

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Vodarstvo in
komunalno inženirstvo

Kandidat:

Samo Kotnik

**Primerjava dvodimenzijskih programov
PCFLOW2D in FLO - 2D za račun drobirskih
tokov**

Diplomska naloga št.: 69

Mentor:
prof. dr. Matjaž Četina

Somentor:
asist. dr. Mario Krzyk

Ljubljana, 27. 10. 2006

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Vse poskuse, računalniško in statistično obdelavo sem opravil na UL Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem (KMTe), ki se nahaja na Hajdrihovi 28, 1000 Ljubljana.

Manjkajoče podatke za modeliranje in primerjavo je zagotovil g. Tomaž Hojnik iz VGB (Vodnogospodarski biro) Maribor d.d., Glavni trg 19c, 2000 Maribor.

Podpisani **SAMO KOTNIK** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
»PRIMERJAVA DVODIMENZIJSKIH MODELOV PCFLOW2D IN FLO-2D ZA RAČUN DROBIRSKIH TOKOV«.

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL, Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Kočevje, 13.10.2006

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 532.3/.5:556.535(043.2)
- Avtor:** Samo Kotnik
- Mentor:**izr. prof. dr. Matjaž Četina
- Somentor:** asist. dr. Mario Krzyk
- Naslov:** Primerjava dvodimenzionalnih modelov PCFLOW2D in FLO-2D za račun drobirskih tokov
- Obseg in oprema:** 58 str., 13 pregl., 5 sl., 26 en., 23 pril.
- Ključne besede:** drobirski tok, zemljinski zdrs, plaz, blatni tok, skalno padanje, Manningov koeficient, strižna napetost, mejna strižna trdnost, viskoznost, matematično modeliranje, PCFLOW2D, FLO-2D, Koseč

Izveleček:

Diplomsko delo obravnava primerjavo rezultatov dvodimenzionalnih matematičnih modelov PCFLOW2D in FLO – 2D na primeru drobirskega toka na območju vasi Koseč.

V uvodnem delu naloge so opisane glavne značilnosti drobirskih tokov, njihova klasifikacija, fizikalne in druge pomembne značilnosti ter način premikanja. V nadaljevanju sta predstavljena matematična modela PCFLOW2D in FLO - 2D, namenjena simulaciji gibanja tokov. Za vsakega posebej so podane najpomembnejše enačbe in vsi potrebni vhodni parametri, ki jih modela uporabljata pri izračunu. Nato je opisan dogodek pojava drobirskega toka na območju vasi Koseč in vzroki njegovega nastanka. Povzeti so tudi projekti, ki so bili za zavarovanje območja vasi Koseč že izvedeni. V njih so na osnovi strokovnih predlogov podane rešitve, kako bi z ureditvijo struge in s potrebnimi varovalnimi objekti preprečili oz. omilili škodo ob morebitni ponovitvi dogodka. Za vse dogovorjene ureditve so bile študije opravljene s pomočjo numeričnih simulacij z enodimenzijskim lastnim modelom PLAZ1D in dvodimenzijskim komercialnim modelom FLO-2D.

V nadaljevanju so bili računi izvršeni še z modelom PCFLOW2D in narejena primerjava ter analiza rezultatov, ki jih na izbranem odseku vasi Koseč podata modela PCFLOW2D in FLO – 2D. Modela kljub enakim vhodnim podatkom (relief, Manningov koeficient, mejna strižna trdnost, viskoznost...) dajeta nekoliko različne rezultate. V diplomski nalogi so razlike detajlov raziskane, analizirani in podani pa so tudi vzroki zanje.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 532.3/.5:556.535(043.2)
Author: Samo Kotnik
Supervisor: Assoc. Prof. Matjaž Četina, Ph.D.
Co-Supervisor: Asist. Mario Krzyk Ph.D.
Title: Comparison of two dimensional codes PCFLOW2D and FLO-2D for debris flow computations
Notes: 58 p., 13 tab., 5 fig., 26 eq., 23 charts
Key words: debris flow, landslide, slide, mudflow, rock fall, Manning's coefficient, shear stress, yield strength, viscosity, mathematical modelling, PCFLOW2D, FLO-2D, Koseč.

Abstract:

The graduation thesis treats the comparison of two two-dimensional mathematical models and the results produced on debris flow example. The models are known as PCFLOW2D and FLO – 2D and were used for debris flow simulations.

In the first part of the diploma work there are teoretical basis of a debris flow, its classification, physical and other important characteristics and features concerning its movement. Basic equations and input parameters of both models (PCFLOW2D and FLO-2D) that were used in calculations are given next. Further on, all data known up to now about the formation, causes and the consequences of the debris flow at the territory of Koseč are resumed. All the projects considering the problems of debris flows at the territory of Koseč that have already been finished are also descibed in this section. By using numerical simulations with one-dimensional domestic model PLAZ1D and two-dimensional comercial model FLO-2D, experts want to prevent or mitigate the damage that another debris flow might cause if it occures.

Additionally, the computations on the same landscape have been performed with the domestic two-dimensional model PCFLOW2D. The results of both models FLO-2D and PCFLOW2D are to some extent different although the same input data such as Manning's coefficient, yield strength, viscosity and others have been used. The main goal of this diploma work is to answer the questions why it comes to the differences between the two models and how big they are.

ZAHVALA

Za pomoč pri pripravi diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Matjažu Četini in gospodu univ. dipl. inž. gradb. Tomažu Hojniku. Hvala tudi vsem na Katedri za mehaniko tekočin z laboratorijem (UL FGG), ki so mi omogočili prijetno delovno ozračje.

Zahvalil bi se tudi staršema, ki sta mi vsa dolga leta študija nudila optimalne pogoje za študij in mi omogočila lepši jutri.

Da ne pozabim še stare mame, ki mi je vsak mesec pomagala odebeliti denarnico in vseh sošolcev, s katerimi smo prebili nepozabne študentske dni.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
2	SPLOŠNO O DROBIRSKIH TOKOVIH	4
2.1	Klasifikacija drobirskih tokov.....	4
2.2	Značilnosti drobirskega toka.....	4
2.2.1	Fizikalne značilnosti	4
2.3	Koncept gibanja trdnih delcev	7
2.3.1	Disperzivna napetost	7
2.3.2	Trdnost zmesi.....	7
2.3.3	Vzgon.....	7
2.4	Inverzna velikostna razvrstitev delcev	9
2.5	Viri drobirja.....	9
2.6	Sestava drobirskega toka.....	9
2.7	Prerez drobirskega toka.....	10
2.8	Odlaganje drobirskega toka	10
3	OPIS MODELOV FLO – 2D IN PCFLOW2D	12
3.1	Model FLO–2D.....	12
3.1.1	Splošni opis modela	12
3.1.2	Teoretične osnove modela	13
3.2	Model PCFLOW2D	17
3.2.1	Splošni opis modela	17
3.2.2	Teoretične osnove modela	17
4	PRIMERI RAČUNOV DROBIRSKEGA TOKA NA OBMOČJU KOSEČA.....	19
4.1	Opis pojava	19
4.2	Realizirani projekti na področju Koseča.....	23
4.2.1	Izdelava enodimenzijskega matematičnega modela drobirskih tokov od plazu Strug do naselja Ladre in izdelava ocene prevodnosti urejene struge Brusnika v Koseču za drobirske tokove.....	23

4.2.1.1	Vsebina projekta	23
4.2.1.2	Dobljeni rezultati pri projektu	24
4.2.2	Dvodimenzijski matematični model drobirskih tokov na območju Koseča z oceno ogroženosti naselja Koseč zaradi njihovega delovanja	25
4.2.2.1	Vsebina projekta	25
4.2.2.2	Dobljeni rezultati pri projektu	26
5	PRIMERJAVA IN ANALIZA REZULTATOV PROGRAMOV PCFLOW2D in FLO-2D NA OBMOČJU VASI KOSEČ	28
5.1	Primerjava rezultatov za obstoječe stanje terena	30
5.1.1	Sproščanje drobirskega toka s prostornino 25.000 m ³	30
5.1.2	Konstanten dotok drobirskega toka 500 m ³ /s	33
5.1.3	Sproščanje drobirskega toka s prostornino 20.000 m ³ (moker).....	36
5.1.4	Sproščanje drobirskega toka s prostornino 15.000 m ³	38
5.1.5	Sproščanje drobirskega toka s prostornino 5000 m ³ in 1000 m ³	40
5.2	Primerjava rezultatov za načrtovano stanje 2004	44
5.2.1	Sproščanje drobirskega toka s prostornino 25.000 m ³	44
5.2.2	Konstantni dotok drobirskega toka s 500 m ³ /s	47
5.2.3	Sproščanje drobirskega toka s prostornino 20.000, 15.000, 5000 in 1000 m ³	49
5.3	Hitrostna polja za program PCFLOW2D pri obstoječi in načrtovani ureditvi.....	52
6	ZAKLJUČKI	53
	VIRI	57
	PRILOGE.....	59

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Razvrstitev drobirskih tokov v hitrostne razrede	5
Preglednica 2: Lestvica moči drobirskega toka	6
Preglednica 3: Pregled računskih primerov in upoštevanih parametrov.....	23
Preglednica 4: Simulacija štirih primerov na odseku B	24
Preglednica 5: Izračunane globine in pretoki za posamezne primere.	25
Preglednica 6: Kote gladin, globine drobirskega toka in razlika globin za volumen 25.000 m ³	32
Preglednica 7: Kote gladin, globine drobirskega toka in razlika globin pri konstantnem dotoku 500 m ³ /s	35
Preglednica 8: Kote gladin, globine drobirskega toka in razlika globin za volumen 20.000 m ³ (moker).....	38
Preglednica 9: Kote gladin, globine drobirskega toka in razlika globin za volumen 15.000 m ³	40
Preglednica 10: Kote gladin, globine drobirskega toka in razlika globin za volumna 5000 in 1000 m ³	43
Preglednica 11: Kote gladin, globine drobirskega toka in razlike globin za volumen 25.000 m ³	46
Preglednica 12: Kote gladin, globine drobirskega toka in razlike globin za konstantni pretok 500 m ³ /s.....	48
Preglednica 13: Kote gladin in globine drobirskega toka, dobljene s programom PCFLOW2D pri načrtovani ureditvi 2004.....	51

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Hidrogram $Q(t)$ za volumen 25.000 m^3 pri obstoječem stanju	31
Grafikon 2: Hidrogram $Q(t)$ za konstanten dotok $500 \text{ m}^3/\text{s}$ pri obstoječem stanju	34
Grafikon 3: Hidrogram $Q(t)$ za volumen 20.000 m^3 (moker) pri obstoječem stanju	37
Grafikon 4: Hidrogram $Q(t)$ za volumen 15.000 m^3 pri obstoječem stanju	39
Grafikon 5: Hidrogram $Q(t)$ za volumen 5.000 m^3 pri obstoječem stanju	41
Grafikon 6: Hidrogram $Q(t)$ za volumen 1000 m^3 pri obstoječem stanju	42
Grafikon 7: Hidrogram $Q(t)$ za volumen 25.000 m^3 pri načrtovanem stanju 2004.....	45
Grafikon 8: Hidrogram $Q(t)$ pri konstantnem dotok $500 \text{ m}^3/\text{s}$ in načrtovani ureditvi 2004.....	47
Grafikon 9: Vhodni hidrogrami $Q(t)$ za volumne $20.000, 15.000, 5000$ in 1000 m^3 pri načrtovanem stanju 2004	50
Grafikon 10: Izhodni hidrogrami $Q(t)$ za volumne $20.000, 15.000, 5000$ in 1000 m^3 pri načrtovanem stanju 2004	50

KAZALO SLIK

Slika 1: Območja drobirskega toka	10
Slika 2: Prečni profil čez plaz Strug.....	20
Slika 3: Prikaz območja plazu in potek drobirskega toka skozi vasi Koseč in Ladra.....	22
Slika 4: Prikaz 3D modela za obstoječe stanja terena.....	30
Slika 5: Prikaz 3D modela za načrtovano ureditev 2004	44

KAZALO PRILOG

Priloga 1: Vzдолžni prerez pri zdrsuh 25.000 m ³ in obstoječi ureditvi	61
Priloga 2: Vzдолžni prerez pri stalnem toku 500 m ³ /s in obstoječi ureditvi.....	62
Priloga 3: Vzдолžni prerez pri zdrsuh 20.000 m ³ (moker) za obstoječo in načrtovano ureditev	63
Priloga 4: Vzдолžni prerez pri zdrsuh 15.000 m ³ za obstoječo in načrtovano ureditev	64
Priloga 5: Vzдолžni prerez pri zdrsuh 5000 m ³ za obstoječo in načrtovano ureditev	65
Priloga 6: Vzдолžni prerez pri zdrsuh 1000 m ³ za obstoječo in načrtovano ureditev	66
Priloga 7: Vzдолžni prerez pri zdrsuh 25.000 m ³ in načrtovani ureditvi.....	67
Priloga 8: Vzдолžni prerez pri stanem toku 500 m ³ /s in načrtovani ureditvi	68
Priloga 9: Vzдолžni prerez pri zdrsuh 20.000 (moker), 15.000, 5000, 1000 m ³ in načrtovani ureditvi 2004.....	69
Priloga 10: Skica sprememb pri načrtovani ureditvi 2004	70
Priloga 11: Izračunane envelope dosega toka programov pri 25.000 m ³ in obstoječi ureditvi	71
Priloga 12: Izračunane envelope dosega toka različnih programov pri stalnem toku 500 m ³ /s in obstoječi ureditvi	72
Priloga 13: Conacija globin PCFLOW2D pri stalnem toku 500 m ³ /s in obstoječi ureditvi.....	73
Priloga 14: Conacija globin FLO-2D pri stalnem toku 500 m ³ /s in obstoječi ureditvi	74
Priloga 15: Izračunane envelope dosega toka različnih programov pri 20.000 m ³ (moker) in obstoječi ureditvi	75
Priloga 16: Izračunane envelope dosega toka programa PCFLOW2D pri 15.000, 5000 in 1000 m ³ in obstoječi ureditvi.....	76
Priloga 17: Izračunane envelope dosega toka različnih programov pri 25.000 m ³ in načrtovani ureditvi.....	77
Priloga 18: Izračunane envelope dosega toka različnih programov pri stalnem toku 500 m ³ /s in načrtovani ureditvi.....	78
Priloga 19: Izračunane envelope dosega toka programa PCFLOW2D pri 20.000 (moker), 15.000, 5000, 1000 m ³ in načrtovani ureditvi	79
Priloga 20: Hitrostno polje za konstanten pretok 500 m ³ /s in obstoječi ureditvi terena	80
Priloga 21: Hitrostno polje za konstanten pretok 500 m ³ /s in načrtovani ureditvi terena	81
Priloga 22: Hitrostno polje pri volumnu 25.000 m ³ in obstoječi ureditvi terena	82
Priloga 23: Hitrostno polje pri volumnu 25.000 m ³ in načrtovani ureditvi terena	83

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

FEMA	Federal Emergency Management Agency (Zvezna uprava nezgod), ZDA
FGG	Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
KMTe	Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem
SSKJ	Slovar slovenskega knjižnega jezika
UL	Univerza v Ljubljani
VGB	Vodnogospodarski biro, Maribor
SIMPLE	Iterativni postopek popravkov globin

SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK

Absorpcija	Vezanje – asimilacija – snovi, ionov ali molekul, v geotehničnem smislu prvenstveno tekočine, v notranjost trdne snovi. (Adamič, 1995).
Eksogeni procesi	Geološki procesi, ki nastajajo v vrhnjih plasteh zemeljske skorje zaradi delovanja morja, rek, ledenikov. (Verbinc, 1970).
Endogeni procesi	Geološki procesi, ki nastajajo zaradi notranje toplote Zemlje in povzročajo vulkanske izbruhe. (Verbinc, 1970).
Kohezija	Vež – zveza – povezanost, v fizičnem smislu vezljivost, privlačnost med molekulami iste snovi. (Verbinc, 1970).
Vršaj	Nizkemu širokemu kupu podoben nanos, ki ga naredi reka, potok ob izstopu iz ozkih stranskih dolin v širšo glavno dolino (SSKJ, 1994)

1 UVOD

Zemeljsko površje stalno oblikujejo endogeni procesi, to je globalno gibanje kontinentalnih tektonskih plošč na Zemlji, ki se lokalno odraža v dvigovanju in spuščanju tektonskih blokov, in eksogeni procesi, kot so erozija, premeščanje materialov in njihovo odlaganje.

Zemeljska skorja je sestavljena iz kontinentalnih plošč, ki zelo počasi plavajo po raztaljenem plašču v različne smeri. Tam, kjer dve plošči trčita skupaj, nastane gorovje; na našem ozemlju so to Alpe. Pri tem skorja razpoka, se guba, prelamlja in nariva. Celotno slovensko ozemlje leži na meji dveh kontinentalnih plošč in je tektonsko zelo poškodovano. Ker se ozemlje še vedno deformira, se včasih napetosti nenadoma sprostijo in pride do potresa. Tektonika precej vpliva na stopnjo ogroženosti. Razpoke in prelomi so kompaktno apnenčevo kamnino razkosali v bloke, gorotvorno-endogene sile pa so te bloke postavile v labilen položaj. Tu pridejo na vrsto eksogeni procesi, ki zaradi sil vode, vetra, ledu, snega in težnosti delujejo proti tektonskemu dvigovanju pojavov in nižajo zemeljsko površje. Eksogeni dejavniki so glavni dejavniki preperevanja in premeščanja zemeljskih gmot na površju. Najbolj značilni primeri težnostnih erozijskih pojavov so podori in plazovi. Podori se pogosto pojavljajo ob narivnih robovih, kjer trde kamnine ležijo na mehkih. Kadar prelomi prečkajo bolj zaglinjene kamnine, se lahko v pregnetenih conah pojavijo globlji zemeljski plazovi. Med težnostne erozijske pojave uvrščamo tudi drobirske tokove, ki se ponavadi pojavljajo v kombinaciji z drugimi erozijskimi pobočnimi procesi.

V splošnem drobirski tok nastane zaradi neke oblike porušitve, ki zagotavlja zadosten vir materiala za potovanje drobirskega toka. Na območje nastanka drobirskega toka pa mora priteči tudi zadostna količina vode. Voda lahko pride na območje v različnih oblikah (padavine, hudournik, taljenje snega ...) in razmoči material do take stopnje, da material steče.

Zaradi hitrosti in rušilne moči drobirski tokovi predstavljajo nevarnost tako za naravo kot za ljudi. Da bi preprečili oz. omilili posledice drobirskih tokov, moramo poznati njihove značilnosti nastanka, potovanja in zaustavljanja. Ker pa je ta pojav naključen in nepredvidljiv, je drobirske tokove težko opazovati in analizirati. Zato je potrebno podatke o dogodkih pri

vsaki ponujeni možnosti zbrati čim bolj natančno in čim bolj strokovno. Le celovit interdisciplinarni pristop k analizi lahko poda rezultate, ki so uporabni za varovanje že prizadetih območij ali obvarovanje potencialno ogroženih območij pred novimi pojavi.

Raziskovanje drobirskih tokov je relativno novo področje znanosti, ki povezuje več sorodnih področij raziskovanj. Pokriva področja geologije, geomehanike, hidrologije, hidromehanike in klasične mehanike, zaradi elektrokemičnih vezi pa sega tudi na področje fizikalne kemije. V svetu se je raziskovanje pričelo po letu 1970, pri nas pa se je stroka začela bolj intenzivno ukvarjati s problematiko drobirskih tokov po tragičnem dogodku 17. novembra 2000, ko se je zemeljski plaz z območja Stož, ki je bil posledica dolgotrajnejših padavin, preoblikoval v drobirski tok in razdejal vas Log pod Mangartom. V slovenskem prostoru je v zadnjih 15 letih ob naravnih nesrečah, povezanih z vodo, nastala ogromna škoda. Med ogrožena območja je razvrščen večji del Slovenije (Posočje, Gorenjska, Zasavje, Zgornja Savinjska dolina), prevladujoč vpliv imajo plazna erozija, druge oblike masnih premikov blata, kamenja in vode, pa tudi poselitev in nepremišljena urbanizacija na potencialnih območjih za nastanek tovrstnih pojavov (Savinjska dolina, JZ del Ljubljane). V Sloveniji so taki pojavi zabeleženi skoraj na vseh hribovitih območjih, kadar so padavine ali odtoki presegali 20 oziroma 50-letno povratno dobo. V zadnjih letih so se aktivirali plazovi : Macesnikov plaz, Stože, Koseč in Slano blato nad Lokavcem. Najbolj značilna primera katastrofe, kjer je zaradi povezave nestabilnosti pobočja in velike količine padavin prišlo do aktiviranja zemeljskega plazu in kasneje do oblikovanja drobirskega toka, sta plazova na območju Stož (Log pod Mangartom) in Strug (Koseč). Prvi se je preoblikoval v drobirski tok s prostornino $1,5 * 10^6 \text{ m}^3$. 7 km je potoval s hitrostjo 10 m/s, na poti porušil del vasi Log pod Mangrtom in povzročil smrt 7 prebivalcev. Iz plazu z območja Strug je gmota splazela v strugo hudournika Brsnik. Hudournik je ta material spiral in ga transportiral po strugi v nižje ležeče predele v obliki občasnih drobirskih tokov, ki so ogrožali vas Koseč. Ker so strokovnjaki ugotovili, da je na pobočju še od 55.000 do 45.000 m^3 materiala, ki lahko splazi v strugo Brsnika, so pristojni organi skušali s posebnimi ukrepi zavarovati vas Koseč. Zaradi bojazni, da bi prišlo do ponovnega drobirskega toka v Logu pod Mangartom, so tudi tam organi poskušali določiti ukrepe, ki bi preprečili ali vsaj omilili posledice ponovne tvorbe drobirskega toka. V obeh primerih so morali dokazati, da vsak predlagani ukrep v in ob strugi ter na pobočju res zagotavlja varnost oz. obrambo pred drobirskim tokom.

