

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Zevnik, J., 2015. Dopolnitve enodimenzij-skega matematičnega modela drobrskega toka in snežnih plazov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Četina, M.): 23 str.

Datum arhiviranja: 02-10-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Zevnik, J., 2015. Dopolnitve enodimenzij-skega matematičnega modela drobrskega toka in snežnih plazov. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Četina, M.): 23 pp.

Archiving Date: 02-10-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVO

Kandidat:

JURE ZEVNIK

**DOPOLNITVE ENODIMENZIJSKEGA
MATEMATIČNEGA MODELA DROBRskega TOKA
IN SNEŽNIH PLAZOV**

Diplomska naloga št.: 235/B-GR

**ACCOMPLISHMENTS OF ONE-DIMENSIONAL
MATHEMATICAL MODEL OF DEBRIS FLOW AND
SNOW AVALANCHES**

Graduation thesis No.: 235/B-GR

Mentor:
prof. dr. Matjaž Četina

Ljubljana, 24. 09. 2015

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Jure Zevnik izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Dopolnitve enodimenzijskega matematičnega modela drobirskega toka in snežnih plazov«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 14. 9. 2015

Jure Zevnik

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	532:556.5(497.4)(043.2)
Avtor:	Jure Zevnik
Mentor:	prof. dr. Matjaž Četina
Naslov:	Dopolnitve enodimenzijskega matematičnega modela drobirskega toka in snežnih plazov
Tip dokumenta:	Diplomska naloga - univerzitetni študij
Obseg in oprema:	23 str., 6 preg., 9 graf., 23 en.
Ključne besede:	modeliranje drobirskih tokov, dinamika snežnih plazov, matematični model PLAZEM15, udarna sila, enodimenzijski matematični model, St. Venantove enačbe

Izvleček

Nevarnosti, ki jih povzročajo drobirski tokovi in snežni plazovi ni mogoče popolnoma preprečiti. Zato se razvijajo matematični modeli teh pojavov, kar nam omogoča, da lahko ustrezno načrtujemo zaščitne ukrepe na ogroženih območjih. Enodimenzijski model PLAZEM15 omogoča analizo nestalnega toka različnih vrst tekočin s prosto gladino, natančneje toka vode, drobirskega toka in snežnih plazov. V prvem delu diplomskega dela so predstavljene teoretične osnove za modeliranje nestalnega toka tekočine in udarne sile plazov. Sledijo rezultati občutljivostne analize modela na spreminjanje začetne strižne trdnosti in viskoznosti drobirskega materiala, ter na spreminjanje topografskih parametrov, ki obsegajo razširitve in spremembe v naklonu dna struge. Vpliv spreminjanja topografije je bil preverjen za drobirske tokove in snežne plazove, za katere so bili ponovljeni računi, ki so bili na Katedri za Mehaniko tekočin opravljeni leta 1980, z namenom primerjave rezultatov. V zadnjem delu naloge so predstavljeni izračuni udarne sile na objekt za izbrane primere drobirskih tokov in snežnih plazov.

Končni rezultati so pokazali, da obravnavani modeli, ki opisujejo dinamiko drobirskega toka in snežnih plazov večinoma dajejo logične rezultate, vendar bi jih bilo treba za dokončno verifikacijo še nadalje preveriti. Predvsem bi bilo nujno narediti primerjavo z rezultati meritev, ki jih v tej fazi naloge ni bilo na razpolago.

BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 532:556.5(497.4)(043.2)
Author: Jure Zevnik
Supervisor: Prof. Matjaž Četina, Ph.D.
Title: Accomplishments of one-dimensional mathematical model of debris flow and snow avalanches
Document type: Graduation Thesis - University studies
Scope and tools: 23 p., 6 tab., 9 graph., 23 eq.
Keywords: mathematical modeling of debris flow, snow avalanche dynamics, PLAZEM15 mathematical model, impact force, one-dimensional mathematical model, St. Venant equations

Abstract

Due to inability to entirely prevent debris flow and snow avalanches, it is reasonable to develop mathematical models that allow us to predict and design sufficient protection measures in endangered areas. One dimensional model PLAZEM15 allows analysis of unsteady flow of fluids, such as free surface water flow, debris flow and snow avalanches. Theoretical background for mathematical modeling of unsteady flow of fluids and their impact force is described in the first part of the thesis. Further on the thesis describes results of sensitivity analysis of the model in which the initial shear stress, viscosity of the debris material and topographic parameters, including changes in the slope of the channel bed and gradual extension of channel width, were modified. The impact of changes in topography was examined for debris flow and snow avalanches. These simulations were already made in 1980 in the frame of the Chair of Fluid mechanics of the faculty, and the results were compared. In the last part of the thesis calculations of the impact force of flow were made for selected cases of debris flow and snow avalanches.

