system: Internationales Symposion INTERPRAEVENT 1984 – VILLACH, zbornik št. 2: 35-48.

Zakon o vodah (ZV-1), UL RS št. 67, 2002

Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti, UL RS št.60, 2007, str. 8375 - 8379

Uredba o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, UL RS št.89, 2008 , str 12205 - 12207

Direktiva Evropskega parlamenta in Sveta o ocenjevanju in obvladovanju poplav2007/60/ES, UL EU 288 / 2007

US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC-HMS, Tehnical Reference Manual. Marec 2000

US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC-HMS, User's Manual. Januar 2001

Določitev visokih vod z visokovodnimi valovi za potoka Brusnik in Ročica, Ljubljana:

Vodnogospodarski inštitut, 2002, številka 53-BA/02.

Koritnica: hidrološka študija. Ljubljana: Vodnogospodarski inštitut, 1993, številka C-160

Sava Dolinka: hidrološka študija. Ljubljana: Vodnogospodarski inštitut, 1995, številka C-159.