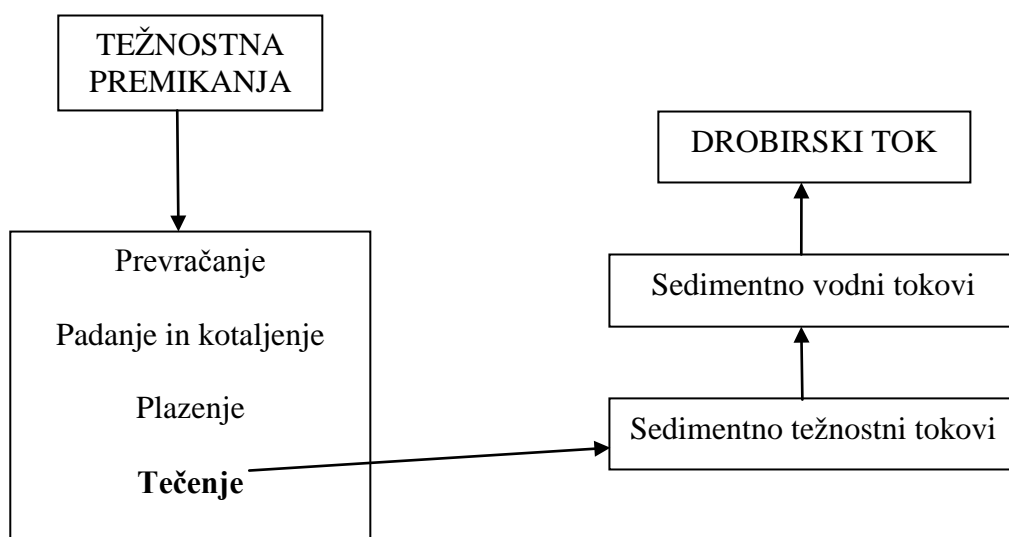
Da so strokovnjaki prišli do zaključkov, kako posamezen ukrep deluje na potek drobirskega toka, so uporabili matematične modele, ki imajo sposobnost simuliranja drobirskega toka po podanem območju. Uporabljali so enodimenzijski model PLAZ1D ter dvodimenzijska PCFLOW2D in FLO – 2D. Enodimenzijski model, ki je bil razvit na KMTe, so uporabljali na ožjih predelih, kjer tok nima možnosti širjenja in je komponenta vzdolžne smeri toka prevladujoča, medtem ko so pri razširitvah, kjer se masa razliva, uporabljali 2D modele, saj tu komponenta prečne smeri ni več zanemarljiva. PCFLOW2D so prav tako razvili na KMTe, medtem ko je FLO – 2D komercialni model, ki ga je razvil J. S. O'Brien (2004). Na osnovi rezultatov teh modelov so lahko predlagali ukrepe in dokazali, da ugodno vplivajo na povečanje varnosti pred drobirskimi tokovi.

Rezultati različnih modelov niso dali istih rezultatov kljub uporabi istih vhodnih parametrov. Vsi izračuni so bili po inženirski presoji na varni strani. Do teh odstopanj pride, ker različni modeli uporabljajo enačbe različnih avtorjev ter različne numerične metode in tako upoštevajo podane parametre različno. Primerjava velikosti napak in razlik med programoma PCFLOW2D in FLO - 2D, na primeru drobirskega toka v vasi Koseč, je osnovna tema diplomske naloge.

2 SPLOŠNO O DROBIRSKIH TOKOVIH

2.1 Klasifikacija drobirskih tokov

Drobirski tok spada med sedimentno vodne tokove, in sicer med zrske tokove, kjer prevladuje zrnkovztrajnostni režim. Sedimentno vodne tokove uvrščamo med sedimentno težnostne tokove, ki so podskupina glavne klasifikacije tokov, za katere je značilno tečenje.



2.2 Značilnosti drobirskega toka

Glavna značilnost drobirskega toka je, da ima tok značilnosti vodnega toka z nekaterimi posebnostmi, ki jih lahko prikažemo s fizikalnimi lastnostmi, mednje spadata tudi hitrost toka in nagib podlage.

2.2.1 Fizikalne značilnosti

Med fizikalne značilnosti drobirskih tokov spadajo poleg hitrost in nagiba še gostota, odstotek glin, globina, delež trdnih delcev in Reynoldsovo število. Za gostoto je značilno, da so lahko tokovi redkejši ali gostejši. Redkejši so seveda hitrejši in prepotujejo daljšo pot ter so

večinoma bolj plitvi (do 0,5 m), medtem ko gosti tokovi nosijo bolj grob material in so počasnejši ter višji (1-2 m).

Vsi drobirski tokovi imajo značilno gibanje vzdolž svoje poti in sicer pulzirajo. Te pulzacije se lahko pojavljajo v razmaku nekaj sekund ali ur. Pulzacije nastanejo zaradi:

- periodičnega sproščanja drobirja oziroma preoblikovanja v drobirski tok,
- občasne zamašitve struge, po kateri potuje drobirski tok,
- zrušitve brežin v strugo,
- spremembe nagiba ter prereza struge,
- trenja med podlago in drobirskim tokom.

Hitrosti drobirskih tokov se gibljejo med 0,5 m/s in 20 m/s. Tako široko območje hitrosti nastane zaradi velikih razlik v zrnavosti, deležu vode in gline v zmesi, nagibu, širini in ukrivljenosti struge. Hitrost drobirskih tokov je pomembna, ker je neposredno povezana s pojavom turbulence. Problem je v tem, da turbulenca ni odvisna samo od hitrosti, temveč tudi od vsebnosti delcev velikosti gline ali večjih. Več kot jih je, manjša je verjetnost turbulentnega toka, ki se pojavi le ob prelivanju čez ovire z ostrim robom (vodne zgradbe, stopnje). Da je pri pojavu drobirskega toka prišlo do turbulence, dokazujejo obrizgane fasade hiš in raztreseni drobir. Doslej meje med laminarnim in turbulentnim drobirskim tokom še niso določili, so pa določili hitrostne razrede tokov. Tega so se lotili Varnes (1978), Hunger (1981), Cruden in Varnes (1994).

Preglednica 1: Razvrstitev drobirskih tokov v hitrostne razrede

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

Cruden in Varnes (1994) sta objavila lestvico moči drobirskega toka, v kateri sta določila, kakšne posledice predstavlja posamezen razred za ogroženo prebivalstvo in infrastrukturo.

Preglednica 2: Lestvica moči drobirskega toka

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

Nagib podlage je eden izmed pomembnejših pogojev, da pride do zdrsa in kasneje do polzenja ter zaustavljanja drobirske mase. Kako ta mehanizem deluje, lahko pojasnimo s stabilnostno analizo zmesi drobirskega toka. Z analizo pridemo do enačbe:

$$\tan \theta = \frac{C_v(\gamma_s - \gamma_w)}{C_v(\gamma_s - \gamma_w) + \gamma_w} \tan \phi \quad (1)$$

$\tan F$ = kot notranjega trenja

$\tan Q$ = nagib podlage

C_v = prostorninska koncentracija zmesi

γ_s = specifična teža trdnih delcev

γ_w = specifična teža vode

Iz enačbe sledi, da dokler je vrednost $\tan F < 1$, je $\tan Q$ manjši od $\tan F$. Torej je nagib, kjer se formira tok, vedno manjši od strižnega zdrsa.

Iz merjenj naklona podlage, pri kateri je že prišlo do toka, so prišli do različnih podatkov. Gibali so se od 2% do 62%, tako da ne moremo določiti nekega univerzalnega nagiba, pri katerem pride do drobirskega toka, saj je nastanek in kasnejši tok drobirja odvisen od več faktorjev.

2.3 Koncept gibanja trdnih delcev

Zanimivo je to, da drobirski tok lahko že pri manjših nagibih prenaša večje kamnite gmote, debeline tudi do 4 m. Zaradi te sposobnosti drobirskih tokov so razvili veliko teorij, zakaj in kako pride do tega pojava. Avtorji so sposobnost prenašanja povezovali z različnimi pojavi, vendar je sposobnost premeščanja trdnih delcev skupna značilnost vseh teh pojavov. Med pojave, zaradi katerih pride do premikanja skalnih gmot, uvrščamo disperzivno napetost, trdnost zmesi in vzgon.

2.3.1 Disperzivna napetost

Pri tem pojavu je Bagnold na osnovi poizkusov v vrtečem cilindru prišel do zaključka, da ima tok dva režima, in sicer makroviskozni in zrnkovztrajnostni režim. Ker nas pri drobirskih tokovih zanima slednji, je Bagnold ugotovil, da so sile v tem režimu posledica trkov med delci, ko je ena plast prehitevala drugo. Napetosti, ki sta pri tem nastali, sta bili normalna (disperzivna) napetost in strižna napetost. Z analizo je prišel do zaključka, da je normalna napetost premosorazmerna kvadratnemu korenu zmnožka deformacijske hitrosti in premera zrn. Pri opazovanju tokov so ugotovili, da disperzivna napetost ni edini vzrok za premeščanje posameznih delcev, saj so tudi pri mirovanju toka opazili plavajoče delce.

2.3.2 Trdnost zmesi

Ker delec, ki pade v stoječe blato, potone le do določene globine in tam obstane, smatramo, da mora obstajati še ena sila, ki mu to omogoča. To silo so poimenovali trdnost zmesi in je posledica gline, ki ima to sposobnost, da se povezuje v kosme zaradi privlačne sile med glinenimi delci. Napetost, pri kateri se te vezi med delci porušijo pa imenujemo trdnost zmesi.

2.3.3 Vzgon

Vzgon je najpomembnejši element pri premeščanju trdnih delcev. V drobirskem toku za vzgon smatramo tisti volumen, ki predstavlja celoten izpodrinjeni material zmesi in trdnih delcev, ki so manjši od obravnavanega dela (skale).

Sprva so v enačbah upoštevali samo silo vzgona medzrnske tekočine in trdnost zmesi, nato so upoštevali tudi porne tlake, ki se pri pojavu naraščanja gradienta tlaka odraža kot vzgon in vpliva na zmožnost premikanja (več kot je trdnih delcev, večji je vzgon).

V osnovi vse enačbe slonijo na trditvi, da posamezno zrno lahko v zmesi lebdi, če je teža delca uravnotežena z vzgonom in deformacijsko trdnostjo zmesi. Z upoštevanjem tega načela je bilo izpeljanih več enačb, ki določajo največji premer zrn, ki ga določen tok še lahko premešča.

$$D_m = \frac{(const)\tau_y}{(\rho_g - \rho_m)} \quad (2)$$

ρ_g = gostota delcev

ρ_m = gostota nasičene zmesi, ki jo sestavljajo delci in mešanica

τ_y = deformacijska odpornost

D_m = premer delca

Če imamo večji delež grobih delcev, se enačba spremeni v:

$$D_d = \frac{(const)\tau_y}{\gamma_g - [C_g(\gamma_g - \gamma_m) + \gamma_m]} \quad (3)$$

$C_g(\gamma_g - \gamma_m)$ teža trdnih delcev

γ_g = specifična teža trdnih delcev

γ_m = specifična teža nasičene zmesi

Vse te analize imajo to pomanjkljivost, da ne upoštevajo disperzivnega tlaka, zato so primernejše za analizo stoječega blata.

2.4 Inverzna velikostna razvrstitev delcev

Pri drobirskem toku pride do pojava, da se večji delci pomikajo proti robu toka in v napični smeri proti površini toka, kar povzroča inverzno razvrstitev delcev (segregacija). Imamo več teorij, zakaj pride do segregacije.

Prva sloni na Bagnoldovi ugotovitvi o disperzivni napetosti, za katero je značilno, da je enaka kvadratnemu korenu zmnožka premera zrn in deformacijske hitrosti. Inverzna razporeditev uravnoveša disperzivne napetosti v toku: če je deformacijska hitrost največja pri dnu, se večji delci pomikajo proti površju, kjer je hitrost manjša.

Druga teorija sloni na Bernoullijevi teoriji in trdi, da je inverzna razvrstitev posledica premikanj delcev s področja večjih tlakov na področja z manjšim tlakom. To razlago sta podala Fischer in Mattison (1968).

Tretjo teorijo je podal Middleton (1970). V njej je razvijal tezo, da se večji delci pomikajo navzgor, ker manjši delci potujejo med večjimi (se presejejo) in tako izrivajo večje proti površini.

2.5 Viri drobirja

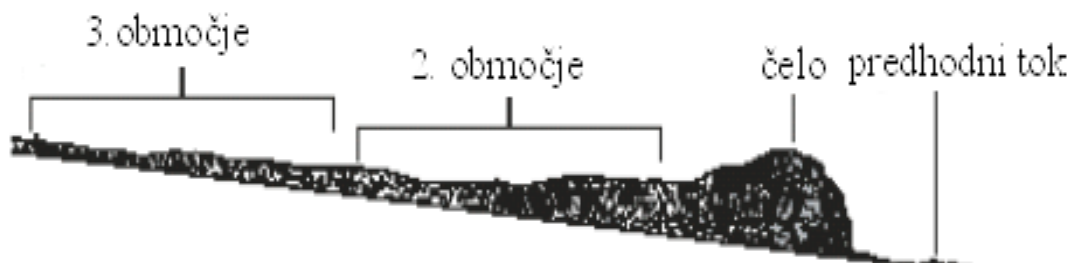
Viri drobirja so največkrat *plazovi, zdrsi ali drobirski plazovi*, ki nastanejo na plazovitem območju zaradi padavin, potresa ali antropogenega vpliva. Zanj je značilno, da je sestavljen iz nenasičene zmesi blata, skal in kamenja ali drugega materiala, ki ni stabilen. Ta se ob večji količini zalednih vod ali padavin spremeni v drobirski tok. Vir drobirja je tudi *erozija*, ki erodira drobir tako bočno kot globinsko in se lahko spremeni v drobirski tok.

2.6 Sestava drobirskega toka

Drobirski tok je dobro premešan večfazni tok drobirja (drobni delci, grušč, skale, bloki) in vode, lahko pa tudi zraka. Velikost posameznih delov drobirja se razteza od gline do velikih skal. Tok lahko vsebuje tudi dele vej, cele veje ali hlode in dele hlodov, ki jih pobere po poti.

2.7 Prerez drobirskega toka

Če gledamo drobirski tok, vidimo, da ga lahko razdelimo na tri območja. Prvo območje imenujemo čelo vala. Sestavljeno je iz skal in drobirja, ki je inverzno razporejen, torej so manjši delci pri dnu, večji pa pri površini. Dolžina čela je od nekaj pa do nekaj deset metrov, njegova višina pa je odvisna od nagiba in širine struge (vršaja), po kateri tok potuje. Drugo območje imenujemo območje visokoturbulentnega toka blata s primesmi. Tretje območje pa imenujemo območje toka blatne vode z visoko koncentracijo blata, peska in prodnikov, ki potuje dolgo za čelom vala.



Slika 1: Območja drobirskega toka

2.8 Odlaganje drobirskega toka

Drobirski tok se odlaga na območjih, na katerih se spremeni (zmanjša) nagib površine ali pa se struga, po kateri teče, razširi. V obeh primerih mora biti doseženo ravnovesje med vzdolžno komponento teže ter notranjim in zunanjim strižnim uporom v toku. Drobirski tok namreč predstavlja enofazno heterogeno tekočino vode in sedimenta, pri čemer nobena od sestavin nima glavne vloge pri zastajanju, ampak se na območju odlaganja oba elementa upočasnjujeta in zaustavljata. Že zaustavljeni drobirski tok lahko zopet spravi v gibanje nov

val drobirskega toka. Odlaganje drobirskega toka se razlikuje od rečne prodonosnosti, ki je posledica zmanjšanja turbulence vodnega toka.

3 OPIS MODELOV FLO – 2D IN PCFLOW2D

3.1 Model FLO–2D

3.1.1 Splošni opis modela

Prva različica modela FLO – 2D se je imenovala MUDFLOW. Začetek njegovega razvoja sega v leto 1988, ko je zvezna uprava nezgod za izredna stanja v Ameriki (FEMA) potrebovala oceno ogroženosti aluvialnega vršaja v Coloradu pri poplavah. Navedena organizacija je zahtevala raziskavo modelov, ki bi bili primerni za simulacijo blatnih tokov. Po preizkusu več modelov se je pokazalo, da bi bil razpršilni hidrodinamični model (DHM), katerega avtorja sta bila Hromadka in Yen (1987), najboljši za osnovo pri razvoju hidravličnega modela za blatni tok.

Originalni MUDFLOW model je bil velik le nekaj sto vrstic v programskem jeziku Fortran in je bil omejen na računanje mreže z 250 celicami. Računanje je bilo zaradi računalniške opreme zelo počasno. Z večanjem zmogljivosti računalnikov so se tudi osnovnemu modelu dodajale komponente in izboljševali algoritmi reševanja. Po 15 letih razvoja je program obsegal 25.000 vrstic in imel veliko pomožnih programov. Na koncu je bil prvotni model čisto spremenjen, od originalnega koncepta DHM je ostalo bore malo, razen začetne ideje.

Sedaj FLO – 2D lahko izračunava tok v 8 smereh, posreduje podatke o ohranitvi mase, uporablja nov časovni korak pri rastočih in padajočih shemah poteka, vključuje zmogljiv numerični stabilnostni kriterij, ima možnost vnosa zelo goste mreže, ki jo dobimo iz digitalnega modela terena oz. digitalne karte, vsebuje grafične urejevalce podatkov in grafični prikaz dobljenih rezultatov, kot so maksimalne poplavne globine ali hitrosti toka. S temi podatki si lahko pomagamo pri prikazu morebitne poplavne katastrofe, regulacije razlivnih površin in pri projektiranju objektov za zmanjševanja posledic poplav. Model je uporaben pri analizi možnosti prelivanja vode preko rečnih brežin in tudi pri analizi nenevtonskih tekočin, kot sta drobirski in blatni tok. Enodimenzionalne analize lahko zamenjamo z detajlnimi

dvodimenzijskimi, ki upoštevajo padavine, infiltracijo, rečne nasipe, hidravlične objekte, ceste, visoko koncentrirane sedimentne tokove in vplive objektov.

FLO-2D je prerasel v model, ki upošteva deževni odtok in hidrograme po razmeroma velikem površju oz. strugi. Pri tem uporablja razpršen ali dinamičen približek vala. Model ima sedaj tudi veliko komponent za simulacijo toka po ulicah in preko ovir, za transport plavin in premikanje rečne posteljice, za prostorsko spremenljivost padavin in infiltracije le teh, za poplavne poti in veliko drugih poplavnih detajlov. Predvidena globina toka in hitrost med točkama v mreži predstavljata povprečen hidravlični tok za majhen časovni korak. Čeprav velikost numerične mreže programsko ni omejena, se moramo zavedati, da model računa povprečni hidravlični tok med vsemi točkami in se je zato iz praktičnih razlogov potrebno izogibati prevelikim mrežam. Računanje primera z mrežo 400.000 točk in 3-urnim vhodnim hidrogramom lahko namreč traja tudi nekaj dni.

3.1.2 Teoretične osnove modela

FLO – 2D je preprost model končnih volumnov, ki premika poplavni volumen po seriji kvadratkov v mreži, ko gre za tok po suhem dnu. Pri toku v strugi pa premika volumen skozi serijo rečnih odsekov. Na napredovanje poplavnega vala skozi poplavno območje vplivata topografija in odpor proti toku. Smer potovanja toka določa s pomočjo numerične integracije dinamičnih enačb gibanja in kontinuitetne enačbe za ohranjanje volumna toka. Ta način računanja uporablja tako za vodne tokove kot za prekocentrirane sedimentne tokove. V nadaljevanju so prikazane osnovne enačbe, ki jih model uporablja pri računanju.

Kontinuitetna enačba

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hV_x}{\partial x} + \frac{\partial hV_y}{\partial y} = i \quad (4)$$

in dve dinamični enačbi v obliki:

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \quad (5)$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{I}{g} \frac{\partial V_y}{\partial t} \quad (6)$$

Spremenljivke v enačbah pomenijo: h – globina vode, V_x in V_y – globinsko povprečni hitrosti v x in y smeri, i – intenziteta padavin, S_{ox} in S_{oy} – padec terena v x in y smeri, S_{fx} in S_{fy} – padec energijske črte v x in y smeri.

Vpliv strižne napetosti τ v prekoncentriranih sedimentnih tokovih so v model FLO –2D uvedli s pomočjo naklona energijske črte S_f . Ideja, kako določiti padec energijske črte, izhaja iz analize, pri kateri so prišli do zaključkov, da strižno napetost lahko izračunamo s seštevanjem petih različnih strižnih napetosti. Končna strižna napetost je odvisna od mejne kohezijske deformacijske trdnosti τ_c , Mohr-Coulombove napetosti τ_{mc} , viskozno strižne napetosti τ_v , turbulentno strižne napetosti τ_t in razpršilne strižne napetosti τ_d .

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \quad (7)$$

Če govorimo o strižnih razmerjih, lahko definiramo kvadratni reološki model (O'Brien in Julien, 1985) kot:

$$\tau = \tau_y + \eta \left(\frac{dv}{dy} \right) + C \left(\frac{dv}{dy} \right)^2, \quad (8)$$

kjer je

$$\tau_y = \tau_c + \tau_{mc} \quad (9)$$

$$\tau_{mc} = p_s * \tan\varphi \quad (10)$$

in

$$C = \rho_m l^2 + f (\rho_m, C_v) d_s^2. \quad (11)$$

V teh enačbah τ_y predstavlja mejno strižno trdnost, η dinamično viskoznost, C turbulentno disperzivni parameter, ki je odvisen od gostote mešanice ρ_m [kg/m^3], Prandtllove dolžine mešanja l , premera zrn d_s in funkcije volumske koncentracije sedimenta C_v . τ_y je mejna strižna trdnost, τ_c je mejna kohezijska deformacijska trdnost, τ_{mc} je Mohr – Coulombova

napetost, p_s medzrnski tlak, $\tan\varphi$ kot odlaganja materiala. Bagnold (1954) je definiral funkcijsko odvisnost $f(\rho_m, C_v)$ kot:

$$f(\rho_m, C_v) = a_i \rho_m \left[\left(\frac{C^*}{C_v} \right)^{1/3} - 1 \right], \quad (12)$$

kjer je a_i (~ 0.01) empirični koeficient, C^* pa maksimalna volumska koncentracija sedimentnih delcev. Po ugotovitvah Takahashija (1979), da koeficient a_i lahko zelo variira, je po ponovnem pregledu enačb Egashira (1989) predlagal naslednjo odvisnost:

$$f(\rho_s, C_v) = \frac{\pi}{12} \left(\frac{6}{\pi} \right)^{1/3} \sin^2 \alpha_I \rho_s (1 - e_n^2) C_v^{1/3} \quad (13)$$

Tu je e_n energijsko obnovitveni koeficient in je za pesek v mejah $0,70 < e_n < 0,85$, α_I je povprečni kot trka, ρ_s pa je gostota sedimentnih delcev.