The final results of the analysis showed, that tested numerical models give basically good results, however, further verification will be necessary before final applications. Comparison with results of some field measurements, not available in this study, would be very important.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Matjažu Četini in somentorju prof. dr. Rudolfu Rajarju, za pomoč in spodbudo pri izdelavi diplomske naloge.

Zahvaljujem se družini za podporo v času študija in Niki za spodbudno besedo v času izdelave diplomskega dela.

KAZALO VSEBINE

Bibliografsko - dokumentacijska stran in izvleček.....	III
Bibliographic - documentalistic information and abstract.....	IV
Zahvala	V
Kazalo preglednic	VI
Kazalo grafikonov	VII
1 UVOD	1
2 ENODIMENZIJSKE SIMULACIJE DROBIRSKEGA TOKA IN SNEŽNIH PLAZOV	2
2.1 Kontinuitetna in dinamična enačba	2
2.2 Enačbe za upoštevanje energijskih izgub	3
2.2.1 Tok vode: Manningova enačba.....	3
2.2.2 Drobirski tok: Binghamov reološki model po O'Brienu.....	3
2.2.3 Snežni plazovi: Woellmyjeve enačbe.....	4
2.3 Enačbi za izračun udarne sile na objekte.....	5
2.4 Opis programa PLAZEM15	6
2.5 Opis programa LAPLAZ.....	6
3 DVODIMENZIJSKE SIMULACIJE DROBIRSKEGA TOKA IN SNEŽNIH PLAZOV	8
3.1 Kontinuitetna in dinamični enačbi.....	8
3.2 Enačbe za upoštevanje energijskih izgub	9
3.3 Opis programa PCFIOW2D	9
3.4 Opis programa Flo2D	9
4 SIMULIRANI PRIMERI	11
4.1 Osnovni primer za drobirski tok.....	11
5 VPLIV PARAMETROV NA DOSEG PLAZU	14
5.1 Mejna strižna trdnost τ_y	14
5.2 Viskoznost μ	15
6 VPLIV TOPOGRAFIJE NA DOSEG PLAZU.....	17
6.1 Drobirski tok.....	17
6.2 Snežni plaz.....	17
7 IZRAČUN UDARNE SILE	20
7.1 Drobirski tok.....	20
7.2 Snežni plaz.....	20
8 ZAKLJUČEK	22
VIRI.....	23

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Čas plazenja in doseg plazu v odvisnosti od τ_y	14
Preglednica 2: Čas plazenja in doseg plazu v odvisnosti od μ	15
Preglednica 3: Čas plazenja in doseg plazu v odvisnosti od topografije terena (razširitev).	17
Preglednica 4: Čas plazenja in doseg plazu v odvisnosti od topografije terena (lom naklona dna).....	17
Preglednica 5: Rezultati s pripadajočimi parametri serije AA (L_{max}) in primerjava z rezultati serije A iz leta 1980 (L_{max80}).	18
Preglednica 6: Rezultati s pripadajočimi parametri serije CC (L_{max}) in primerjava z rezultati serije C iz leta 1980 (L_{max80}).....	18

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Napredovanje plazu za osnovni primer drobirskega toka.	12
Grafikon 2: Višine toka za osnovni primer drobirskega toka v različnih časih.	12
Grafikon 3: Ovojnica maksimalnih višin za osnovni primer drobirskega toka.	13
Grafikon 4: Čas plazenja v odvisnosti od τ_y	14
Grafikon 5: Doseg plazu v odvisnosti od τ_y	15
Grafikon 6: Čas plazenja v odvisnosti od μ	16
Grafikon 7: Doseg plazu v odvisnosti od μ	16
Grafikon 8: Primerjava rezultatov iz leta 1980 in 2015 za prizmatično strugo s konstantno širino.	19
Grafikon 9: Primerjava rezultatov iz leta 1980 in 2015 za prizmatično strugo z razširitvijo.	19