Da bi upoštevali vse strižne napetosti in bi jih FLO – 2D lahko uporabil, so uvedli poseben pristop. Po analogiji z deli Einsteina (1950) in Meyer – Peter Müllerja (1948) je vsoto naklona energijskih izgub, ki ga sestavljajo izgube zaradi mejne strižne napetosti S_y , viskoznosti S_v in turbulence z disperzivnostjo S_{td} , možno napisati kot:

$$S_f = S_y + S_v + S_{td} \quad (14)$$

Komponenta mejne strižne napetosti S_y se lahko zapiše kot:

$$S_y = \frac{\tau_y}{\gamma_m h}. \quad (15)$$

τ_y predstavlja mejno strižno trdnost, γ_m specifično težo mešanice, h pa globino toka.

Komponento viskoznosti S_v zapišemo kot:

$$S_v = \frac{K \eta}{8 \gamma_m} \frac{v}{h^2} \quad (16)$$

kjer je K - konstanta uporovnega koeficienta in se giblje od 24 pri gladkih strugah do 2285 pri naravnih razgibanih strugah, lahko pa je tudi 50.000. γ_m je specifična teža mešanice, η predstavlja dinamično viskoznost, v hitrost toka, h pa globino.

Turbulentno disperzivna stržna napetost se zapiše v obliki:

$$S_{td} = \frac{n_{td}^2 V^2}{h^{4/3}} \quad (17)$$

$$n_{td} = n_t b e^{mC_v} \quad (18)$$

Pri tem je n_{td} odpornost proti toku, n_t je turbulentna vrednost Manningovega koeficienta, b je koeficient (0,0538), m je eksponent (6,0896), C_v pa prostorninska koncentracija

Če združimo vse komponente, dobimo naslednjo obliko enačbe, ki jo uporablja FLO – 2D za izračun naklona energijske črte. Pri računu potrebuje naklon energijske črte tako za smer toka kot prečno na tok. Izračuna ju tako, da upošteva globinsko povprečni komponenti hitrosti enkrat v x smeri in drugič v y smeri.

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K \eta V}{8 \gamma_m h^2} + \frac{n_{td}^2 V^2}{h^{4/3}} \quad (19)$$

$$S_{f_x} = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K \eta V_x}{8 \gamma_m h^2} + \frac{n_{td}^2 V_x^2}{h^{4/3}} \quad (20)$$

$$S_{f_y} = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K \eta V_y}{8 \gamma_m h^2} + \frac{n_{td}^2 V_y^2}{h^{4/3}} \quad (21)$$

3.2 Model PCFLOW2D

3.2.1 Splošni opis modela

Model PCFLOW2D je bil razvit na osnovi matematičnega modela TEACH, katerega avtor je A. D. Gosman (1976). Ta model še ni imel možnosti uporabe poljubne geometrije, ki jo prekriva pravokotna numerična mreža, prav tako ne globinskega povprečnega modela turbulence in simulacije nestalnega toka. Vse te možnosti so prvotnemu modelu dodali na Katedri za mehaniko tekočin na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo. Nastal je računalniški program PCFLOW2D, ki se danes v Sloveniji največ uporablja za reševanje dvodimenzionalnih turbulentnih tokov toka vode, v zadnjem času pa tudi nenevtonskih tekočin, npr. drobirskih tokov.

3.2.2 Teoretične osnove modela

Program PCFLOW2D, je bil razvit na Katedri za mehaniko tekočin (KMTe) Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Sistem parcialnih diferencialnih enačb se rešuje s pomočjo Patankar-Spaldingove metode končnih volumnov, ki je skupaj z računalniškim programom PCFLOW2D opisana v ustrezni literaturi (npr. Četina in Rajar, 1994 ali Četina in sod., 1996). Osnovne značilnosti metode so premaknjena numerična mreža, hibridna shema (kombinacija centralnodiferenčne in sheme gorvodnih razlik) in iterativni postopek popravkov globin, znan kot SIMPLE. Za integracijo po času je uporabljena polna implicitna shema, ki je stabilna in dovolj točna tudi pri daljših časovnih korakih in relativno visokih Courantovih številih (do okoli 10).

Dvodimenzijski model rešuje kontinuitetno in dinamični enačbi v konservativni obliki za nestalni globinsko povprečni tok s prosto gladino z dodatnimi reološkimi členi. Enačbe imajo naslednje oblike.

Kontinuitetna enačba

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (22)$$

in dinamični enačbi v x in y smeri

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial h}{\partial x} - gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - ghS_{fx} + \frac{\partial}{\partial x}(hv_{ef} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(hv_{ef} \frac{\partial u}{\partial y}) \quad (23)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial h}{\partial y} - gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - ghS_{fy} + \frac{\partial}{\partial x}(hv_{ef} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(hv_{ef} \frac{\partial v}{\partial y}) \quad (24)$$

Spremenljivke v enačbah pomenijo: h – globina vode, u in v – komponenti hitrosti v x in y smeri, t – čas, z_b – kota dna, n_g – Manningov koeficient, g – zemeljski pospešek, v_{ef} – koeficient efektivne viskoznosti, S_{fx} in S_{fy} – naklona energijske črte v x in y smeri.

Za določitev naklona energijske črte je pri tem programu uporabljen način, ki ga je predlagal O'Brien (Plo Engineering Inc., 1999). Podan je v naslednji obliki:

$$S_{fx} = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K \eta u}{8 \gamma_m h^2} + \frac{n_g^2 u (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}}{h^{4/3}} \quad (25)$$

$$S_{fy} = \frac{\tau_x}{\gamma_m h} + \frac{K \eta v}{8 \gamma_m h^2} + \frac{n_g^2 v (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}}{h^{4/3}} \quad (26)$$

Iz enačb je razvidno da je naklon energijske črte odvisen od spremenljivk, kot so τ_y - mejna strižno trdnost, η - dinamična viskoznost, n_g – Manningov koeficient, ki zajame hrapavost ostenja, pri drobirskem toku pa tudi vpliv trkov delcev materiala in turbulentnost. Določimo ga predvsem z umerjanjem, so pa tudi predpisani za posamezen primer, K – konstanta uporabnega koeficienta, ki je odvisna od hrapavosti struge in variira od 24 pri gladkih strugah do 2285 pri naravnih razgibanih strugah.

4 PRIMERI RAČUNOV DROBIRSKEGA TOKA NA OBMOČJU KOSEČA

4.1 Opis pojava

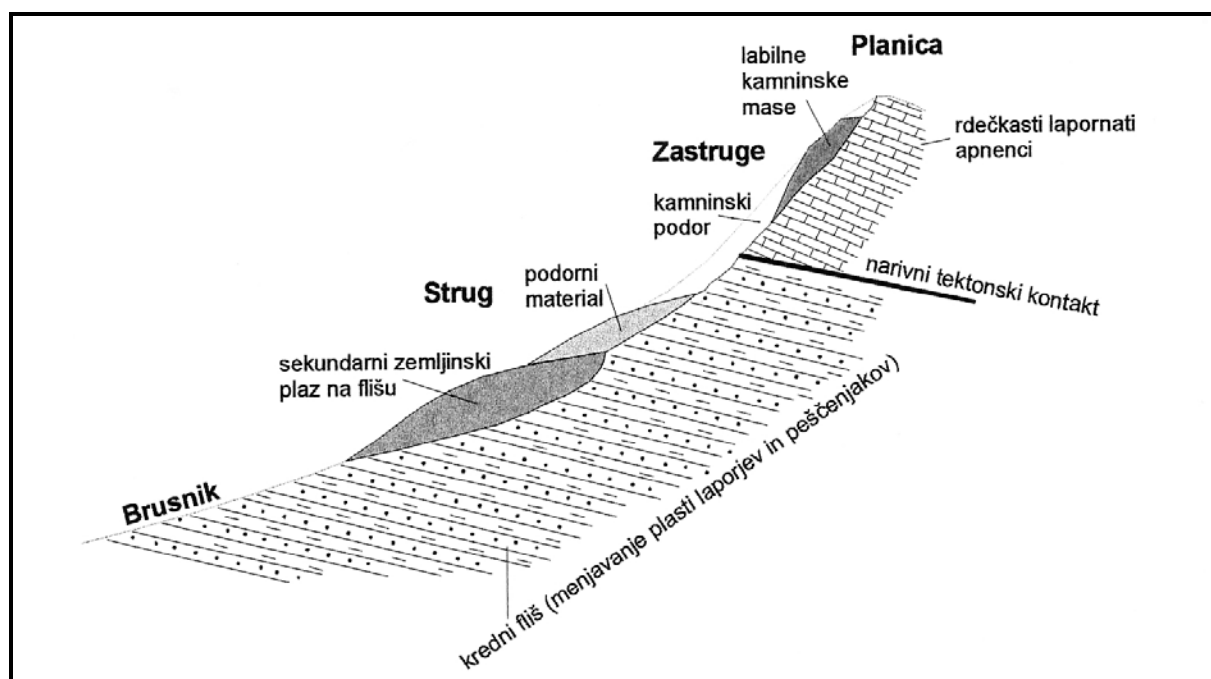
Koseč je naselje na jugozahodnih pobočjih Krnskega pogorja na nadmorski višini 560 – 600 m, od Drežnice je oddaljen 1 km. Na območju Koseča je v letih 2001 in 2002 prišlo do različnih pobočnih procesov, del gradiva je splazel (nastal je plaz), drugi se je odlamljal (podori in odlomi), del gradiva pa je prihajal po strugi Brusnika v dolino v obliki drobirskih tokov.

Prve razpoke so nastale že ob potresu 12. 4. 1998. Lastnik male hidroelektrarne, katere zajetje je v dolini Brusnika, je poročal, da je prišlo do večjega premika pobočja, saj se je pretrgala dovodna cev. 22. decembra 2001 se je nad Kosečem po manjših premikih, ki so trajali dva ali tri dni, sprožil zemeljski plaz. Oblasti so še isti dan odredile evakuacijo vasi, vendar so se vaščani čez dva dni vrnili v svoje domove. 26. decembra je prišlo do ponovnega plazenja. V naslednjih dnevih je bil plaz aktiven predvsem v zgornjem delu, spodaj pa je bilo premikanje počasnejše. Po vsej verjetnosti je vrsta manjših premikov in zdrsov pobočja, ki so sledili glavnim popotresnim premikom, skupaj z erozijskim delovanjem vode in zmrzaljo povzročila, da se je del pobočja, imenovan Strug, utrgal in zdrsnil v dolino hudournika Brusnika, ki priteka z leve. Plaz je odnesel senožet, pa tudi bukov gozd na njenem zgornjem in spodnjem koncu. Premik je bilo mogoče natančno oceniti, ker je splazela z gozdom obdana senožet na nadmorski višini 870 m.

Ob splazenju spodnjega dela je hkrati višje v bolj strmem delu pobočja izpod Planice prišlo do podiranja in kotaljenja gradiva. V tem delu so nastajali odlomi, gradivo odlomov je zasulo gozd, ki je rasel nad senožetjo, ta se ni premaknil v nižjo lego. Na tem mestu je nastal velik kup gradiva, za njim pa melišče. Slednje je tako naraslo, da je njegov spodnji del že segel na senožet. Na vrhu grebena pod Planico (1376 m n.m.) se je pojavila od 5 do 10 m visoka odlomna razpoka. Od zgornje kote 1200 m.n.v. do spodnje na 850 m.n.v., kjer se je material nakopičil, pa je nastalo podorno območje Zastruge, široko tudi 250 m. Količina mase

kameninskega podora je bila ocenjena na 100.000 m^3 . Kamninske mase (55.000 m^3) s podora so deloma obvisle na podornem območju, 45.000 m^3 pa jih je zdrsnilo na območje Strug. Sedaj premaknjene labilne kamninske mase s podornega območja grozijo, da se zrušijo na območje premaknjene senožeti in jo še dodatno obremenijo. Senožet Strug, ki se je premaknila navzdol, meri 115 m v širino in 50 m v dolžino. Ugrez je globok najmanj 5 m , najmanj toliko, po vsej verjetnosti pa več, je torej povprečno debela tudi splaznela gmota, peta plazu pa je približno na koti 760 m n.m. v strugi Brusnika. Po začetnem drsenju se je zemeljski plaz ustavil, predvsem zaradi sušnega vremena in zaledenosti potoka Brusnik in je tako splaznela masa ostala skoraj suha.

Pri sproženju zemeljskega plazu v strugi potoka Brusnik je na desni strani, gledano navzdol, nastal okoli 5 m visok stranski desni drsni rob, tako da je nastala bočna podpora, kar je sprožilo nastanek še enega velikega plazu na desni strani ob zemeljskem plazu. Prišlo je do začetnih premikov, tako da sta nastala izrazit gornji odlomni rob in desni drsni rob. Tudi za ta plaz velja, da se lahko intenzivira ob močnejših padavinah.



Slika 2: Prečni profil čez plaz Strug (KMTe, 2004, str. 3)

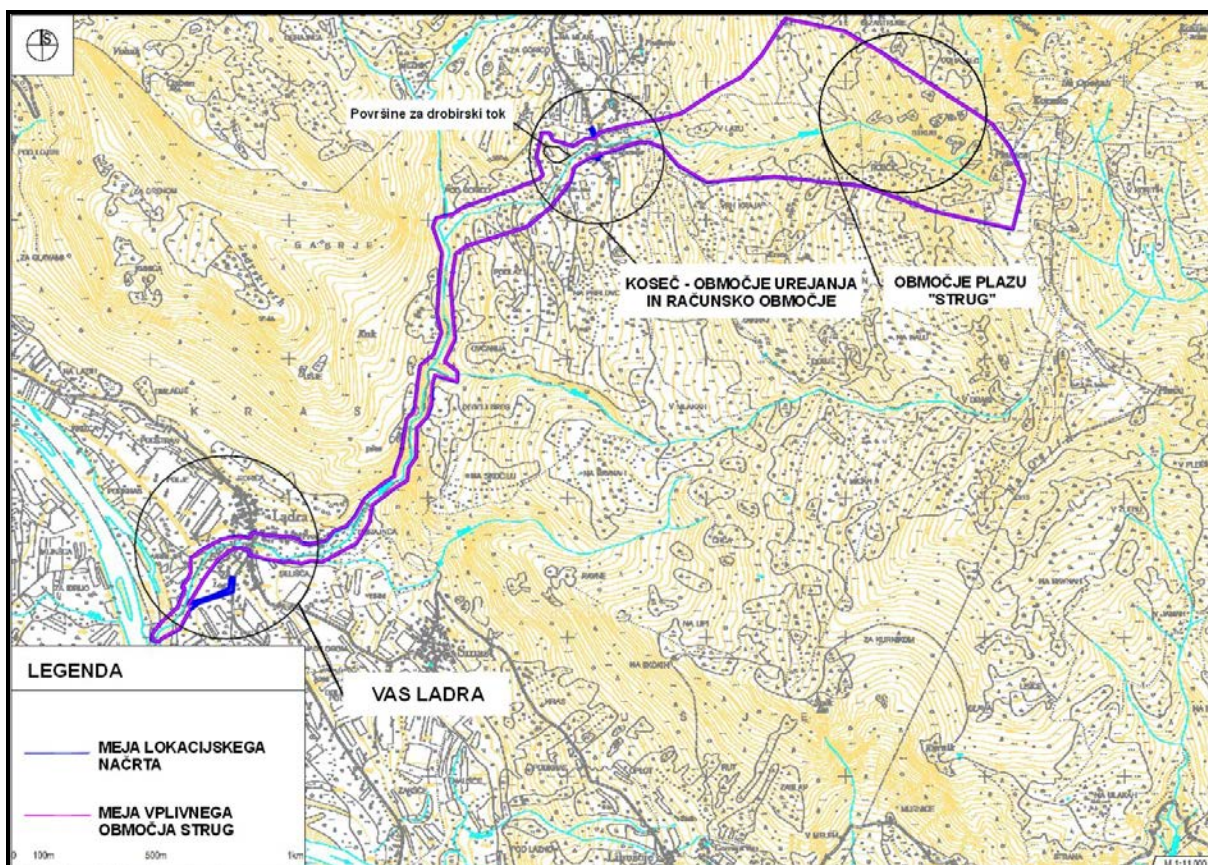
Prvi stalni izviri v dolini Brusnika so nad današnjo peto plazu in ležijo pod premaknjenim gradivom. Brusnik je običajno suh in zbira vodo ob močnejših padavinah in taljenju snega. Zaradi hudourniškega značaja je močno odvisen od vremenskih razmer in lahko zelo naraste. Sedanji pretok vode po tektonsko nastali grapi potoka Brsnika je v spodnjem delu med 3-5 l/s, ob intenzivnih padavinah pa naraste na več kot 1 m³/s. Pretok stoletnih voda je relativno majhen in ne presega 10 m³/s. Ker je podor izrival stari plaz, je bilo ocenjeno, da bodo povišani pretoki Brsnika izpirali plazino. S tem bi se povečal pretok plavin (blato, kamenje) in plavja in s tem možnost za nastanek drobirskih plazov.

Ker so se strokovnjaki zavedali, da so drobirski tokovi nevarni, so že februarja 2002 začeli urejati strugo Brusnika na območju Koseča. Stari most v vasi z odprtino površine 4 m² so nadomestili z novim, ki ima pretočni prerez površine 25 m². Pred ureditvijo je imela struga potoka Brusnik presek med 5-10 m², po ureditvi se je ta povečal na več kot 50 m².

Ob močnejših padavinah 14. in 15. aprila 2002 in tudi kasneje se je odrazil hudourniški značaj potoka Brusnika. Z območja plazu je odnašal material v večjih količinah in ga v obliki drobirskih tokov premeščal skozi utrjeno in preoblikovano strugo skozi vas Koseč. Kosi laporastega apnenca velikosti 2 dm³ se so se kot plaz začeli gibati po strmem, razmočenem in labilnem podornem območju. Pri tem so se mešali z drobno glinasto frakcijo preperelega flišnega laporja. Z dotokom padavinske in izvirne vode so nastali pogoji za nastanek drobirskih tokov. Široki so bili med 3 in 4 m in globoki do 1,5 m. Hitrost se je gibala med 1 in 3 m/s. Drobirski tokovi so vrezali strugo v zemeljski plaz in se nato izlili v Brusnik, a tokrat niso dosegli Koseča. Ob intenzivnih padavinah (nekaj 10 mm na kvadratni meter v nekaj urah) se je gradivo z zgornjega dela plazu večkrat premaknilo, teklo po pobočju navzdol in se zaustavljalo na senožeti; posamezni premiki so ustvarili grapo. To erozijsko zajedo je uporabil večji sunek, ki je nastal 4. maja 2002 in po dolini Brusnika dosegel Koseč. Z varovalnimi ukrepi – povečano pretočnostjo struge so strokovnjaki dosegli, da je tok tekel nemoteno.

Proces nastanka in potovanja skozi vas Koseč je bil bolj intenziven, kot so sprva pričakovali, zato so v letu 2002 načrtovali, da izpeljejo nadaljnje ukrepe in analize za določitev ogroženosti naselij Koseč in Ladra pri izlivu Ročice v Sočo. Lahko bi se zgodilo, da bi

drobirski tokovi večjih dimenzij od 10.000 do 100.000 m³ prepotovali sotesko Brusnika in Ročice, ogrozili pa bi tudi del vasi Ladra tik ob Ročici pred izlivom v Sočo.



Slika 3: Prikaz območja plazu in potek drobirskega toka skozi vasi Koseč in Ladra (Ministrstvo za okolje in prostor, Direktorat za prostor, Urad za prostorski razvoj, 2005, str. 2)

4.2 Realizirani projekti na področju Koseča

4.2.1 Izdelava enodimenzijskega matematičnega modela drobirskih tokov od plazu Strug do naselja Ladre in izdelava ocene prevodnosti urejene struge Brusnika v Koseču za drobirske tokove

4.2.1.1 Vsebina projekta

Namen prvega dela projekta (Četina in sod., 2004) je bil oceniti pretočnost regulirane struge potoka Brusnika za drobirske tokove v naselju Koseč in podati vhodne hidrograme za 2D matematično modeliranje drobirskih tokov na območju Koseča, s katerimi bi podali oceno ogroženosti Koseča zaradi drobirskih tokov s plazu Strug.

Z izdelanim in umerjenim modelom PLAZ1D so modelirali gibanje drobirskih tokov glede na predlagane scenarije njihovega nastanka na plazu Strug. Za računsko območje so v prvem delu projektne naloge upoštevali odsek od plazu Strug po strugi Brusnika do konca vasi Koseč in pri tem uporabili geodetske posnetke terena v letih 2002 in 2003. Na osnovi izmerjenih podatkov na terenu so določili razpoložljivo prostornino materiala na plazu Strug, ki bi se lahko vključila v drobirske tokove. Na podlagi tega so določili volumne in pričakovane konsistence drobirskih tokov, ki bi se lahko pojavili.

Preglednica 3: Pregled računskih primerov in upoštevanih parametrov

Začetni volumen [m ³]	η [Pa*s]	τ [N/m ²]	n_g [sm ^{-1/3}]	Spec. teža mešanice [N/m ³]
1000	24	100	0,2/0,05	19400
5000	24	100	0,2/0,05	19400
15.000	24	100	0,2/0,05	19400
25.000	24	100	0,2/0,05	19400
20.000	5	10	0,2/0,05	17700

V drugem delu so opravili simulacije gibanja dolvodno od vasi Koseč do prodne pregrade nad vasjo Ladra. Osnova za izračune je bil hidrogram, ki so ga izračunali za gibanje začetnega

volumna 25.000 m^3 v profilu tik dolvodno od vasi Koseč iz prvega dela projektne naloge. Simulacije gibanja drobirskega toka in vode so računali ločeno na dveh odsekih:

Odsek A - Od vasi Koseč do sotočja Brusnika in Ročice so računali samo gibanje drobirskega toka. Odsek je dolg 520 m.

Odsek B - Od sotočja do Ladre so upoštevali drobirski tok in dva visokovodna vala na potoku Ročica. Odsek je dolg 1040 m.

Na odseku A so kot začetni pogoj upoštevali omenjeni hidrogram za začetni volumen 25.000 m^3 in enake reološke parametre, kot so jih dobili na osnovi umerjanja pri simulacijah skozi Koseč v prvem delu naloge. Na odseku B so upoštevali sovpadanje hidrograma drobirskega toka, ki rezultira iz začetnega volumna 25.000 m^3 in dveh primerov visokovodnih valov, in sicer Q_{100} za 4,5-urno trajanje in Q_{10} za 4-urno trajanje padavin. Hidrograme Q_{100} in Q_{10} so upoštevali kot začetni pogoj na začetku odseka, ker matematični model ni prirejen za upoštevanje stranskega dotoka vzdolž toka. Tako so simulirali 4 primere, v primerih $Q_{100} +$ drobirski tok in $Q_{10} +$ drobirski tok so upoštevali specifično težo mešanice 11.000 N/m^3 in Manningov koeficient $n_g = 0,1$.

Preglednica 4: Simulacija štirih primerov na odseku B

Primer	Maks.Q [m^3/s]	Skupni volumen [m^3]	Drobirska mešanica [%]	Reološki parametri
Q_{100}	79	1.386.183	0	voda
$Q_{100} +$ drobirski tok	242	1.411.183	1,77	skoraj voda, $\eta = 2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
Q_{10}	28	473.975	0	voda
$Q_{10} +$ drobirski tok	191	498.975	5,01	skoraj voda, $\eta = 2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
Drobirski tok	163	25.000	100	Tako kot na odseku A

4.2.1.2 Dobljeni rezultati pri projektu

V prvem delu so z enodimenzijskim modelom določili hidrogram $Q(t)$ na začetku vasi Koseč, s katerim so bili kasneje opravljeni računi z obema modeloma PLAZ1D in FLO – 2D. Potrdili

so, da regulirana (obstoječa) struga skozi Koseč še lahko prevaja drobirski tok, ki nastane pri sprožitvi ca. 15.000 m³. Za najbolj nevaren možen primer je bil ocenjen volumen 25.000 m³. Tu bi se drobirski tok razlival izven regulirane struge, vendar posledice ne bi bile hude in jih je mogoče preprečiti z enostavnimi ukrepi. Točnost rezultatov je ocenjena na ± 10 %.

V drugem delu so prišli do zaključkov, da matematični model ne more podati merodajnih zaključkov o transportu drobirskega toka, ker ne upošteva odlaganja materiala med potovanjem. Za varnost vasi Ladra je bistven primer Q₁₀₀₊ plaz, saj je najbolj neugoden, kar je razvidno iz preglednice 5, maksimalni pretok v tem primeru je 182 m³/s. Konica je kratkega trajanja, vendar je treba predvideti tudi take razmere. Ta primer je tudi osnova za projektiranje nove zadrževalne pregrade nad vasjo Ladra. Za poplavno varnost vasi Ladra je drobirski tok nevaren le v manjši meri, bolj nevarne so naravne visoke vode, ki prihajajo po potoku Ročica v kombinaciji z drobirskim tokom.

Preglednica 5: Izračunane globine in pretoki za posamezne primere.

	Samo drobirski tok	Q ₁₀	Q ₁₀₊ drobirski tok	Q ₁₀₀	Q ₁₀₀₊ drobirski tok
Maks. kota [m]	2,594	1,519	2,381	2,185	2,973
Q _{max} začetni[m ³ /s]	163	28	191	79	242
Q _{max} končni[m ³ /s]	70	28	103	78	182

4.2.2 Dvodimenzijski matematični model drobirskih tokov na območju Koseča z oceno ogroženosti naselja Koseč zaradi njihovega delovanja

4.2.2.1 Vsebina projekta

Pri tem projektu (VGB, 2004) so z dvodimenzijskim matematičnim modelom FLO – 2D določili ogroženost vasi Koseč pred delovanjem drobirskih tokov. Modelirali so odsek dolžine 380 m, in sicer za dve geometriji terena (obstoječe stanje in nameravana ureditev). Za geometrijo obstoječega stanja so uporabili projekt za ureditev potoka Brusnika skupaj s spremljajočim geodetskim posnetkom v merilu 1 : 500 iz februarja 2002 (Inštitut za vode, 2004). Kasneje se je izkazalo, da opravljene ureditve nekoliko odstopajo od projektiranih,

vendar vseeno predstavljajo dobro osnovo za primerjavo in analizo stanja. Načrtovano (predlagano) ureditev, ki je bila zasnovana na osnovi rezultatov modela za obstoječe stanje ureditve, so povzeli po projektu Inštituta za vode (2004). Ta geometrija se od obstoječe razlikuje po zidu na desnem bregu, poglobitvi struge med profiloma 6 in 17, po novem mostu in pregradi za omejevanje pretoka z usmerjevalnim nasipom v profilu 3 ter ureditvi razlivnega območja za drobirske tokove desno na območju profila 3 (priloga 10). Območje površine ca. 6,5 ha so diskretizirali s pravokotno mrežo 65239 celic kvadratne oblike, velikosti 1 * 1 m. Kot osnovo za generacijo digitalnega modela reliefa so uporabili geodetski posnetek iz marca 2002 v merilu 1:2000 (Geodetski inštitut Slovenije).

S pomočjo video posnetkov so kot v prejšnjem projektu (1D model) umerili tudi 2D model in določili koeficiente, ki so bili enaki kot pri 1D modelu in vršili račune za iste volumne splazitev (1000, 5000, 15.000 in 25.000 in 20.000 m³ (moker)). Volumen 20.000 m³ predstavlja primer bolj razmočenega toka s $C_v = 0,45$ s prostornino razpoložljive vode 11.000 m³. Za ta primer so uporabili ocenjeni vrednosti $\tau = 10$ Pa in $\eta = 5$ Pas, ki sledita iz nižje vrednosti C_v . Ta primer so obravnavali, ker daje višje vrednosti maksimalnih pretokov, vendar se je izkazalo, da so zaradi manjših izgub maksimalne gladine nižje kot v primeru sprostitve 25.000 m³ drobirskega toka ob upoštevanju umerjenih parametrov. Ker so opazili, da je sploščanje vala zaradi retenzijskih vplivov znaten, so opravili še račun s konstantnim dotokom 500 m³/s, ki ustreza maksimalnemu izračunanemu dotoku pri sprostitvi 25.000 m³ drobirskega toka. Uporabljeni podatki so razvidni tudi iz preglednice 3 na strani 23.

4.2.2.2 Dobljeni rezultati pri projektu

Po opravljenih izračunih so ugotovili, da je ob sprostitvi 25.000 m³ materiala in v primeru stalnega dotoka 500 m³/s ogrožen le manjši del naselja Koseč. Objekte, ki ležijo v dosegu sprostitve 25.000 m³ drobirskega toka, so označili kot neposredno ogrožene oz. nevarne. Objekte, ki ležijo izven tega dosega, vendar znotraj območja dosega drobirskega toka s konstantnim pretokom 500 m³/s, pa so označili kot potencialno ogrožene oz. manj varne.

Opravljeni posegi (ureditev struge ter nadvišanje brežin) leta 2002 je nedvomno izjemno pripomogel k varnosti naselja Koseč, saj zagotavlja varnost celotnemu naselju do prostornin

sproščanja ca. 15.000 m³, kar je ca. 15-krat več od doslej opazovanih največjih prostornin drobirskih tokov na obravnavani lokaciji.

Ker je bil cilj zagotoviti varnost celotnemu naselju Koseč tudi pri prostorninah drobirskih tokov 25.000 m³, so julija 2004 na osnovi vmesnih rezultatov predložene študije zasnovali novo ureditev. Iz rezultatov modelov so ugotovili, da predlagani dodatni ukrepi zagotavljajo varnost vsem objektom, razen enega, ki pa leži znotraj potencialno ogroženega območja.

Natančnost modela v primeru sprostitve 25.000 m³ drobirskega toka znaša v povprečju ca. 65 cm, pri čemer ni upoštevana napaka zaradi določitve oblike hidrograma. Če uporabimo rezultate za primer stalnega pretoka 500 m³/s, v veliki meri izločimo morebitne napake oz. negotovosti v zvezi s tvorjenjem in obliko hidrograma ter morebiten vpliv precenjenih retenzijskih učinkov v modelu.

5 PRIMERJAVA IN ANALIZA REZULTATOV PROGRAMOV PCFLOW2D in FLO-2D NA OBMOČJU VASI KOSEČ

Če primerjamo rezultate dveh različnih programov za isti primer, moramo zagotoviti, kolikor se le da, enake vhodne podatke, ki jih programa potrebujeta za račun. Nastale razlike med rezultati so tako posledica samo matematičnega modela, ki ga posamezen program uporablja oz. sposobnosti posameznega modela za opis vseh fizikalnih pojavov, ki se dogajajo v naravi.

Pri primerjavi rezultatov programov PCFLOW2D in FLO-2D smo zato pri računu uporabili enake vhodne podatke, in sicer: kote terena, koeficiente, ki jih programa rabita za računanje, vhodne hidrograme in gostoto numerične mreže $1*1$ m. Vse te podatke in rezultate programa FLO-2D, ki smo jih uporabili pri primerjavi, smo pridobili pri g. Tomažu Hojniku, ki je opravil izračune s programom FLO-2D v sklopu projekta Dvodimenzijski matematični model drobirskih tokov na območju Koseča z oceno ogroženosti naselja Koseč zaradi njihovega delovanja (2004). Ker so v projektu s programom FLO-2D opravili izračune s predvidenimi volumni 25.000 m^3 , 15.000 m^3 , 5000 m^3 , 1000 m^3 , s konstantnim dotokom $500\text{ m}^3/\text{s}$ in volumnom $20.000\text{ m}^3/\text{s}$ ter z nekoliko spremenjenimi reološkimi podatki, smo morali iste primere izračunati tudi s programom PCFLOW2D. Tako smo izračunali 12 primerov, ki se razlikujejo po reoloških podatkih drobirskega toka, kotah terena in vhodnih hidrogrameh. Pri vseh primerih smo uporabili časovni korak $\Delta t = 0,1\text{ s}$, le pri konstantnem pretoku $Q = 500\text{ m}^3/\text{s}$ je bil časovni korak $\Delta t = 0,25\text{ s}$.

Največ pozornosti smo posvetili primeroma z volumnom zdrs 25.000 m^3 in konstantnim dotokom $500\text{ m}^3/\text{s}$. Zdrs 25.000 m^3 naj bi predstavljal maksimalno pričakovano prostornino sprostitve drobirskega toka, konstantni dotok $500\text{ m}^3/\text{s}$ pa ustreza maksimalnemu izračunanemu dotoku pri sprostitvi 25.000 m^3 . Zadnji primer odpravlja vpliv sploščanja vala, ki nastaja zaradi retenzijskih vplivov ali ker model ne more dovolj natančno opisati vseh fizikalnih pojavov, ki se dogajajo v naravi.

Obravnavani sta tudi dve ureditvi območja in sicer obstoječa ureditev, ki predstavlja ureditev struge in območja okoli nje po projektu iz leta 2002 (Inštitut za vode, 2002) in načrtovana

ureditev, pri kateri so na osnovi rezultatov obstoječega stanja dodani objekti in rešitve, ki bi pozitivno vplivale na potek drobirskih tokov in zmanjšale ogroženost ljudi in njihovega premoženja. Načrtovana ureditev se od obstoječe ureditve razlikuje po dodanem zidu na desnem bregu, poglobitvi struge med profiloma 6 in 17, pregradi za omejevanje pretoka z usmerjevalnim nasipom v profilu 3 in ureditvi razlivnega območja za drobirske tokove desno od profila 3. Vse spremembe so razvidne v prilogi 10 na koncu diplomske naloge.

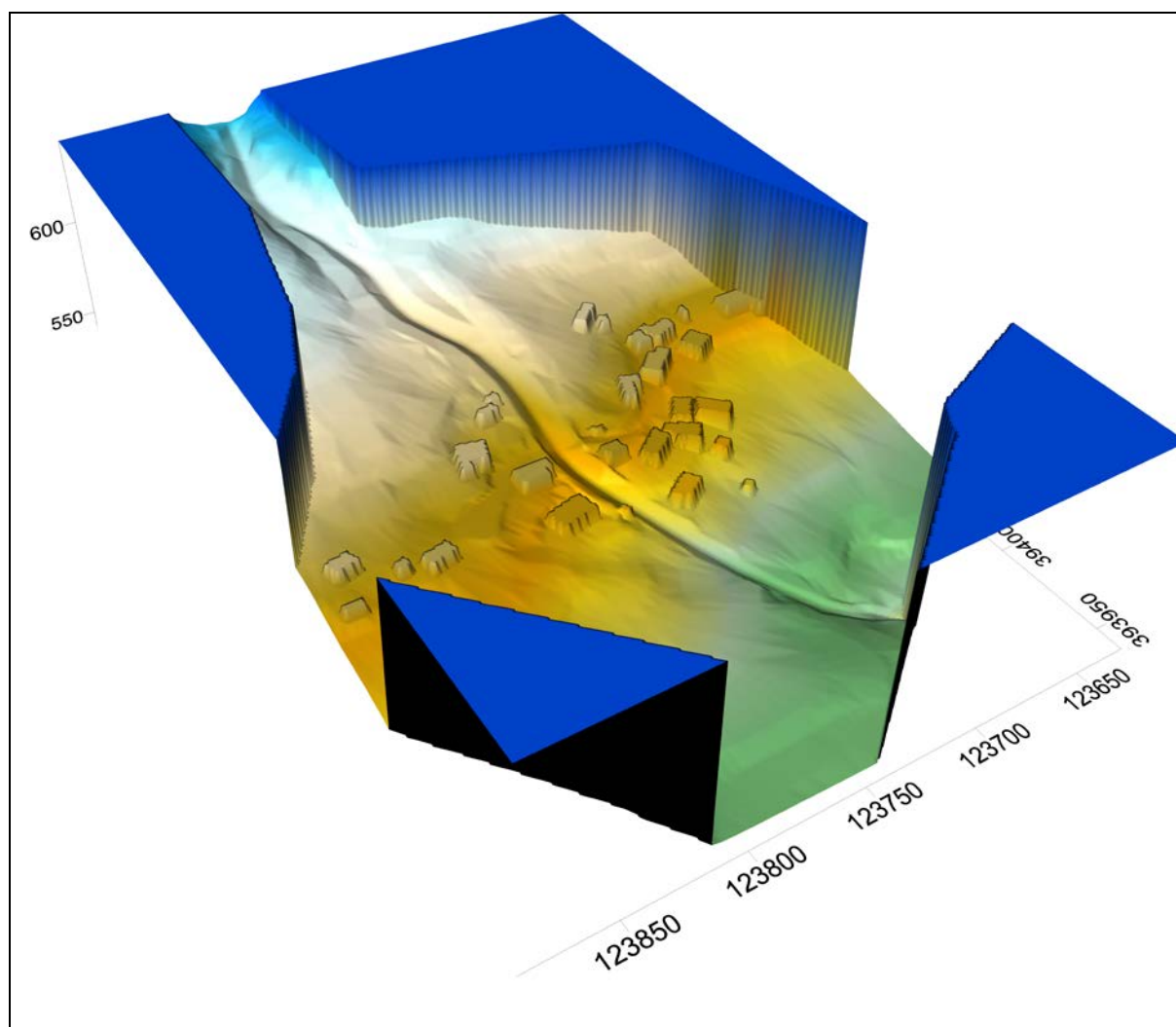
Reološki podatki so bili za vse primere enaki in so znašali:

- Manningov koeficient $n_g = 0,05 \text{ sm}^{-1/3}$,
- koeficient laminarnega upora $K = 1000$,
- mejna strižna trdnost mešanice drobirja $\tau = 100 \text{ Pa}$,
- viskoznost mešanice drobirja $\eta = 24 \text{ Pas}$,
- specifična teža trdne faze mešanice $\gamma_s = 27,14 \text{ kN/m}^3$,
- prostorninska koncentracija trdne faze $C_v = 0,55$,
- specifična teža mešanice (trdna faza + voda) $\gamma_m = 19,4 \text{ kN/m}^3$,

razen pri primeru 20.000 m^3 , ki predstavlja bolj razmočen tok in se določeni koeficienti razlikujejo od prej navedenih ($C_v = 0,45$, $\tau = 10 \text{ Pa}$, $\eta = 5 \text{ Pas}$ in $\gamma_m = 17,7 \text{ kN/m}^3$). Volumen 20.000 m^3 je določen na osnovi razpoložljive prostornine vode (11.000 m^3) in drobirskega materiala.

S pomočjo 1D programa (PLAZ1D) so v projektu z naslovom Izdelava enodimenzijskega matematičnega modela drobirskih tokov od plazu Strug do naselja Ladre in izdelava ocene prevodnosti urejene struge Brusnika v Koseču za drobirske tokove (Četina in sod., 2004) določili vhodne hidrograme, ki smo jih uporabili kot vhodne podatke v začetnem profilu. Iste hidrograme za posamezen primer so uporabili tudi pri računanju s programom FLO-2D leta 2004. Ti so bili za posamezne volumne različni, medtem ko hidrograma za konstantni dotok $500 \text{ m}^3/\text{s}$ ne potrebujemo, saj tu tok v računsko območje doteka neprekinjeno in po vzpostavitvi stacionarnega stanja enak pretok tudi odteka, tako da vtočni hidrogram predstavlja le vodoravna premica.

5.1 Primerjava rezultatov za obstoječe stanje terena

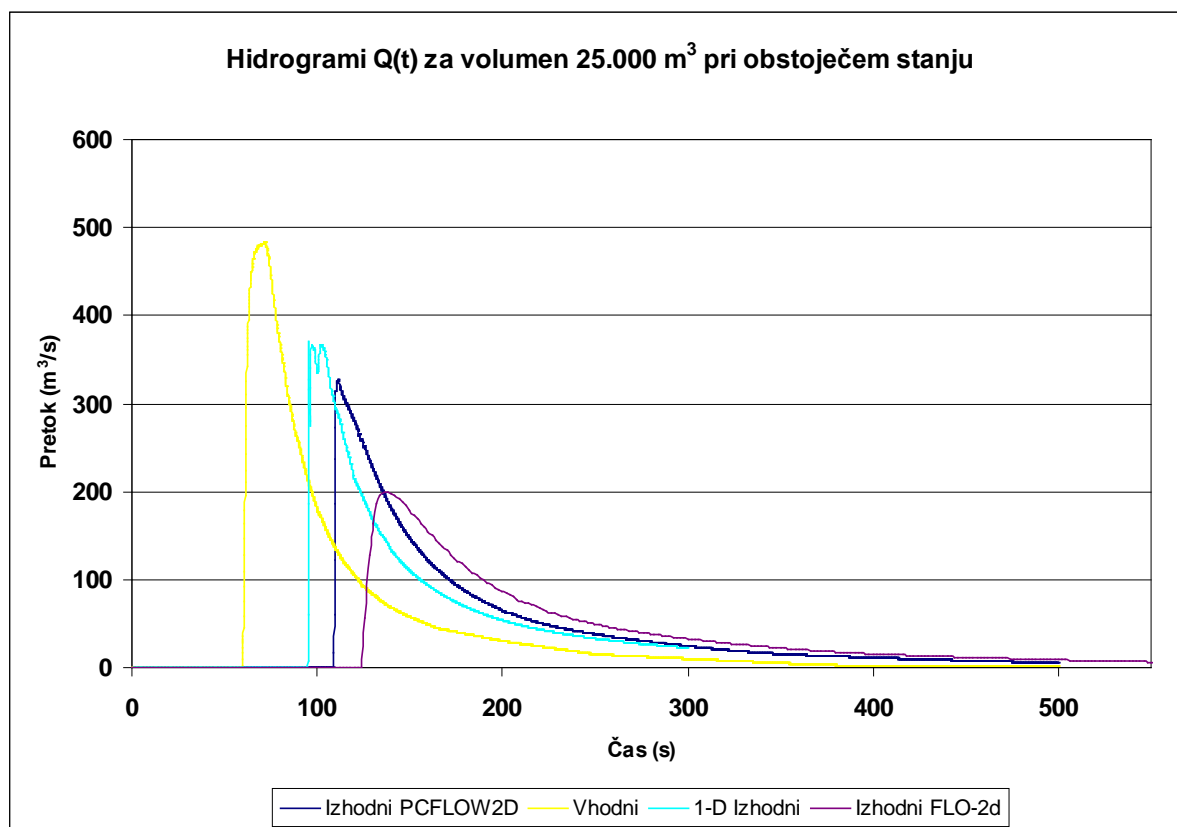


Slika 4: Prikaz 3D modela za obstoječe stanja terena

5.1.1 Sproščanje drobirskega toka s prostornino 25.000 m³

Pri tem primeru smo kot vhodni podatek uporabili hidrogram na začetku vasi Koseč v profilu 29, dobljen z 1D modelom. Ta nam pokaže, da drobirski tok pride v računsko območje v času 58 s in ima v 72 s svoj maksimum, ki znaša 483 m³/s, potem pa volumen drobirskega toka pada proti 0 in se po 500 s zelo približa 0. Pri takšnem vhodnem hidrogramu nam program PCFLOW2D izračuna izhodni hidrogram na iztoku iz območja (približno v profilu 1), pri katerem pretok drobirskega toka začne naraščati v 109 s, maksimum doseže v 111,4 s in znaša 327,58 m³/s, potem pa pada proti nič. Drobirski tok torej prepotuje računsko območje v 51 s.

Hidrogram, ki nam ga izračuna program FLO-2D na izhodu iz računskega območja izračuna, da drobirski tok prepotuje računsko območje v 68 s in tako pretok začne naraščati šele v 126 s, doseže svoj maksimum v 138 s, in sicer pri pretoku $199,02 \text{ m}^3/\text{s}$. Pri tej prostornini drobirskega toka nam je bil dosegljiv tudi iztočni hidrogram 1D modela, ki je bolj primerljiv s hidrogramom programa PCFLOW2D, saj ima maksimalen pretok $370 \text{ m}^3/\text{s}$, ki ga doseže v 96 s, računsko območje pa prepotuje v 37 s. V razlagah o razlikah v izhodnih hidrogramih modelov PLAZ1D in FLO-2D so navajali (Četina in sod., 2004), da je vzrok za razlike v tem, da 2D model upošteva razlivanje materiala preko robov reguliranega kanala, model 1D pa te možnosti nima; ko se gladina dvigne preko roba struge (do maksimalno izračunane kote), model avtomatično podaljša stene kanala vertikalno, zato ima izhodni hidrogram 1D modela nižje pretoke, drobirski tok pa hitreje prepotuje dano območje. Izhodni hidrogram programa PCFLOW2D to trditev ovrže, saj se bolj približa vrednostim hidrograma 1D programa kot vrednostim programa FLO-2D. Vzroke, zakaj pride do razlik, je zato potrebno iskati drugje.



Grafikon 1: Hidrogram Q(t) za volumen 25.000 m^3 pri obstoječem stanju

Pri dosegih ni bistvene razlike do profila 20, saj se območji dosega drobirskih tokov do tam skoraj ujemata. Od profila 20 pa do profila 7 pride do razlik, saj se po rezultatih programa PCFLOW2D drobirski tok dvakrat razlije iz urejene struge. Prvič del drobirskega toka zapusti strugo po 20 profilu, oblije dve hiši in nadaljuje pot izven struge. Večina toka gre po strugi naprej, pri profilu 11 pa del mase zopet zapusti strugo, popolnoma oblije 1 objekt in zopet ustvari tok izven struge. Od profila 7 dolvodno so izračunani doseg drobirskih tokov obeh modelov zopet podobni brez večjih odstopanj. Dosegi modela FLO-2D so po celotnem območju praktično v strugi, le na nekaterih odsekih preplavijo in tako ogrozijo 3 objekte, vendar jih nikoli popolnoma ne oblijejo. Oba dosega, tako za primer programa PCFLOW2D kot za FLO-2D, sta izrisana v prilogi 11.