1 UVOD

Naravnih nesreč zaradi nepredvidljivosti in njihovega obsega velikokrat ne moremo preprečiti, lahko pa z ustreznimi ukrepi omejimo povzročeno škodo in preprečimo človeške žrtve. Podobno velja za plazove, ki predvsem v gorskem in hribovitem svetu ogrožajo višje ležeča naselja, ceste, smučarske komplekse in ostalo infrastrukturo. Zaradi tega je smiselna njihova analiza za boljše razumevanje pojava in možnost modeliranja različnih scenarijev z namenom uporabe ustreznih zaščitnih ukrepov. Tako v prihodnje lahko omejimo škodo na ogroženih območjih, kjer so se plazovi v preteklosti že sprožili ali pa se v bodoče lahko sprožijo po napovedih geologov ali geomehanikov. V Sloveniji med drugim sodijo plaz Stože v Logu pod Mangartom, plaz Koseč nad Kobaridom in plaz Slano blato nad Lokavcem v Vipavski dolini. Posebej velja omeniti plaz Stože, ki je 17. novembra 2000 v Logu pod Mangartom terjal 7 smrtnih žrtev in poškodoval 23 hiš. Od tega so bile 4 hiše popolnoma porušene. Matematični model je v tem primeru dal dovolj zanesljive podatke za nujno zaščito pred bodočimi možnimi plazovi (Četina in sod., 2001, Četina in sod., 2006).

Drobirski tok in tudi gibanje snežnih plazov lahko do neke mere smatramo kot analogna toku tekočine, ki pa ima sicer drugačne reološke lastnosti kot voda. Tako so v osnovi enačba kontinuitete in dinamična enačba uporabljene v isti obliki, upor gibanja ter vpliv viskoznosti pa sta opisana z drugačnimi enačbami, kot je prikazano v poglavju 2.2.

V tej diplomski nalogi sem se ukvarjal z dinamiko plazov, natančneje snežnih plazov in drobirskih tokov. Glavni namen naloge je bil, ugotoviti vpliv posameznih parametrov in topografije terena na doseg plazu in pri tem primerjati veljavnost in točnost nekaterih modelov. Za izbrane primere pa sem izračunal še pričakovano udarno silo plazu na objekt.

2 ENODIMENZIJSKE SIMULACIJE DROBIRSKEGA TOKA IN SNEŽNIH PLAZOV

2.1 Kontinuitetna in dinamična enačba

Ker se v naravi drobirski tokovi in snežni plazovi pojavljajo v obliki nestalnega toka tekočine, jih je smiselno temu primerno obravnavati (Fazarinc, 2002). Osnovo za to predstavljata I. in II. St. Venantova enačba, ki opisujeta nestalni tok s prosto gladino:

- 1. St. Venantova enačba (kontinuitetna en.),

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

- 2. St. Venantova (dinamična en.).

$$\frac{dv}{dt} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(I_0 - I) \quad (2)$$

Slednjo lahko zapišemo tudi v konservativni obliki, ki temelji na principu ohranitve gibalne količine (Rajar, 1980b).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{S} \right)}{\partial x} + gS \frac{\partial h}{\partial x} = gS(I_0 - I) \quad (3)$$

Če namesto globin toka h vpeljemo koto gladine z , dobimo naslednji izraz (Rajar, 1980b).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{S} \right)}{\partial x} + gS \frac{\partial z}{\partial x} = -gSI \quad (4)$$

V enačbi (3) prva dva člena predstavljata vztrajnostno silo, tretji člen pa silo, ki nastane zaradi razlike tlakov na sprednjo in zadnjo ploskev in je posledica razlike v globini toka. Člen na desni strani enačaja predstavlja razliko med silo težnosti in silami, ki povzročajo izgube energije v toku (Rajar, 1980b).

Kjer je:

- h ... globina toka [m],
- v ... povprečna hitrost v smeri x [m/s],
- g ... težnostni pospešek [m/s²],
- I_0 ... naklon dna terena v smeri x [-],
- I ... naklon energijske črte v smeri x [-],
- z ... kota gladine [m].

Pri uporabi zgornjih enačb se moramo zavedati naslednjih predpostavk:

- vertikalna in prečna komponenta hitrosti sta zanemarljivo majhni,
- hidrostatična razporeditev tlakov v preseku,
- razdelitev hitrosti v preseku je enakomerna,
- naklon dna je majhen (Rajar, 1980b).