Ker se maksimalne globine drobirskih tokov praviloma pojavljajo v osi struge, smo izrisali vzdolžen potek gladin v osi struge in določili maksimalno višino gladine v vseh devetindvajsetih profilih. Rezultati kažejo, da daje PCFLOW2D najvišje gladine, FLO-2D najnižje, medtem ko PLAZ1D srednje, ki pa so bliže gladinam iz modela FLO-2D. Maksimalna razlika gladin med 2D modeloma je 2,06 m, in sicer v profilu 1, medtem ko je povprečna razlika gladin v vseh profilih 92 cm. Maksimalna razlika med PCFLOW2D in PLAZ1D je 3,64 m v profilu 5, povprečna razlika pa 80 cm. Pri primerjavi FLO-2D in PLAZ1D pa je maksimalna razlika 2,32 m, povprečna pa 13 cm. Pri pregledu globin drobirskega toka rezultati pokažejo, da je povprečna globina materiala po območju 5,22 m pri programu PCFLOW2D, 4,30 m pri FLO-2D in 4,47 m pri PLAZ1D. Potek gladin in globine v določenem profilu so prikazane v preglednici 6 in izrisane v prilogi 1.

Preglednica 6: Kote gladin, globine drobirskega toka in razlika globin za volumen 25.000 m³

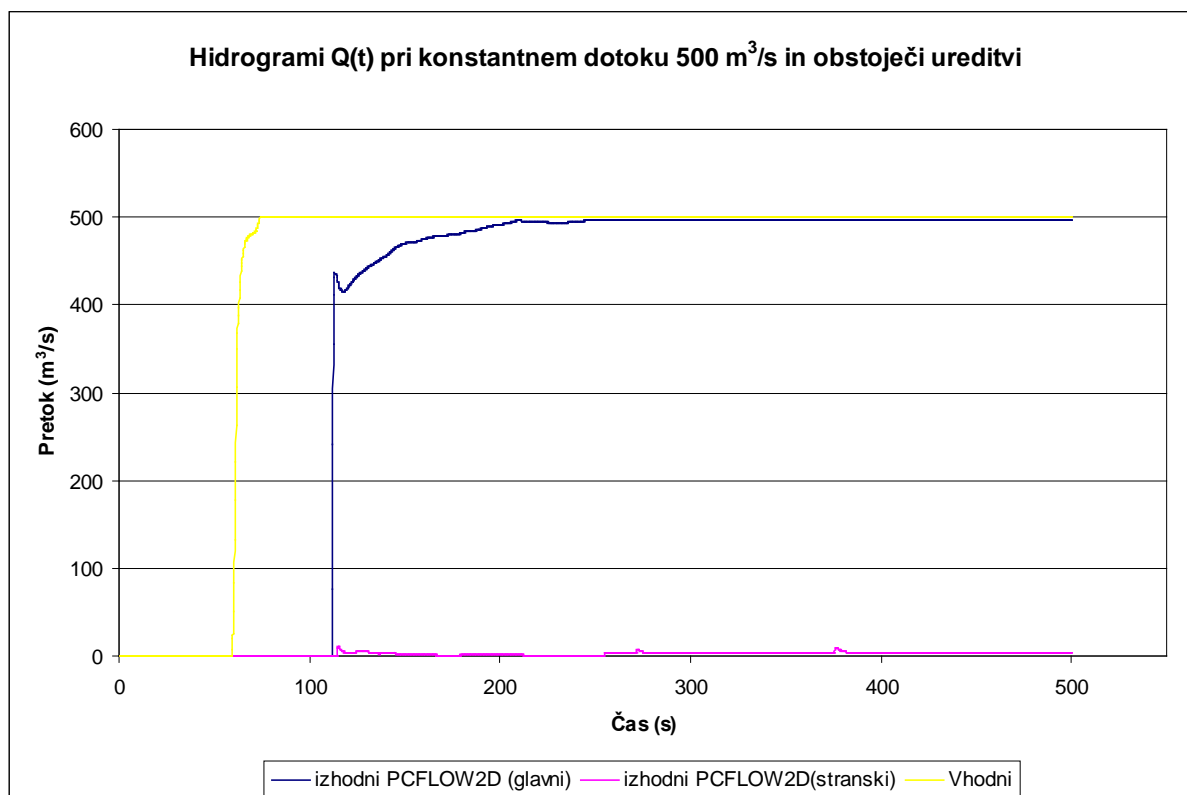
Profil	25.000 m ³ obstoječa ureditev						Razlika v globinah [m]					
	PCFLOW2D		FLO-2D		PLAZ 1D		PCFLOW2D-FLO-2D		PCFLOW2D-PLAZ1D		PLAZ1D-FLO-2D	
	Kote [m.n.v]	Globina [m]	Kote [m.n.v]	Globina [m]	Kote [m.n.v]	Globina [m]	Abs. [m]	Rel. [%]	Abs. [m]	Rel. [%]	Abs. [m]	Rel. [%]
1	550	5,03	548,3	2,97			2,06	41				
2	553,87	4,78	552,55	3,45	553,76	4,66	1,32	28	0,11	2	1,21	26
3	556,44	4,99	555,06	3,62	556,34	4,90	1,38	28	0,10	2	1,28	26
4	559,72	4,83	558,29	3,40	557,93	3,04	1,43	30	1,79	37	-0,36	-12
5	563,89	5,13	562,57	3,81	560,25	1,49	1,32	26	3,64	71	-2,32	-156
6	567,68	5,25	566,17	3,75	566	3,58	1,51	29	1,68	32	-0,17	-5

7	570,50	5,41	569,1	4,01	569,6	4,51	1,40	26	0,90	17	0,50	11
8	574,42	5,91	572,46	3,95	573,55	5,04	1,96	33	0,87	15	1,09	22
9	575,95	5,91	574,03	3,99	574,84	4,80	1,92	32	1,11	19	0,81	17
10	577,93	5,49	576,75	4,31	576,96	4,52	1,18	21	0,97	18	0,21	5
11	579,58	5,23	578,9	4,55	578,68	4,33	0,68	13	0,90	17	-0,22	-5
12	580,91	4,83	580,57	4,50	580,37	4,30	0,34	7	0,54	11	-0,20	-5
13	581,67	4,76	581,29	4,38	581,56	4,65	0,38	8	0,11	2	0,27	6
14	584,23	4,79	583,83	4,39	583,93	4,49	0,40	8	0,30	6	0,10	2
15	585,54	4,88	585,15	4,49	584,98	4,32	0,39	8	0,56	11	-0,17	-4
16	588,12	4,95	587,65	4,48	587,83	4,66	0,47	10	0,29	6	0,18	4
17	592,20	5,51	591,24	4,54	591,75	5,05	0,96	18	0,45	8	0,51	10
18	596,28	6,26	594,68	4,66	594,98	4,96	1,60	26	1,30	21	0,30	6
19	598,14	5,89	596,87	4,61	597,69	5,43	1,27	22	0,45	8	0,82	15
20	600,22	5,22	599,68	4,68	599,72	4,72	0,54	10	0,50	10	0,04	1
21	603,89	4,90	603,34	4,35	603,26	4,27	0,55	11	0,63	13	-0,08	-2
22	607,20	5,77	606	4,58	606,77	5,35	1,20	21	0,43	7	0,77	14
23	610,54	6,05	609,16	4,68	609,16	4,68	1,38	23	1,38	23	0,00	0
24	612,84	5,21	612,24	4,61	611,91	4,28	0,60	12	0,93	18	-0,33	-8
25	614,67	4,67	614,78	4,78	614,04	4,04	-0,11	-2	0,63	14	-0,74	-18
26	618,68	4,61	618,45	4,38	618,08	4,01	0,23	5	0,60	13	-0,37	-9
27	623,34	4,80	623,27	4,73	623,04	4,50	0,07	1	0,30	6	-0,23	-5
28	628,10	6,36	627,17	5,43	627,86	6,12	0,93	15	0,24	4	0,69	11
29	630,56	4,00	631,32	4,77			-0,76	-19				
Največja		6,36		5,43		6,12	2,06	33	3,64	71	2,32	26
Povprečje		5,22		4,30		4,47	0,92	17	0,80	15	0,13	-2

5.1.2 Konstanten dotok drobirskega toka 500 m³/s

Pokazalo se je, da je pri 2D modelih sploščanje vala zaradi retenzijskih vplivov znatno, možno pa je tudi, da model ne more dovolj natančno opisati vseh fizikalnih pojavov, ki se dogajajo v naravi in je vpliv sploščanja precenjen. Zato se je izvedel tudi račun s konstantnim dotokom 500 m³/s, ki bi te nepravilnosti odpravil. Ker je bil pretok 500 m³/s določen iz maksimalnega izračunanega dotoka pri sprostitvi 25.000 m³, ima ta primer vhodni hidrogram v naraščajočem delu enak kot primer pri volumnu 25.000 m³, ko pa doseže maksimalni pretok 500 m³/s ostane le-ta konstanten. Tako v vhodnem hidrogramu material pride na računsko območje v 58 s in maksimum 500 m³/s doseže v 74 s. Drobirski tok pri programu PCFLOW2D potrebuje 53 s, da prepotuje računsko območje in svoj maksimum, ki znaša 496 m³/s, doseže v 210 s. Pojavita se izhodna hidrograma na dveh iztočnih robovih, ker del mase prelije strugo in zapusti računsko območje v drugi smeri, kot jo ima struga. Zato ima izhodni hidrogram maksimum nekoliko pod 500 m³/s, saj del mase zapusti računsko območje drugje in ne v

profilu 1, kjer je glavni iztok iz območja v smeri struge. Izhodnega hidrograma za program FLO-2D nismo mogli dobiti, vendar lahko iz prejšnjega primera predvidevamo, da masa skozi območje potuje dlje časa.



Grafikon 2: Hidrogram Q(t) za konstanten dotok 500 m³/s pri obstoječem stanju

Dosegi drobirskega toka se med 2D programoma pri tem primeru precej razlikujejo. Podoben potek dosegov imata programa le od profila 29 (vhod na računsko območje) pa do profila 20, torej približno 140 m, potem pa tok, ki ga izračuna PCFLOW2D, zapusti strugo, popolnoma oblije 7 objektov, 3 objekte ogrozi in se zopet približa dosegu drobirskega toka programa FLO-2D v profilu 6, vendar je še vedno večji, tudi do 10 m. Nekaj materiala odteče iz računskega območja na drugem koncu, kot je glavni iztok. Doseg programa FLO-2D je v vseh delih manjši in delno ogrozi 7 objektov, medtem ko prelije samo dva. Dosegi drobirskega toka za posamezne programe so izrisani v prilogi 12. Tu lahko tudi primerjamo globino drobirskega toka med obema programoma. Dobljeni rezultati so podani v obliki con z isto globino drobirskega toka in so prikazani v prilogah 13 in 14. Razvidno je, da so cone, ki predstavljajo globino nad 2 m, relativno primerljive, saj so večinoma znotraj struge, kar je

dobro. Cone programa PCLOW2D so seveda nekoliko večje, saj je tudi doseg večji. Velike razlike pridejo pri conah z globino 1 do 2 m ter 0 do 1 m, kjer obsegajo veliko večjo površino kot pri programu FLO-2D.

Pri poteku gladin v vzdolžnem prerezu struge je zaradi večjega dosega pri programu PCFLOW2D pričakovati tudi višje gladine. To kaže priloga 2, kjer so gladine programa PCFLOW2D v povprečju višje za 1,26 m od gladin, ki jih poda FLO-2D. Največja razlika med gladinami nastopi v profilu 26, in sicer 1,94 m. Globine drobirskega toka po profilih se tudi razlikujejo glede na uporabljen program, in sicer znašajo v povprečju 6,11 m pri PCFLOW2D, pri FLO-2D pa 4,84 m, če gledamo globine v posameznih profilih.

Preglednica 7: Kote gladin, globine drobirskega toka in razlika globin pri konstantnem dotoku $500 \text{ m}^3/\text{s}$

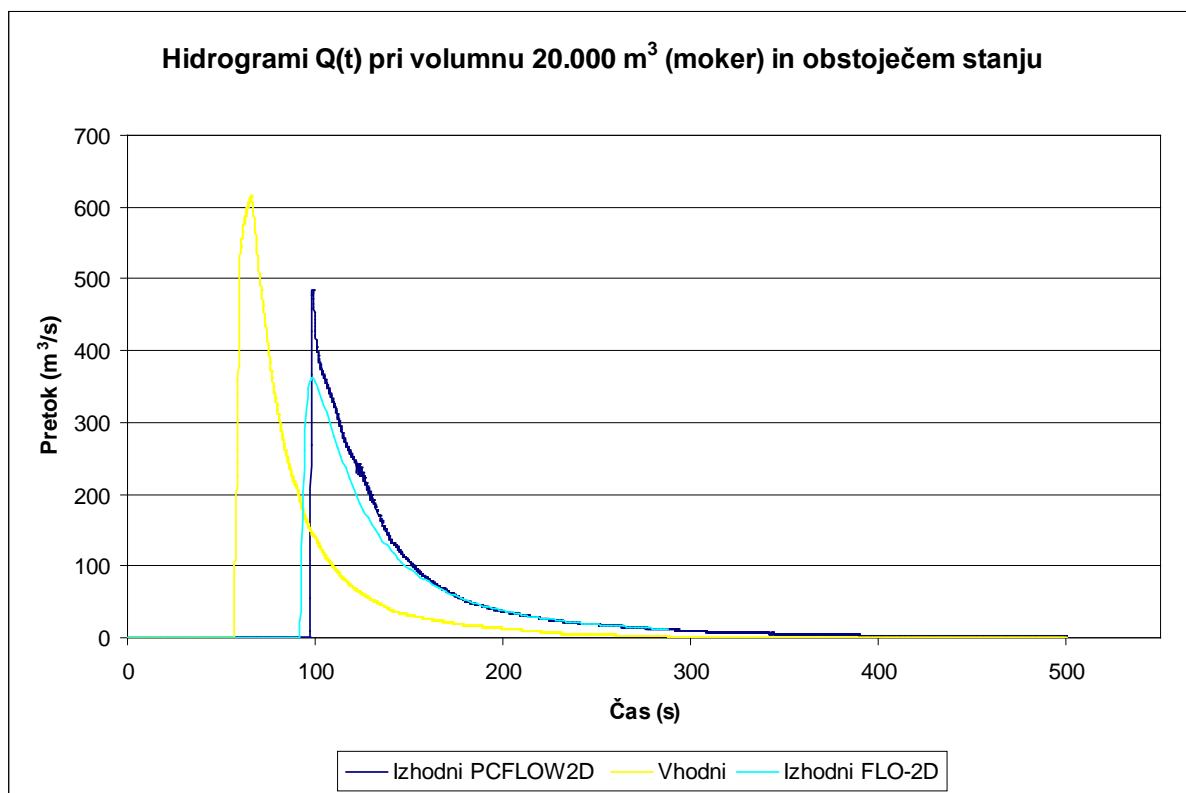
Profil	Konstantni dotok $500 \text{ m}^3/\text{s}$ obstoječe stanje				Razlika v globinah PCFLOW2D – FLO-2D	
	PCFLOW2D		FLO-2D		Abs. [m]	Rel. [%]
	Kote [m.n.v]	Globina [m]	Kote [m.n.v]	Globina [m]		
1	551,02	5,69	549,15	3,82	1,87	33
2	554,74	5,65	553,27	4,17	1,47	26
3	556,56	5,11	555,79	4,35	0,77	15
4	559,92	5,03	558,99	4,10	0,93	18
5	564,23	5,46	563,24	4,48	0,99	18
6	568,25	5,83	566,79	4,37	1,46	25
7	570,72	5,62	569,72	4,63	1,00	18
8	574,99	6,48	573,12	4,61	1,87	29
9	575,93	5,89	574,72	4,68	1,21	20
10	579,20	6,75	577,48	5,04	1,72	25
11	581,09	6,74	579,66	5,31	1,43	21
12	583,06	6,98	581,33	5,26	1,73	25
13	583,54	6,64	582,05	5,14	1,49	22
14	585,78	6,34	584,53	5,09	1,25	20
15	587,09	6,43	585,83	5,17	1,26	20
16	589,65	6,48	588,31	5,14	1,34	21
17	593,09	6,40	591,88	5,18	1,21	19
18	596,53	6,50	595,3	5,28	1,23	19
19	598,27	6,01	597,45	5,19	0,82	14
20	601,37	6,36	600,21	5,21	1,16	18
21	605,12	6,13	603,77	4,78	1,35	22
22	608,01	6,59	606,36	4,94	1,65	25
23	611,17	6,68	609,46	4,98	1,71	26

24	613,72	6,08	612,48	4,85	1,24	20
25	615,96	5,95	614,98	4,98	0,98	16
26	620,54	6,47	618,6	4,53	1,94	30
27	624,43	5,90	623,39	4,85	1,04	18
28	628,66	6,91	627,28	5,54	1,38	20
29	630,49	3,94	631,39	4,84	-0,90	-23
Največja		6,98		5,54	1,94	33
Povprečje		6,11		4,84	1,26	20

5.1.3 Sproščanje drobirskega toka s prostornino 20.000 m³ (moker)

Ta primer je bilo potrebno vključiti v projekt (Četina in sod., 2004), ker velja, da bolj razmočen tok daje višje vrednosti maksimalnih pretokov, vendar se je s programom FLO-2D izkazalo, da so zaradi manjših izgub maksimalne gladine nižje kot v primeru sprostitve 25000 m³ drobirskega toka. To za rezultate programa PCFLOW2D ne velja, saj da primer sprostitve 20.000 m³ (moker) v osi struge višje gladine od primera sprostitve 25.000 m³. Pokaže se, da ima moker drobirski tok višje gladine v 9 profilih celo od primera s konstantnim dotokom 500 m³/s, vendar vseeno manjši doseg. Te razlike so razvidne iz preglednice 8 in priloge 15, kjer so izrisani posamezni dosegi.

Po hidrogramu, ki smo ga uporabljali kot vhodnega, je masa v območje začela vdirati po 56 s, po sprožitvi s plazišča Strug, svoj maksimalni pretok 618,84 m³/s pa je dosegla v 66 s. Izhodni hidrogrami programov so si po času, v katerem začetni val prepotuje območje, zelo podobni, saj pri PCFLOW2D material prepotuje območje v 41 s, pri FLO-2D pa v 37 s. Pri maksimalnih pretokih se rezultati razlikujejo, in sicer ima PCFLOW2D maksimum v 99 s in znaša 485 m³/s, medtem ko ima FLO-2D maksimalen pretok 361,32 m³/s v 98 s.



Grafikon 3: Hidrogram Q(t) za volumen 20.000 m³ (moker) pri obstoječem stanju

Že na začetku je omenjeno, da pri tem primeru PCFLOW2D daje opazno višje gladine kot pa FLO-2D. To kaže priloga 3, v kateri so prikazani poteki gladin v vzdolžnem prerezu, ki gre po osi struge. V povprečju je razlika gladin, ki jih podata programa, 2 m, največja razlika pa je 3,7 m in se pojavi v profilu 21. Povprečne globine pri PCFLOW2D znašajo 5,82 m, pri FLO-2D pa 3,81, povprečna razlika torej znaša 2,01 m.

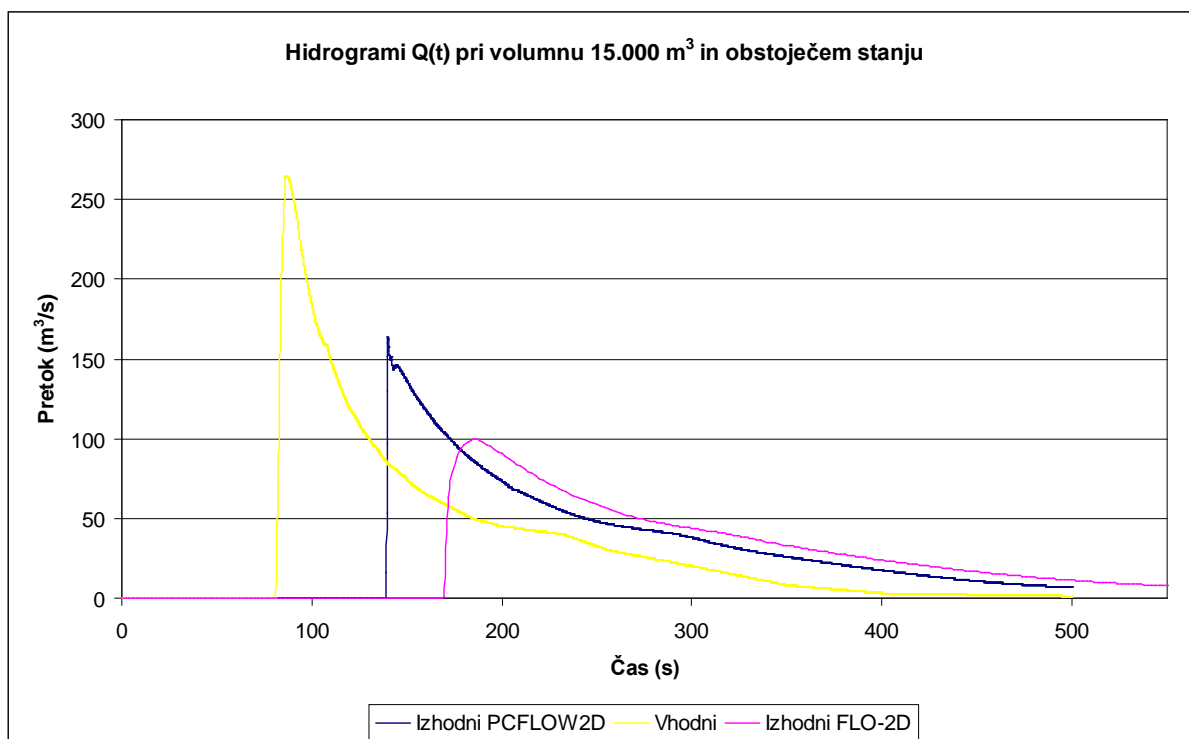
Preglednica 8: Kote gladin, globine drobirskega toka in razlika globin za volumen 20.000 m³ (moker)

Profil	500 m ³ /s	25.000 m ³	20.000 m ³ moker, obstoječe stanje				Razlika v globinah za 20.000 m ³	
	PCFLOW2D	PCFLOW2D	PCFLOW2D		FLO-2D		PCFLOW2D – FLO-2D	
	[m.n.v]	[m.n.v]	Kote [m.n.v]	Globina [m]	Kote [m.n.v]	Globina [m]	Abs. [m]	Rel. [%]
1	551,02	550	551,13	5,80	548,13	2,80	3,00	52
2	554,74	553,87	554,38	5,28	552,25	3,15	2,13	40
3	556,56	556,44	556,62	5,18	554,74	3,30	1,88	36
4	559,92	559,72	559,92	5,04	557,96	3,07	1,96	39
5	564,23	563,89	564,24	5,47	562,25	3,49	1,99	36
6	568,25	567,68	567,97	5,55	565,82	3,40	2,15	39
7	570,72	570,50	570,68	5,59	568,74	3,65	1,94	35
8	574,99	574,42	574,44	5,93	572,08	3,57	2,36	40
9	575,93	575,95	575,64	5,60	573,63	3,59	2,01	36
10	579,20	577,93	578,50	6,06	576,35	3,91	2,15	36
11	581,09	579,58	580,80	6,45	578,49	4,14	2,31	36
12	583,06	580,91	582,42	6,35	580,14	4,07	2,28	36
13	583,54	581,67	582,89	5,98	580,86	3,95	2,03	34
14	585,78	584,23	585,52	6,07	583,39	3,95	2,13	35
15	587,09	585,54	586,69	6,03	584,71	4,05	1,98	33
16	589,65	588,12	589,32	6,15	587,2	4,03	2,12	34
17	593,09	592,20	593,23	6,53	590,74	4,04	2,49	38
18	596,53	596,28	596,41	6,39	594,14	4,12	2,27	36
19	598,27	598,14	598,69	6,44	596,31	4,05	2,38	37
20	601,37	600,22	601,75	6,75	599,09	4,09	2,66	39
21	605,12	603,89	605,84	6,85	602,77	3,78	3,07	45
22	608,01	607,20	608,12	6,69	605,38	3,96	2,74	41
23	611,17	610,54	610,84	6,36	608,51	4,03	2,33	37
24	613,72	612,84	613,02	5,39	611,57	3,94	1,45	27
25	615,96	614,67	615,03	5,03	614,06	4,06	0,97	19
26	620,54	618,68	619,50	5,43	617,73	3,66	1,77	33
27	624,43	623,34	623,77	5,23	622,54	4,00	1,23	24
28	628,66	628,10	627,26	5,51	626,37	4,63	0,89	16
29	630,49	630,56	630,28	3,72	630,52	3,97	-0,24	-7
			Največja				3,07	52
			Povprečje				2,01	34

5.1.4 Sproščanje drobirskega toka s prostornino 15.000 m³

Hidrogram, ki je služil kot vhodni za ta primer, kaže začetek pretoka v območje v 80 s, maksimalni pretok se pojavi v 86,4 sekundah in znaša 264,83 m³. Izhodna hidrograma se

razlikujeta tako po času potovanja čela drobirskega toka kot tudi po maksimalnem pretoku na izhodu. Drobirski tok pri programu PCFLOW2D prepotuje območje v 59,3 s, pri FLO-2D pa v 90 s. Maksimalni pretok pri programu PCFLOW2D (na izhodu) je $163,78 \text{ m}^3/\text{s}$ in ga doseže v 140 s, pri FLO-2D pa je maksimalni pretok le $99,47 \text{ m}^3/\text{s}$ in se pojavi v 186 s.



Grafikon 4: Hidrogram Q(t) za volumen 15.000 m³ pri obstoječem stanju

Pri vzdolžnem prerezu v osi struge so gladine, ki jih izračuna program PCFLOW2D, zopet višje od gladin programa FLO-2D, vendar ne tako očitno kot pri mokrem toku z volumnom 20.000 m³. Največja razlika med gladinama se pojavi v profilu 1 in znaša 1,42 m, medtem ko je povprečna razlika med gladinama 0,62 m. Globine so pri programu PCFLOW2D v povprečju 3,99 m, medtem ko so pri FLO-2D nižje za 0,62 cm in znašajo 3,37 m. Vzdolžni potek gladin je prikazan v prilogi 4, maksimalni doseg pa v prilogi 16.

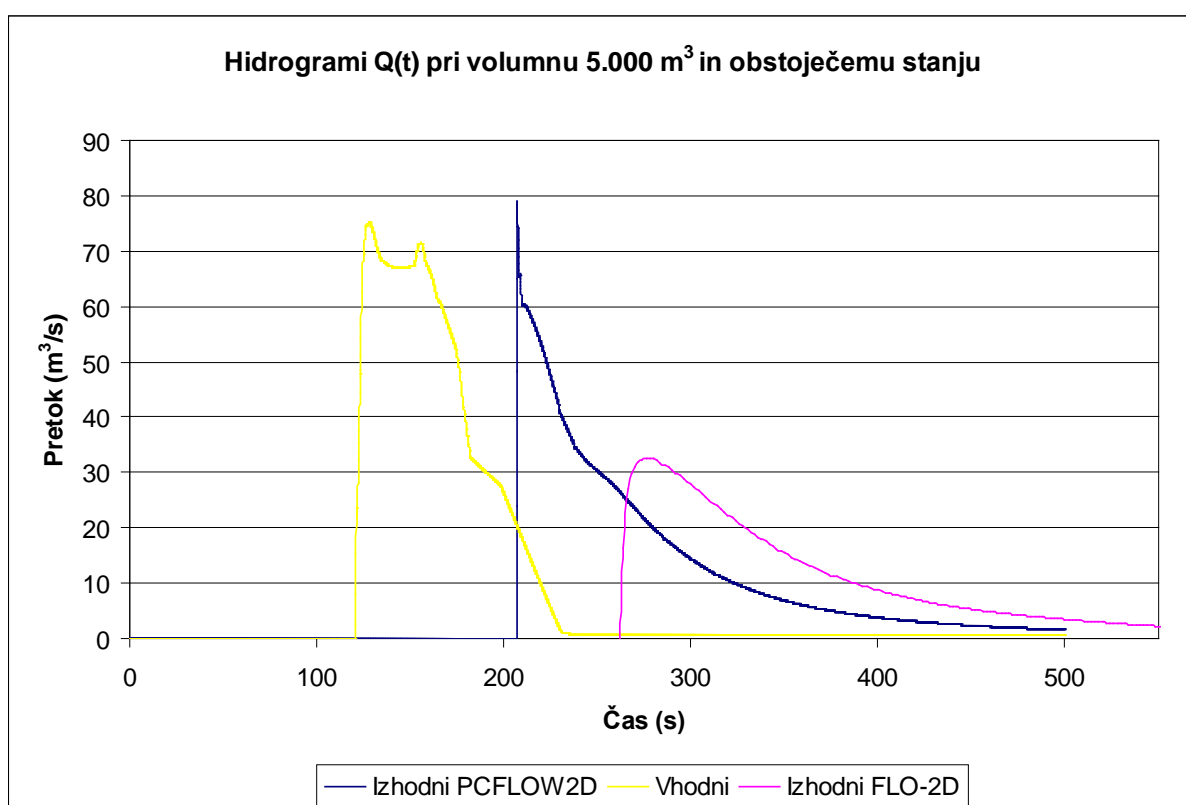
Preglednica 9: Kote gladin, globine drobirskega toka in razlika globin za volumen 15.000 m³

Profil	15.000 m ³ , obstoječe stanje				Razlika v globinah	
	PCFLOW2D		FLO-2D		PCFLOW2D-FLO-2D	
	[m.n.v]	[m]	[m.n.v]	[m]	Abs. [m]	Rel. [%]
1	548,96	3,63	547,54	2,21	1,42	39
2	552,97	3,87	551,88	2,78	1,09	28
3	555,11	3,67	554,4	2,96	0,71	19
4	558,70	3,81	557,64	2,75	1,06	28
5	562,57	3,80	561,86	3,10	0,71	19
6	566,37	3,95	565,44	3,02	0,93	24
7	569,07	3,98	568,31	3,22	0,76	19
8	572,37	3,86	571,6	3,09	0,77	20
9	574,18	4,14	573,14	3,10	1,04	25
10	576,35	3,91	575,79	3,35	0,56	14
11	578,38	4,03	577,9	3,55	0,48	12
12	580,27	4,20	579,57	3,50	0,70	17
13	581,12	4,21	580,31	3,40	0,81	19
14	583,58	4,14	582,88	3,44	0,70	17
15	584,71	4,05	584,19	3,53	0,52	13
16	587,09	3,91	586,67	3,50	0,42	11
17	590,72	4,03	590,24	3,54	0,48	12
18	594,03	4,01	593,63	3,61	0,40	10
19	596,59	4,33	595,82	3,56	0,77	18
20	598,88	3,88	598,61	3,61	0,27	7
21	603,03	4,04	602,32	3,33	0,71	18
22	605,27	3,85	604,95	3,53	0,32	8
23	608,54	4,05	608,08	3,60	0,46	11
24	611,54	3,90	611,21	3,58	0,33	8
25	613,80	3,80	613,73	3,73	0,07	2
26	617,97	3,90	617,49	3,42	0,48	12
27	622,57	4,03	622,28	3,74	0,29	7
28	626,79	5,05	626,05	4,31	0,74	15
29	630,34	3,79	630,36	3,81	-0,02	-1
Največja		5,05		4,31	1,42	39
Povprečje		3,99		3,37	0,62	16

5.1.5 Sproščanje drobirskega toka s prostornino 5000 m³ in 1000 m³

Ob volumnih 5000 m³ in 1000 m³ so rezultati obeh programov pokazali, da drobirski tok ne bi prelil struge v nobeni točki in tako ne predstavlja nikakršne grožnje za ljudi in njihovo premoženje. Rezultati programov PCFLOW2D in FLO-2D se sicer nekoliko razlikujejo tako

v izhodnih hidrogramih kot v višinah gladin, medtem ko je doseg enak, saj drobirski tok ostaja v strugi. Iztočni hidrogrami nam pokažejo, da pri teh volumnih potrebuje drobirski tok dlje časa, da prepotuje računsko območje. Pri prostornini 5000 m^3 nam PCFLOW2D izračuna čas potovanja čela vala na 86,7 s, pri FLO-2D pa potovanje čela vala traja dlje, in sicer 144 s. Maksimalni pretok pri FLO-2D je $32,81 \text{ m}^3/\text{s}$, pri PCFLOW2D pa $79,12 \text{ m}^3/\text{s}$. Razlika med višinami gladin v osi struge je pri volumnu 5000 m^3 najmanjša v primerjavi z ostalimi primeri, vendar še vedno največja razlika gladin znaša $0,92 \text{ m}$ v profilu 2, povprečna razlika med globinami v profilih pa $0,38 \text{ m}$. Če pogledamo rezultate globin, vidimo, da se povprečje globine giblje med $2,81 \text{ m}$ pri programu PCFLOW2D in $2,43 \text{ m}$ pri FLO-2D.

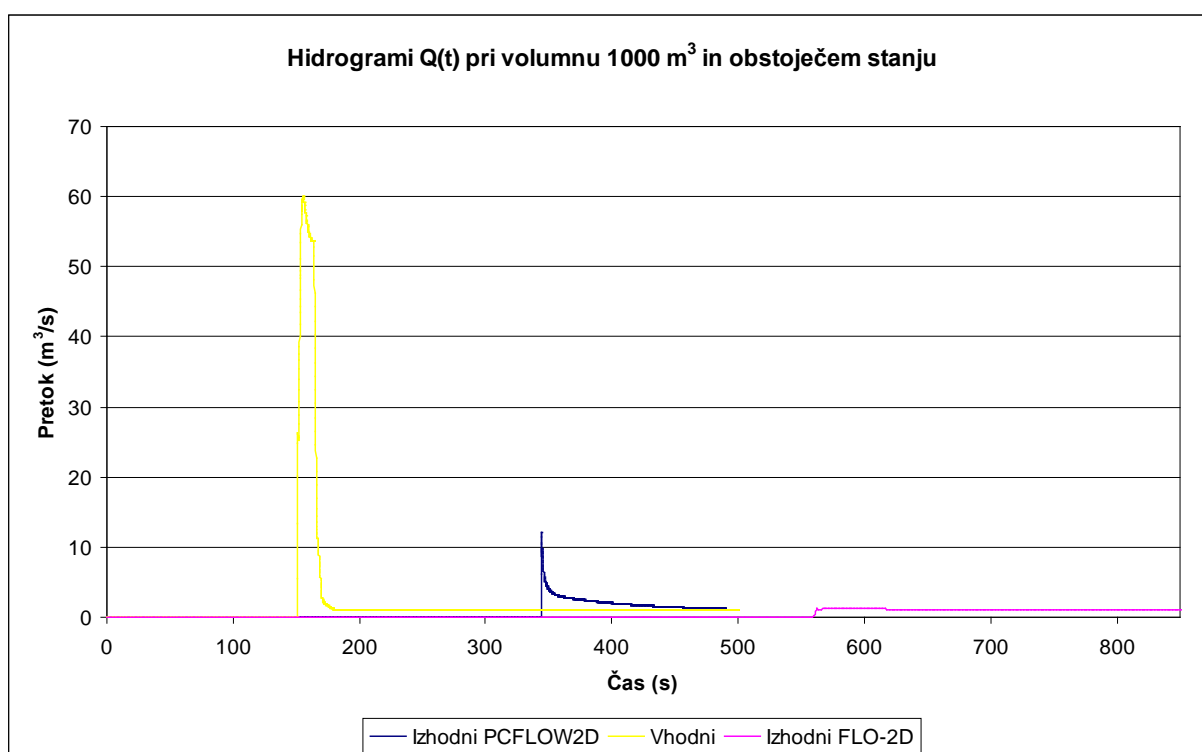


Grafikon 5: Hidrogram Q(t) za volumen 5.000 m^3 pri obstoječem stanju

Pri volumnu 1000 m^3 nam hidrogrami pokažejo še počasnejše potovanje drobirskega toka, saj pri programu PCFLOW2D čelo drobirskega toka prepotuje območje v $193,8 \text{ s}$, pri FLO-2D pa 410 s . K majhnemu volumnu sprožitve spadajo tudi majhni maksimalni pretoki na iztoku, ki v naših primerih znašajo $12,1 \text{ m}^3/\text{s}$ pri PCFLOW2D, pri sorodnem programu FLO-2D pa $1,3$

m^3/s . Razlike v višini gladin so nekoliko večje kot pri volumnu 5000 m^3 , saj je največja razlika $1,61 \text{ m}$ v profilu 2, povprečna razlika gladin pa je $0,63 \text{ m}$. Globine se tudi razlikujejo, saj pri PDCFLOW2D v povprečju znašajo $1,94 \text{ m}$, pri FLO-2D pa $1,31 \text{ m}$.

Grafična primerjava poteka gladin v vzdolžnem profilu med PCFLOW2D in FLO-2D za posamezen volumen je prikazana v prilogah 5 in 6, dosegi za volumne 5.000 m^3 in 1.000 m^3 , ki smo jih dobili s pomočjo programa PCFLOW2D, pa v prilogi 16.



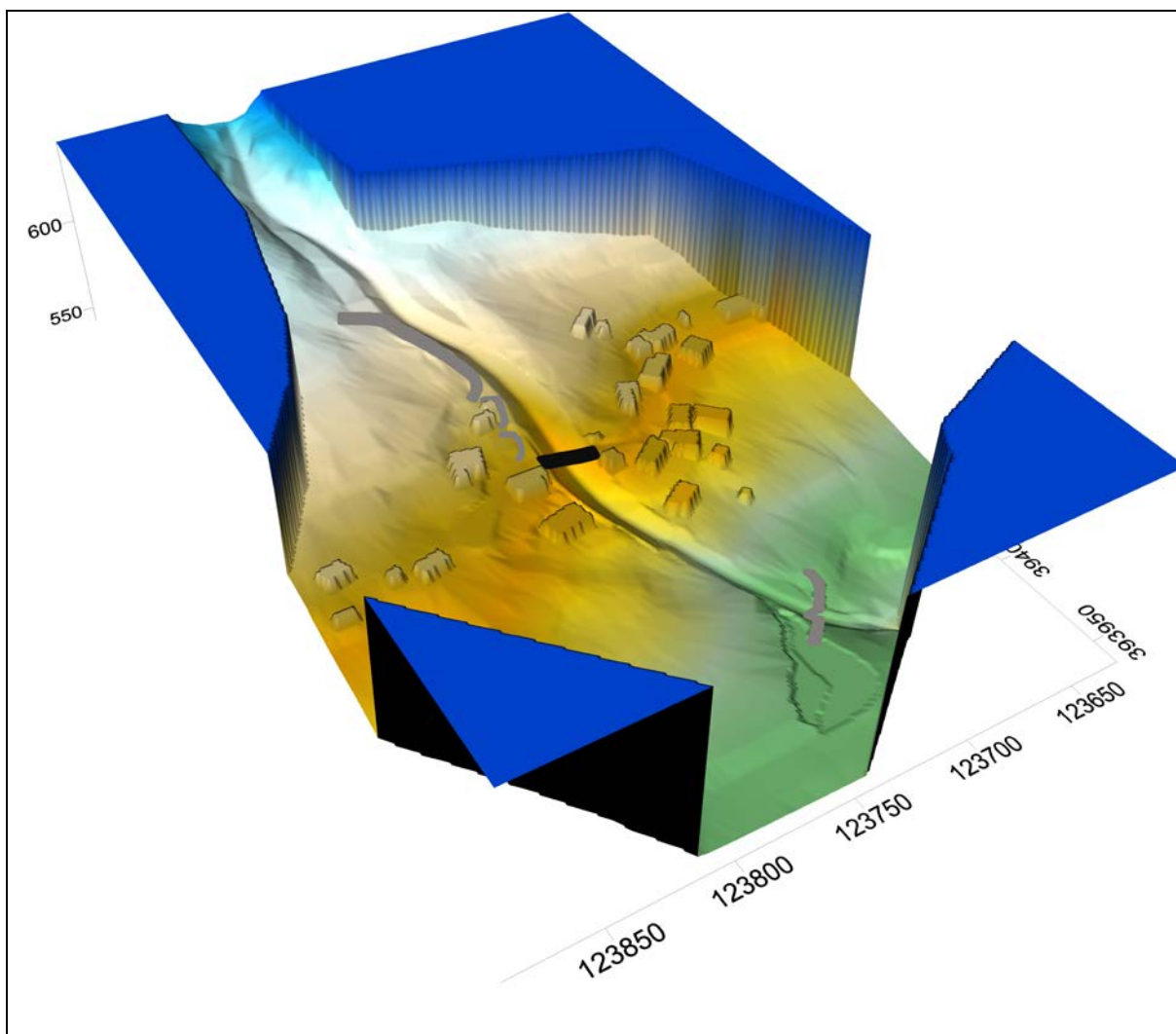
Grafikon 6: Hidrogram Q(t) za volumen 1000 m^3 pri obstoječem stanju

Preglednica 10: Kote gladin, globine drobirskega toka in razlika globin za volumna 5000 in 1000 m³

Profil	Kote gladine za 5000m ³ , obstoječe stanje				Kote gladin za 1000 m ³ , obstoječe stanje				Razlike v globinah PCFLOW2D – FLO-2D			
	PCFLOW2D		FLO-2D		PCFLOW2D		FLO-2D		1000 m ³		5000 m ³	
	Kote [m.n.v]	Glob. [m]	Kote [m.n.v]	Glob. [m]	Kote [m.n.v]	Glob. [m]	Kote [m.n.v]	Glob. [m]	Abs. [m]	Rel. [%]	Abs. [m]	Rel. [%]
1	547,48	2,15	546,68	1,35	545,33	0,00	545,66	0,33	-0,33	0	0,80	37
2	552,01	2,92	551,09	1,99	551,47	2,37	549,86	0,76	1,61	68	0,92	32
3	554,28	2,84	553,62	2,18	552,72	1,28	552,30	0,86	0,42	33	0,66	23
4	557,80	2,91	556,89	2,00	557,22	2,33	555,64	0,75	1,58	68	0,91	31
5	561,82	3,06	561,04	2,28	561,03	2,27	559,68	0,92	1,35	60	0,78	26
6	565,32	2,89	564,62	2,20	562,94	0,52	563,28	0,86	-0,34	-66	0,70	24
7	567,82	2,72	567,47	2,38	566,78	1,69	566,12	1,03	0,66	39	0,35	13
8	571,28	2,77	570,74	2,23	570,66	2,15	569,38	0,87	1,28	60	0,54	19
9	573,14	3,11	572,27	2,23	571,38	1,34	570,92	0,88	0,46	34	0,87	28
10	575,38	2,94	574,88	2,44	574,80	2,36	573,45	1,01	1,35	57	0,50	17
11	577,32	2,97	576,94	2,59	575,20	0,85	575,46	1,11	-0,26	-31	0,38	13
12	578,97	2,89	578,63	2,56	578,27	2,20	577,18	1,11	1,09	50	0,34	12
13	579,86	2,95	579,38	2,47	579,33	2,43	577,96	1,05	1,37	57	0,48	16
14	582,26	2,82	582,00	2,56	580,89	1,44	580,64	1,20	0,25	17	0,26	9
15	583,42	2,76	583,31	2,65	581,55	0,89	581,93	1,27	-0,38	-43	0,11	4
16	585,85	2,68	585,77	2,60	583,17	0,00	584,39	1,22	-1,22	0	0,08	3
17	589,63	2,93	589,30	2,60	588,14	1,44	587,95	1,25	0,19	13	0,33	11
18	593,09	3,07	592,68	2,66	592,24	2,22	591,35	1,33	0,89	40	0,41	13
19	595,26	3,00	594,86	2,60	594,80	2,54	593,61	1,35	1,19	47	0,40	13
20	597,71	2,71	597,66	2,66	597,44	2,44	596,53	1,53	0,91	37	0,05	2
21	601,67	2,68	601,41	2,42	601,18	2,19	600,38	1,39	0,80	37	0,26	10
22	604,12	2,69	604,01	2,59	604,09	2,66	603,00	1,58	1,09	41	0,11	4
23	607,16	2,67	607,08	2,60	607,27	2,79	606,12	1,64	1,15	41	0,08	3
24	610,33	2,70	610,22	2,59	610,22	2,59	609,40	1,77	0,82	32	0,11	4
25	613,06	3,06	612,69	2,69	612,82	2,82	611,91	1,91	0,91	32	0,37	12
26	616,72	2,64	616,49	2,42	616,68	2,60	616,02	1,95	0,66	25	0,23	9
27	621,29	2,75	621,11	2,57	621,17	2,63	620,76	2,22	0,41	16	0,18	7
28	624,61	2,87	624,65	2,91	624,47	2,73	624,35	2,61	0,12	5	-0,04	-1
29	628,99	2,43	628,99	2,44	629,01	2,45	628,76	2,21	0,25	10	0,00	0
Največja		3,11		2,91		2,82		2,61	1,61	68	0,92	37
Povprečje		2,81		2,43		1,94		1,31	0,63	29	0,38	14

5.2 Primerjava rezultatov za načrtovano stanje 2004

Za načrtovano ureditev terena je značilno, da je obstoječemu stanju iz leta 2002 dodan dodaten zidu na desnem bregu, poglobitev struge med profiloma 6 in 17, pregrada za omejevanje pretoka z usmerjevalnim nasipom v profilu 3 in ureditev razlivnega območja za drobirske tokove desno od profila 3. Vse ureditve so za boljšo predstavbo prikazane na spodnji sliki.

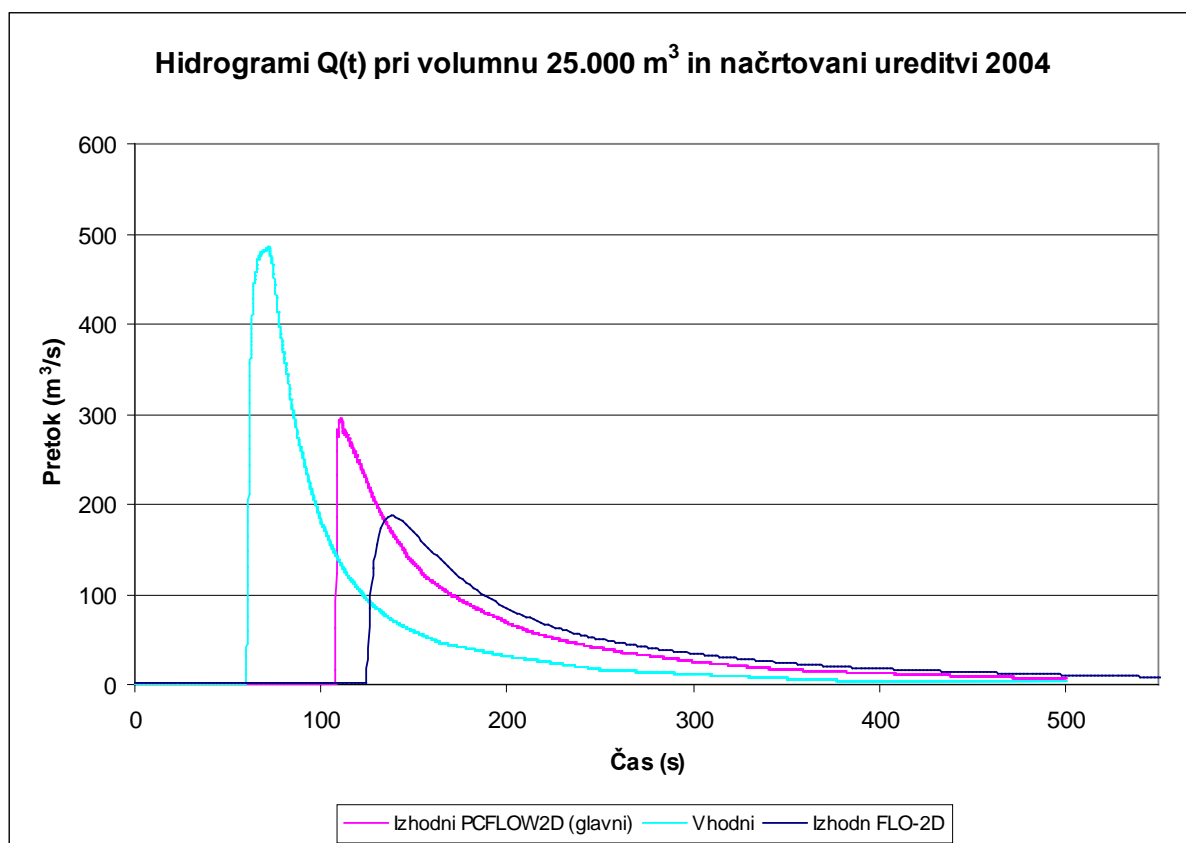


Slika 5: Prikaz 3D modela za načrtovano ureditev 2004

5.2.1 Sproščanje drobirskega toka s prostornino 25.000 m³

Tudi pri tem volumnu vala in nartovani ureditvi, nam programa dajeta nekoliko različne izhodne hidrograme. Pri PCFLOW2D imamo maksimalni pretok v 108 s, in sicer 294,637

m^3/s , medtem ko se pri FLO-2D maksimalen pretok pojavi šele v 138 s in znaša $185,45 \text{ m}^3/\text{s}$. Tudi čas potovanja čela vala je pri PCFLOW2D krajši in s tem hitrejši, saj prepotuje računsko območje v 50 s, pri FLO-2D pa v 80 s.



Grafikon 7: Hidrogram Q(t) za volumen 25.000 m^3 pri načrtovanem stanju 2004

Pri dosegih nam programa podata zelo podobne rezultate, saj se maksimalna dosega razlikujeta le v profilih 7, 8, 9 in 10, za največ 5 m. Poudariti je treba, da smo pri zidu upoštevali neskončno visok zid, tako kot so ga pri računih s programom FLO-2D. Zato nam pri načrtovni ureditvi 2004 programa dajeta dosege, ki se v predelu zidu ne razlivajo več, kot so se pri obstoječi ureditvi, ampak tok ostaja v strugi. Vendar pa je iz rezultatov razvidno, da bi pri načrtovanem 1 m visokem zaščitnem zidu material le tega prelil, saj je v vseh profilih, ki sekajo zid, višina drobirskega toka večja od 1 m, pri profilu 19 pa znaša celo 4,2 m. Opisani dosegi za načrtovano ureditev ter volumen 25.000 m^3 so prikazani v prilogi 17.

Tudi pri poteku gladin v osi struge nam PCFLOW2D poda višje gladine, saj so v povprečju, od gladin FLO-2D višje za 1,23 m. Globine drobirskega toka pri PCFLOW2D v povprečju

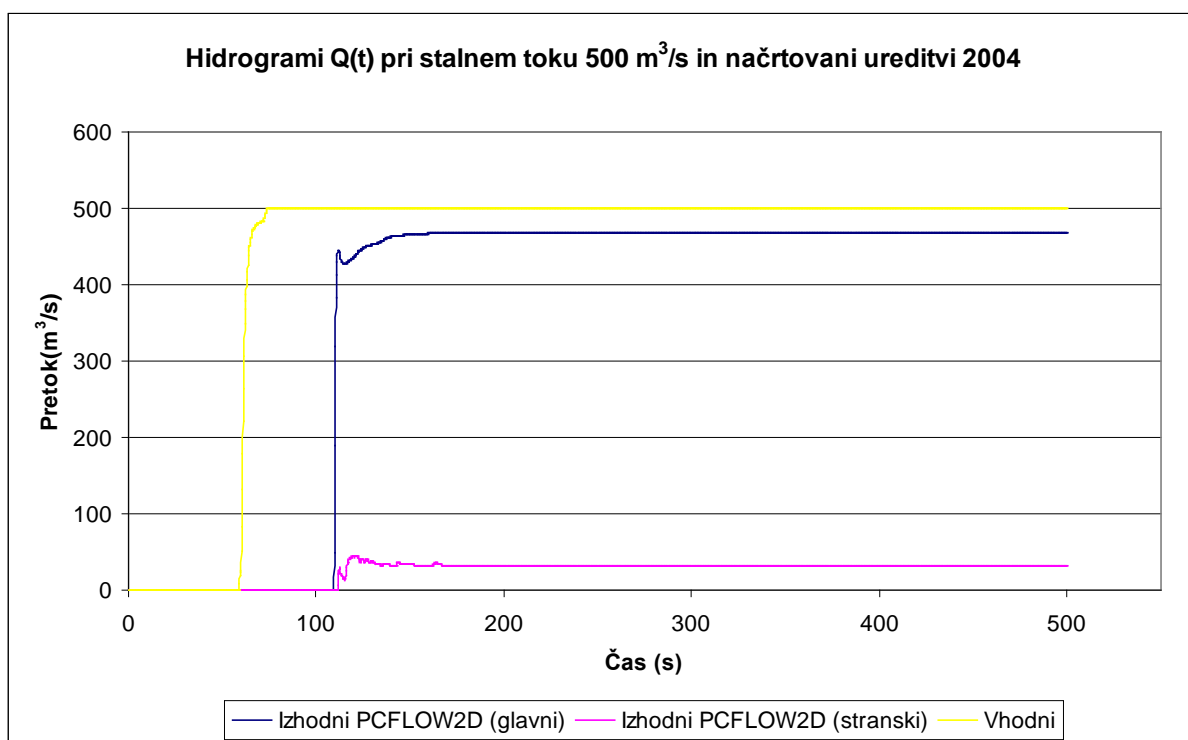
znašajo 5,57 m, pri FLO-2D pa 4,34 m. Če primerjamo globine z globinami pri obstoječem stanju, vidimo, da so po ureditvah 2004 višje, kar je posledica dviga gladine zaradi zidu, ki preprečuje, da bi se material razlil, ga usmerja v strugo in tako viša gladine. Potek gladin je izrisan v prilogi 7, vrednosti v posameznih profilih pa v spodnji preglednici.

Preglednica 11: Kote gladin, globine drobirskega toka in razlike globin za volumen 25.000 m³

Profil	Kote gladine za 25.000m ³ , načrtovano stanje				Razlike v globinah	
	FLO-2D		PCFLOW2D		PCFLOW2D - FLO-2D	
	Kote [m.n.v]	Globina [m]	Kote [m.n.v]	Globina [m]	Abs. [m]	Rel. [%]
1	548,22	2,89	550,11	4,78	1,89	40
2	552,51	3,41	554,05	4,95	1,54	31
3	555,43	3,99	557,81	6,37	2,38	37
4	558,25	3,36	560,46	5,57	2,21	40
5	562,61	3,85	564,79	6,03	2,18	36
6	566,23	3,81	568,35	5,93	2,12	36
7	568,93	4,17	571,12	6,36	2,19	34
8	571,73	4,10	573,80	6,17	2,07	33
9	573,23	4,38	574,79	5,94	1,56	26
10	575,32	4,57	577,00	6,25	1,68	27
11	577,02	4,75	578,28	6,01	1,26	21
12	578,43	4,14	579,97	5,68	1,54	27
13	579,51	4,55	580,58	5,62	1,07	19
14	582,75	4,74	583,57	5,55	0,82	15
15	583,86	4,58	584,77	5,48	0,91	17
16	586,58	4,40	587,76	5,59	1,18	21
17	590,63	4,43	592,00	5,80	1,37	24
18	594,33	4,31	596,02	6,00	1,69	28
19	596,84	4,58	598,16	5,90	1,32	22
20	599,68	4,68	600,22	5,22	0,54	10
21	603,34	4,35	603,89	4,90	0,55	11
22	606	4,58	607,20	5,77	1,20	21
23	609,16	4,68	610,54	6,05	1,38	23
24	612,24	4,61	612,84	5,21	0,60	12
25	614,78	4,78	614,67	4,67	-0,11	-2
26	618,45	4,38	618,68	4,61	0,23	5
27	623,27	4,73	623,34	4,80	0,07	1
28	627,17	5,43	628,10	6,36	0,93	15
29	631,32	4,77	630,56	4,00	-0,76	-19
Največja		5,43		6,37	2,38	40
Povprečje		4,34		5,57	1,23	21

5.2.2 Konstantni dotok drobirskega toka s $500 \text{ m}^3/\text{s}$

Pri konstantnem dotoku $500 \text{ m}^3/\text{s}$ smo pričakovali izhodne hidrograme, ki bodo enaki vhodnim, vendar zaradi potovanja vala skozi računsko območje, s časovno zakasnitvijo. Pri programu PCFLOW2D izhodni hidrogram v smeri struge nima maksimalnega pretoka $500 \text{ m}^3/\text{s}$, ker se del materiala razlije na načrtovano razlivno območje in tam zapusti računsko območje. Tako je pretok na izhodnem hidrogramu v smeri struge manjši za približno $35 \text{ m}^3/\text{s}$. Računsko območje prepotuje v $51,25 \text{ s}$, kar je za 2 s hiteje kot pri obstoječem stanju struge za isti primer. Izhodnega hidrograma programa FLO-2D nam ni uspelo pridobiti, vendar lahko iz prejšnjih spoznanj predvidevamo, da bi material potoval dlje časa kot pri PCFLOW2D.



Grafikon 8: Hidrogram Q(t) pri konstantnem dotok $500 \text{ m}^3/\text{s}$ in načrtovani ureditvi 2004

Pri dosegih imamo zelo podobno sliko tako za program PCFLOW2D, kot za FLO-2D. Do razlik pride samo med profiloma 7 in 13, kjer je doseg, ki ga poda PCFLOW2D, nekoliko večji, največ za 13 m , vendar nima velike globine, ki bi ogrožala objekte. Dosegi so prikazani v prilogi 18.

Pri potekih gladin v osi struge se zopet pokažejo višje gladine pri programu PCFLOW2D, saj so v povprečju višje za 1,80 m. Globine drobirskega toka so pri največjem dosegu v povprečju 6,67 m, medtem ko je po rezultatih modela FLO-2D povprečna globina 4,96 m. Povečanje globin v primerjavi z obstoječim stanjem je posledica načrtovanega zidu, ki ne pusti, da bi se material razlil po terenu, ampak ga usmerja v strugo in tam povzroča dvig gladin. Ker smo zid upoštevali kot neskončno visok, je potrebno opozoriti, da so globine drobirskega toka ob zidu višje kot 1 m (načrtovana višina zidu) in bi ga v resnici prelil, saj nam rezultati PCFLOW2D v profilu 19 podajo višino 4,18 m. Če povprečja primerjamo z obstoječo ureditvijo, so globine pri modelu PCFLOW2D večje za 0,5 m, pri FLO-2D pa za 0,1 m. Vzdolžni potek gladin v osi struge je prikazan v prilogi 8, vrednosti globin in kote v posameznem profilu pa v spodnji preglednici.

Preglednica 12: Kote gladin, globine drobirskega toka in razlike globin za konstantni pretok $500 \text{ m}^3/\text{s}$

Profil	Kote gladine za $500 \text{ m}^3/\text{s}$, načrtovano stanje				Razlike v globinah	
	FLO-2D		PCFLOW2D		PCFLOW2D - FLO-2D	
	Kote [m.n.v]	Globina [m]	Kote [m.n.v]	Globina [m]	Abs. [m]	Rel. [%]
1	549,33	4,00	551,37	6,04	2,04	34
2	553,45	4,35	554,56	5,47	1,11	20
3	556,53	5,09	558,83	7,39	2,30	31
4	559,13	4,24	560,95	6,06	1,82	30
5	563,38	4,62	565,10	6,34	1,72	27
6	566,93	4,51	569,00	6,57	2,07	31
7	569,67	4,91	571,86	7,10	2,19	31
8	572,58	4,95	575,70	8,08	3,12	39
9	574,09	5,24	576,74	7,88	2,65	34
10	576,2	5,45	579,18	8,42	2,98	35
11	577,88	5,61	580,72	8,45	2,84	34
12	579,26	4,97	582,25	7,96	2,99	38
13	580,32	5,36	582,96	8,00	2,64	33
14	583,51	5,50	585,68	7,67	2,17	28
15	584,61	5,33	586,60	7,31	1,99	27
16	587,28	5,10	589,13	6,96	1,85	27
17	591,28	5,08	592,90	6,70	1,62	24
18	594,96	4,94	596,50	6,48	1,54	24
19	597,43	5,17	598,38	6,13	0,95	16
20	600,21	5,21	601,37	6,36	1,16	18
21	603,77	4,78	605,12	6,13	1,35	22
22	606,36	4,94	608,01	6,59	1,65	25
23	609,46	4,98	611,17	6,68	1,71	26

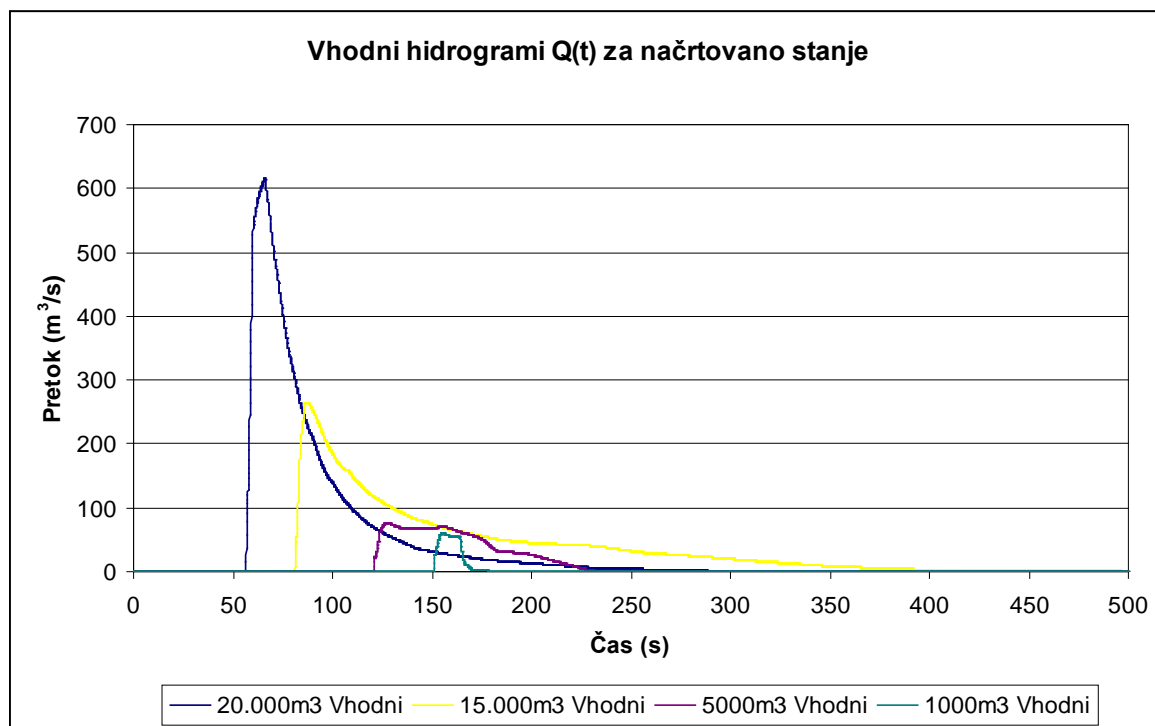
24	612,48	4,85	613,72	6,08	1,24	20
25	614,98	4,98	615,96	5,95	0,98	16
26	618,6	4,53	620,54	6,47	1,94	30
27	623,39	4,85	624,43	5,90	1,04	18
28	627,28	5,54	628,66	6,91	1,38	20
29	631,39	4,84	630,49	3,94	-0,90	-23
Največja		5,61		8,45	3,12	39
Povprečje		4,96		6,76	1,80	25

5.2.3 Sproščanje drobirskega toka s prostornino 20.000, 15.000, 5000 in 1000 m³

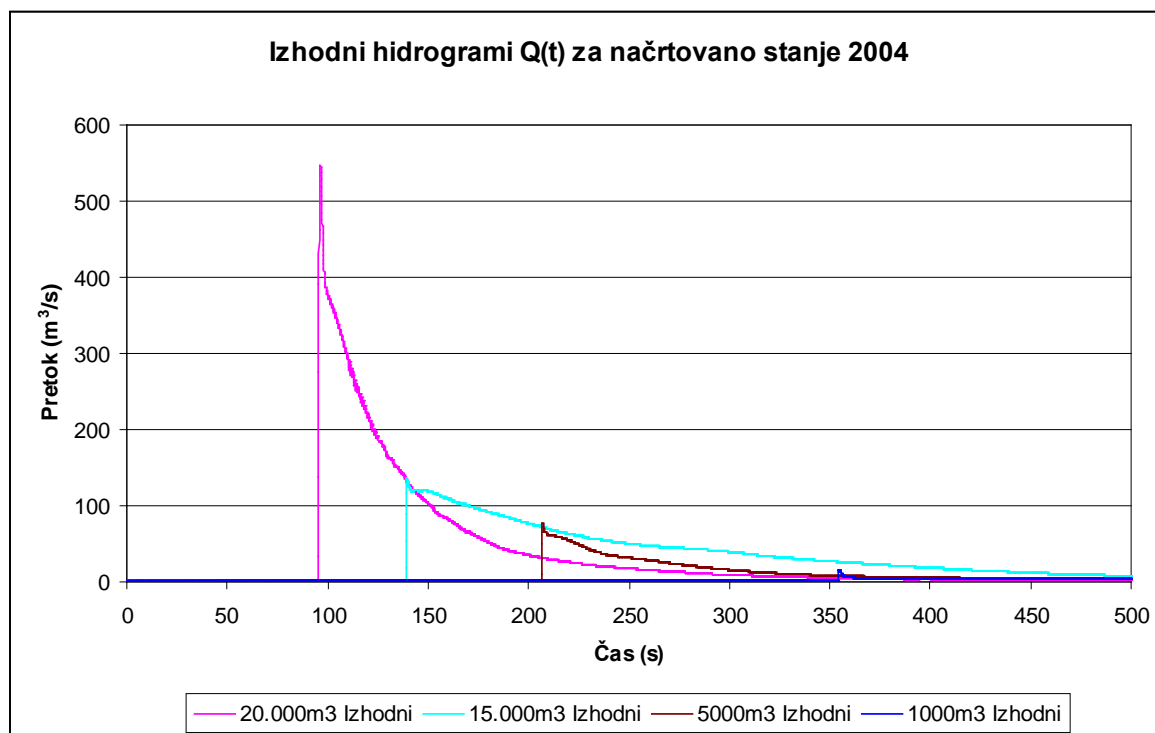
Pri zgoraj omenjenih volumnih podatkih za program FLO-2D ni bilo na voljo, zato tu podajamo samo rezultate programa PCFLOW2D.

Vidimo lahko, da volumni drobirskega toka 15.000, 5000 in 1000 m³ pri načrtovani ureditvi ne predstavljajo nobene nevarnosti za objekte in prebivalce, saj tudi pri največjih dosekih za posamezen volumen ne zapustijo struge oz. se ne razlijejo izven nje. Manjši izliv se pojavi pri volumnu 15.000 m³, vendar bi ga načrtovani zid zaustavil, saj globina ne preseže 1 m. Pri prostornini 20.000 m³ (moker) pa ne moremo trditi, da ne predstavlja določene nevarnosti, saj nam tudi tukaj program PCFLOW2D, tako kot že pri istem volumnu in obstoječem stanju izračina, globine večje od 1 m. Največji dosegi nam torej ne pokažejo povsem realne slike, saj je zopet upoštevan neskončno visok zid, ki prepreči razlivanje v območje vasi. Globine ob zidu pa pokažejo, da so večje od predvidene višine zidu (1m) in bi bil zid prelit, vendar količina prelivanja verjetno ne ni bila velika.

Vhodni in izhodni hidrogrami za posamezen primer so podani v spodnjih grafikonih 9 in 10. Maksimalni dosegi drobirskega toka in vzdolžni potek gladin pa so prikazani v prilogi 19 in 9. Številčno so globine toka za različne volumne podane v preglednici 13.



Grafikon 9: Vhodni hidrogrami Q(t) za volumne 20.000, 15.000, 5000 in 1000 m³ pri načrtovanem stanju 2004



Grafikon 10: Izhodni hidrogrami Q(t) za volumne 20.000, 15.000, 5000 in 1000 m³ pri načrtovanem stanju 2004

Preglednica 13: Kote gladin in globine drobirskega toka, dobljene s programom PCFLOW2D pri načrtovani ureditvi 2004

Profil	20.000 moker m ³		15.000 m ³		5000 m ³		1000 m ³	
	Kote [m.n.v]	Globina [m]	Kote [m.n.v]	Globina [m]	Kote [m.n.v]	Globina [m]	Kote [m.n.v]	Globina [m]
1	551,58	6,25	548,68	3,35	547,48	2,15	545,87	0,54
2	555,06	5,96	552,70	3,61	552,01	2,91	551,53	2,43
3	558,20	6,76	556,25	4,81	554,70	3,26	554,07	2,63
4	561,20	6,31	558,88	3,99	557,76	2,87	557,05	2,17
5	565,33	6,57	562,57	3,81	561,77	3,01	561,03	2,27
6	569,16	6,74	566,26	3,83	565,42	3,00	562,92	0,49
7	572,00	7,23	568,93	4,17	567,83	3,07	567,05	2,29
8	574,72	7,09	571,66	4,04	570,56	2,93	569,55	1,92
9	575,87	7,02	572,96	4,10	571,70	2,85	571,13	2,28
10	577,90	7,14	574,93	4,18	574,21	3,45	572,01	1,25
11	579,37	7,10	576,91	4,64	575,57	3,30	574,68	2,41
12	581,37	7,09	578,67	4,39	577,95	3,67	576,67	2,39
13	582,28	7,32	579,37	4,41	578,26	3,30	577,20	2,24
14	585,16	7,15	582,37	4,36	581,41	3,39	579,38	1,37
15	586,49	7,20	583,56	4,27	582,59	3,30	580,08	0,79
16	589,07	6,89	586,35	4,17	585,09	2,92	584,01	1,83
17	593,11	6,91	590,18	3,97	588,95	2,74	588,50	2,30
18	596,71	6,69	594,12	4,09	592,90	2,88	592,35	2,32
19	598,80	6,54	596,63	4,37	595,26	3,00	594,80	2,54
20	601,75	6,75	598,88	3,88	597,71	2,71	597,44	2,44
21	605,84	6,85	603,03	4,04	601,67	2,68	601,18	2,19
22	608,12	6,69	605,27	3,85	604,12	2,69	604,09	2,66
23	610,84	6,36	608,54	4,05	607,16	2,67	607,27	2,79
24	613,02	5,39	611,54	3,90	610,33	2,70	610,22	2,59
25	615,03	5,03	613,80	3,80	613,06	3,06	612,82	2,82
26	619,50	5,43	617,97	3,90	616,72	2,64	616,68	2,60
27	623,77	5,23	622,57	4,03	621,29	2,75	621,17	2,63
28	627,26	5,51	626,79	5,05	624,61	2,87	624,47	2,73
29	630,28	3,72	630,34	3,79	628,99	2,43	629,01	2,45
Največja		7,32		5,05		3,67		2,82
Povprečje		6,45		4,10		2,94		2,15

5.3 Hitrostna polja za program PCFLOW2D pri obstoječi in načrtovani ureditvi

Kakšne hitrosti drobirskega toka se pojavljajo v strugi in izven nje je možno razbrati iz hitrostnega polja, ki nam ga model PCFLOW2D, v določenem času izriše z vektorji v vsaki točki računske mreže. Ker se najvišje hitrosti v posameznem profilu pojavijo približno v času, ko ga doseže konica vala, smo kot reprezentativni primer (za volumen 25.000 m^3) izrisali hitrostna polja v času 150 s, ko čelo vala pri večini primerov doseže ali je blizu iztočnega roba, večino profilov na računskem področju pa je konica vala že prešla. Pri primeru s konstantnim pretokom $500 \text{ m}^3/\text{s}$ pa je hitrostno polje izrisano v času 300 s, ko se razmere že ustalijo in so to hkrati tudi maksimalne hitrosti v posameznem profilu. Za ta primer smo imeli na voljo tudi rezultate programa FLO-2D.

FLO-2D je pri obstoječi ureditvi terena podal maksimalne hitrosti v osi struge med 12 in 14 m/s. Pri PCFLOW2D pa so se hitrosti gibale med 8 in 13 m/s. Razlog za nižje hitrosti pri programu PCFLOW2D so v tem, da je dal slednji v povprečju višje gladine. Pri programu PCFLOW2D so razlike v hitrostih med glavno strugo in okoliškim terenom zaradi intenzivnejšega prenosa gibalne količine tudi v prečni smeri manjše kot pri programu FLO-2D.

Če primerjamo še rezultate programa PCFLOW2D, med obstoječo in načrtovano ureditvijo območja, lahko ugotovimo, da se maksimalne hitrosti v osi struge razlikujejo za ca 1 m/s. Pri načrtovani ureditvi se gibljejo med 9 in 14 m/s, medtem ko se pri obstoječi med 8 in 13 m/s. Hitrostno polje za obstoječe in načrtovano stanje terena pri konstantnem pretoku $500 \text{ m}^3/\text{s}$ je izrisano v prilogah 20 in 21, za volumen 25.000 m^3 pa v prilogah 22 in 23.

6 ZAKLJUČKI

Drobirski tok in ostale oblike tokov običajno za človeka niso problem, dokler svoje uničujoče moči ne pokažejo v urbanem okolju in neposredno prizadenejo način življenja tega okolja in uničijo oz. prizadenejo materialne dobrine. Z večanjem števila prebivalstva se povečuje število poselitev na drobirsko in plazovito ogrožena območja. Strokovnjaki po svetu so spoznali, da je smotno vlagati sredstva v raziskovanje teh pojavov in na ta način preprečiti ali vsaj omiliti njihove negativne posledice.

Prvi opisi, in s tem začetek raziskovanja drobirskih tokov so zabeleženi leta 1897 v Severni Ameriki pod pojmom sheet flood. Leta 1941 je območje mesta Wrightood v južnih kalifornijskih gorah prekril blatni tok, leta 1961 pa je zabeležen blatni tok na območju Tenmile Range v Koloradu. Leta 1981 in 1983 so se drobirski tokovi pojavili tudi v Kanadi, in sicer v jugozahodnem delu zvezne države Britanska Kolumbija, kjer je umrlo 12 ljudi. Poročila o dogodkih so pritegnila pozornost ljudi. Leta 1999 je osrednji del obale Venezuele ob Mehiškem zalivu zajelo silovito deževje, sprožilo se je veliko število drobirskih tokov, ki so porušili 126.000 hiš in pri tem ubili 30.000 ljudi. Eno največjih katastrof z drobirskim tokom pripisujejo območju Nevados Huascarane v Perujskih Andih, kjer se je aktiviralo $70 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ skal, se spremenilo v drobirski tok, ki je po izračunih potoval z neverjetnimi 300 km/h. Raziskovanje in monitoring sta zelo razširjena tudi na Japonskem, saj se tam zaradi ugodnih pogojev (monsumsko podnebje, sestava tal, tektonski premiki) dostikrat pojavijo drobirski tokovi, ki ogrožajo gosto naseljene otoke. Naj omenim samo katastrofo na Mount Unzen, kjer je 8 mio m^3 materiala v obliki drobirskega toka povzročilo smrt 44 ljudi, razdejanih pa je bilo 651 hiš. Na Kitajskem se je z dvigom gospodarske rasti povečalo tudi zanimanje za preprečevanje nastankov drobirskih tokov, ki se pojavljajo v enaintridesetih provincah oz. 950 pokrajinah. Območja pojavljanja drobirskega toka zajemajo za nas nepredstavljenih 4,3 mio km^2 , od tega 1,3 mio km^2 spada med resno ogrožena območja. Statistika je tudi pokazala, da so v zadnjih nekaj letih drobirski tokovi povzročili za 1,5 – 2,0 milijard juanov škode in zahtevali 250 - 500 žrtev letno. Tudi v Evropi so v preteklosti posvečali pozornost pojavom drobirskih tokov. Obstaja zbirka podatkov za Italijo med letoma 1400 in 2000. Prišli so do rezultatov, da je v katastrofah z drobirskimi tokovi in plazovi

izgubilo življenje 10.500 ljudi in da so se pojavili v vseh mesecih leta, vendar s porastom v septembru in oktobru.

Pri nas se kljub ogromni materialni škodi, ki je bila posledica z vodo povezanih pojavov, ni dosti vlagalo v raziskovanje in omejevanje škode. V večini primerov so si pomagali tako, da so se izogibali nevarnih in se selili v varnejša območja. To je lahko dvorezen meč, saj med enim in drugim pojavom lahko mine tudi nekaj 100 let. Med tem časom ljudje pozabijo na katastrofo, ki se je zgodila oz. bi se lahko na tem navidezno varnem območju. Način odziva na take probleme se je spremenil 17.11.2000, ko se je nad vasjo Log pod Mangartom sprožil plaz, se spremenil v drobirski tok in med potovanjem porušil del vasi Log pod Mangratom ter ubil 7 ljudi. Ljudje niso več bežali pred dejstvi, temveč so s pomočjo stroke poskušali na več načinov dognati vzroke za nastanek pojava in na osnovi teh določiti ukrepe za preprečitev oz. omilitev morebitne ponovitve pojava. Tako niso pristopili k problemu samo v Logu pod Mangartom, temveč tudi v Koseču, Macesnikovem plazu ter pri Slanem blatu nad Lokavcem. Inženirji so se pri določevanju ukrepov na posameznem območju odločali tudi s pomočjo programov, ki z matematičnim izračunom določijo možne scenarije poteka drobirskega toka, njegov doseg in druge značilnosti, ki olajšajo in utemeljijo sanacijo prizadetega območja. Pri nas so največ uporabljali 2D programa PCFLOW2D in FLO-2D ter 1D program PLAZ1D. Kako so rezultati programov skladni, zakaj in kje pride do razlik je bilo v okviru diplomske naloge obravnavano, na primeru drobirskega toka v Koseču.

Rezultati globin drobirskega toka, ki jih podata 2D programa, se razlikujejo $\pm 20\%$, pri volumnu 20.000 m^3 (moker) pa pride do večjih odstopanj, in sicer $\pm 40\%$. Ker povprečne globine niso zelo velike, so relativna odstopanja razmeroma velika, saj se v določenem profilu gladini, ki jih podata PCFLOW2D in FLO-2D, razlikujeta od 0,5 m pa do maksimalno 3 m, odvisno od začetnega volumna. Razliko 40 % pri razmočenem toku si lahko razlagamo tako, da program PCFLOW2D poda realnejše rezultate oz. bolje simulira lokalne spremembe gladine kot FLO-2D. Vzrok je v konceptu modelov: PCFLOW2D upošteva lokalne spremembe gladine zaradi razlike kinetičnih členov $v^2/2g$, medtem ko FLO-2D temelji na kinematični obliki enačb, kjer se ta člen zanemari. Zato je potek gladin po modelu FLO-2D vzdolž toka nekoliko izravnane in zato nižje. Pri vodi so lokalne motnje bolj drastične in imajo

velik vpliv na končen potek gladine, kar bolje zajame program PCFLOW2D in zato poda realnejše rezultate.

Iz hidrogramov je razvidno, da čelo vala prepotuje računsko območje hitreje pri programu PCFLOW2D in ima v vseh primerih večji maksimalni pretok na izhodu iz območja. Razvidno je tudi, da so hidrogrami 1D programa zelo podobni hidrogramom programa PCFLOW2D glede pretoka kot tudi časa potovanja in tako ovržejo tezo, v kateri so razliko med maksimalnimi pretoki med 1D modelom (PLAZ1D) in 2D modelom (FLO-2D), pripisali dejstvu, da 1D model ne upošteva razlivanja toka čez rob struge, ampak avtomatično podaljša stene kanala vertikalno navzgor in s tem poveča pretok na izhodu.

Pri različnih ureditvah struge pridemo do zaključka, da oba programa prikažeta ugoden vpliv načrtovanih ureditev (zid, poglobitev, razlivno območje...), saj v večini primerov popolnoma preprečijo ogrožanje vasi in objektov. Pri tem pa moramo poudariti, da načrtovana višina zidu 1 m, po izračunih PCFLOW2D ne bi zadostovala, saj bi zid drobirski tok prelil. Prelivanje je pokazal tudi FLO-2D, vendar so višino zidu (1 m) ocenili kot zadostno za zagotavljanje varnosti pred tokovi, ker je količina prelitega materiala razmeroma majhna in prelivanje traja le krajši čas.

Pri različnih začetnih volumnih drobirskih tokov in obstoječi ureditvi dajeta programa podobne dosege za volumne 1000, 5000 in 15.000 m³, pri večjih volumnih pa pride do odstopanj, zlasti od profila 20 pa do profila 7, kjer se pri programu PCFLOW2D tok razlije izven struge oz. še dopustne meje. Pri načrtovani ureditvi (zid, poglobitev...) so, upoštevajoč doseg, tudi največji pretoki pri obeh programih na varni strani, kar pomeni, da ne ogrožajo vasi.

V splošnem je naloga pokazala tudi na pravilnost izsledkov raziskovalnega dela pri Logu pod Mangartom, kjer je PCFLOW2D ravno tako dajal višje gladine in s tem tudi nekoliko večje dosege drobirskega toka.

Primerjava rezultatov dveh različnih programov bi nam morala v prihodnje služiti za nadaljnji razvoj programov, zlasti pri razvoju reološkega dela programa in izpopolnjevanju trenjskega

člena. Potrebno bi bilo tudi razviti programski modul, ki bi omogočal račun zastajanja in odlaganja drobirskega materiala. Vsekakor pa je zaenkrat priporočljivo, da se v primeru nevarnosti pojava večjih mas drobirskega toka, ki ogrožajo naselja, za določitev ogroženih območij uporabita oba obravnavana 2D programa in kot merodajni upoštevajo najbolj neugodni rezultati.

VIRI

- Bagnold, R.A., 1954. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear, Proc. of the Royal Society of London. Series A, V. 249, 235-297.
- Četina, M., Rajar, R., 1994. Two-dimensional Dam-break Flow in a Sudden Enlargement. Int. Conf. Modelling of Flood Propagation over Initially Dry Areas, Milano, Italija, 29. 6. - 2. 7., Zbornik del, 268 - 282.
- Četina, M., Rajar, R., Zakrajšek, M., 1996. Recent Development in Dam-Break Flow Computations in Slovenia, INTERPRAEVENT 1996, Garmisch-Partenkirchen, Nemčija, 24. – 28.6.1996, Zbornik del, 5. knjiga, 89-98.
- Četina, M., Rajar, R., Krzyk M., Hojnik, T., Zakrajšek, M. 2001. Enodimenzijski in dvodimenzijski matematični modelmurastega toka od plazju Stože pod Mangartom do Loga pod Mangartom in ocena ogroženosti naselja Loga pod Mangartom. Projekt 94-KMTe/d-57. Vodnogospodarski biro Maribor d.d., UL, FGG, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem: 35f.
- Četina, M., Rajar, R., Krzyk M., Hojnik, T., Zakrajšek, M. 2003. Dopolnilni računi z dvodimenzijskim matematičnim modelom murastega toka na območju Loga pod Mangartom in novelacija ocene ogroženosti. Projekt e/d-57-1, e/d-56-2 2503/03. Vodnogospodarski biro Maribor d.d., UL, FGG, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem: 23f.
- Četina, M., Rajar, R., Krzyk M., Zakrajšek, M., Žagar, D. 2004. Izdelava enodimenzijskega matematičnega modela drobirskih tokov od plazju Strug do naselja Ladre in izdelava ocene prevodnosti urejene struge Brusnika v Koseču za drobirske tokove, Končno poročilo. UL, FGG, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem: 35f .
- Egashira, S., Ashida K., Yajima H., Takahama J. 1989. Constitutive equations of debris flow, Annuals of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University. No. 32B-2, 487-501.
- Einstein, H.A. 1950. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. USDA Tech. Bull. No. 1026.

- Fazarinc, R., 2002. Matematično modeliranje drobirskega toka v Logu pod Mangartom. Magistrska naloga, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za hidrotehniko: 170f.
- Gerčer, S. 2000. Matematično modeliranje dvodimenzionalnih turbulentnih tokov v krivočrtnih koordinatnih sistemih. Acta hydrotechica 18, 28: 3-40.
- Gosman, A. D., F.J.K. Ideriah. 1976. TEACH – T: A general computer program for two-dimensional, turbulent, recirculating flows, Dept. Of Mechanical Engineering, Imperial College, London.
- Hromadka, T.V., Yen, C.C. 1987. Diffusive hydrodynamic model, U. S. Geological Survey, Water Resources Investigations, Denver Federal Center, Colorado. Report 87-4137.
- Inštitut za vode, d.o.o., 2004. Idejna zasnova celostne vodarske ureditve vplivnega območja plazu Strug v občini Kobarid. Št. proj. 204-FR/04.
- Krzyk, M., Četina, M. 2003. Dvodimenzijski matematični model transporta lebdečih plavin. Strojniški vestnik. 49, 3: 43.
- Meyer-Peter, E., Muller R. 1948. Formulas for bedload transport, Proc. IAHR, 2nd Congress, Stockholm. 39-64.
- Ministrstvo za okolje in prostor, Direktorat za prostor, Urad za prostorski razvoj. 2005. Lokacijski načrt za vplivno območje plazu Strug nad vasjo Koseč v občini Kobarid http://www.sigov.si/upr/doc/PJR_popravek.pdf (5.4.2006)
- O'Brien, J. S., 1999. FLO Engineering Inc., Users manual, Version 99.1, Civil and Water Resources Engineering, Beckenridge, USA.
- O'Brien, J. S., 2004. FLO - 2D, Users manual. Version 2004.10. FLO -2D Engineering Inc. <http://www.flo-2d.com/about.htm> (29.3.2006)
- O'Brien, J.S., Julien, P.Y. 1985. Physical processes of hyperconcentrated sediment flows, Proc. of the ASCE Specialty Conf. on the Delineation of Landslides, Floods, and Debris Flow Hazards in Utah, Utah Water Research Laboratory. Series UWRL/g-85/03, 260-279.
- Takahashi, T. 1979. Debris flow on prismatic open channel flow. J. of the Hyd. Div., ASCE, 106(3), 381 - 396.
- Vodnogospodarski biro Maribor d.d. (VGB), 2004. Dvodimenzijski matematični model drobirskih tokov na območju Koseča z oceno ogroženosti naselja Koseč zaradi njihovega delovanja. Št.proj. 2644/04.

PRILOGE

Priloga 1: Vzdolžni prerez pri zdrs 25.000 m³ in obstoječi ureditvi

Priloga 2: Vzdolžni prerez pri stalnem toku $500 \text{ m}^3/\text{s}$ in obstoječi ureditvi

Priloga 3: Vzdolžni prerez pri zdrs 20.000 m³ (moker) za obstoječo in načrtovano ureditev

Priloga 4: Vzdolžni prerez pri zdrs 15.000 m³ za obstoječo in načrtovano ureditev

Priloga 5: Vzdolžni prerez pri zdrs 5000 m³ za obstoječo in načrtovano ureditev

Priloga 6: Vzdolžni prerez pri zdrs 1000 m³ za obstoječo in načrtovano ureditev

Priloga 7: Vzdolžni prerez pri zdrs 25.000 m³ in načrtovani ureditvi

Priloga 8: Vzdolžni prerez pri stanem toku $500 \text{ m}^3/\text{s}$ in načrtovani ureditvi

Priloga 9: Vzdolžni prerez pri zdrsuh 20.000 (moker), 15.000, 5000, 1000 m³ in načrtovani ureditvi 2004

Priloga 10: Skica sprememb pri načrtovani ureditvi 2004

Priloga 11: Izračunane envelope dosega toka različnih programov pri 25.000 m³ in obstoječi ureditvi

Priloga 12: Izračunane envelope dosega toka različnih programov pri stalnem toku $500 \text{ m}^3/\text{s}$ in obstoječi ureditvi

Priloga 13: Konacija globin PCFLOW2D pri stalnem toku $500 \text{ m}^3/\text{s}$ in obstoječi ureditvi

Priloga 14: Conacija globin FLO-2D pri stalnem toku $500 \text{ m}^3/\text{s}$ in obstoječi ureditvi

Priloga 15: Izračunane envelope dosega toka različnih programov pri 20.000 m³ (moker) in obstoječi ureditvi

Priloga 16: Izračunane envelope dosega toka programa PCFLOW2D pri 15.000, 5000 in 1000 m³ in obstoječi ureditvi

Priloga 17: Izračunane envelope dosega toka različnih programov pri 25.000 m³ in načrtovani ureditvi

Priloga 18: Izračunane envelope dosega toka različnih programov pri stalnem toku $500 \text{ m}^3/\text{s}$ in načrtovani ureditvi

Priloga 19: Izračunane envelope dosega toka programa PCFLOW2D pri 20.000 (moker), 15.000, 5000, 1000 m³ in načrtovani ureditvi

Priloga 20: Hitrostno polje za konstanten pretok $500 \text{ m}^3/\text{s}$ in obstoječi ureditvi terena

Priloga 21: Hitrostno polje za konstanten pretok $500 \text{ m}^3/\text{s}$ in načrtovani ureditvi terena

Priloga 22: Hitrostno polje pri volumnu 25.000 m³ in obstoječi ureditvi terena

Priloga 23: Hitrostno polje pri volumnu 25.000 m³ in načrtovani ureditvi terena