2.2 Enačbe za upoštevanje energijskih izgub

V dinamični enačbi (2, 4) nastopa člen I, ki predstavlja naklon energijske črte in izraža bistveno razliko med tokom vode in drobirskega toka in snežnega plaz, ki spadata med newtonske tekočine, kar dodatno oteži matematično analizo procesa. Za slednje vemo, da se za razliko od vode, lahko ustavijo tudi na nagnjenem pobočju z nagnjeno gladino. Razlog za to so večje energijske izgube, ki so posledica večje viskoznosti mešanice (npr. drobirskega toka) od vode in trka delcev med tokom. Torej je drobirski tok ali snežni plaz snov, ki jo je, reološko gledano, treba obravnavati delno kot tekočino in delno kot trdno snov (Četina in sod., 2001).

2.2.1 Tok vode: Manningova enačba

Za računsko analizo toka vode s prosto gladino pogosto uporabljamo Manningovo enačbo, ki omogoča izračun povprečne hitrosti toka v strugi. V enačbi so izgube zaradi trenja upoštevane v Manningovem koeficientu trenja n_G , katerega vrednosti za različne tipe strug in vegetacije najdemo v ustreznih priročnikih (Steinman, 1999).

$$\bar{v} = \frac{1}{n_G} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{I_0} \quad (5)$$

Kjer je:

- \bar{v} ... povprečna hitrost toka [m/s],
- R ... hidravlični radij [m],
- I_0 ... naklon dna struge [-],
- n_G ... Manningov koeficient hrapavosti [$s/m^{1/3}$].

2.2.2 Drobirski tok: Binghamov reološki model po O'Brienu

Obstaja več enačb različnih avtorjev, ki izražajo naklon energijske črte in temeljijo na različnih reoloških modelih. V programu PLAZEM15, ki sem ga uporabljal tekom diplomske naloge je upoštevan kvadratni reološki model Julien-O'Brien. Isti model je uporabljen tudi v komercialnem ameriškem programu Flo2D (Četina in sod., 2001).

$$\tau = \tau_y + \mu * \left(\frac{dv}{dy}\right) + C * \left(\frac{dv}{dy}\right)^2 \quad (6)$$

Energijske izgube so v tem modelu izražene kot vsota treh členov. Prvi člen zajema vpliv mejne strižne napetosti, ki je določena z Mohr-Colombovim zakonom. Drugi člen predstavlja vpliv viskoznosti, tretji člen pa izraža vpliv turbulentnosti toka in disperzivnosti delcev (Fazarinc, 2002).

$$I = I_y + I_v + I_{td} \quad (7)$$

$$I = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K\mu v}{8\gamma_m h^2} + \frac{n_g^2 v^2}{h^{4/3}} \quad (8)$$

Kjer je:

- τ_y ... mejna strižna trdnost [N/m^2],
- μ ... dinamična viskoznost [kg/ms],
- γ_m ... prostorninska teža mase [N/m^3],
- K ... konstanta upora turbulentnega toka [-],
- n_g ... Manningov koeficient hrpavosti [-].

2.2.3 Snežni plazovi: Woellmyjeve enačbe

Woellmy je na podlagi opazovanj zapisal enačbe za izračun hitrosti, dosega in udarne sile ploskovnih snežnih plazov. Te temeljijo na hidravliki stalnega enakomernega toka in so danes najbolj uporabne za grobo oceno oz. hiter izračun osnovnih parametrov snežnih plazov (Kvaternik, 1980).

Avtor je enačbo za hitrost zapisal na podlagi 2. Newtonovega zakona, pri katerem je upošteval, da na snežno maso delujejo naslednje sile:

- sila teže,
- sila trenja med kontaktno ploskvijo in snegom,
- sila trenja znotraj snežne mase, ki nastane zaradi turbulentnega toka.

$$v = [\xi h(\sin\psi - \mu\cos\psi)]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Ker je zgornja enačba zapisana za ploskovni plaz, lahko za račun plazu poljubne oblike višino h nadomestimo s hidravličnim radijem R . Poleg hitrosti plazu nas navadno najbolj zanima njegov doseg. Avtor je zapisal spodnji izraz na podlagi energijskega ravnovesja in upošteval, da se plaz ustavi, ko je energijska višina enaka vsoti globine snežne mase in tlačne višine (Kvaternik, 1980).

$$S = \frac{v^2}{2g(\mu\cos\psi_u - tg\psi_u) + \frac{v^2 g}{\xi h_m}} \quad (10)$$

Kjer je:

- S ... doseg plazu [m],
- h ... navpična višina snega [m],
- v ... hitrost vzdolž pobočja [m/s],
- ψ ... naklon pobočja [$^\circ$],
- ξ ... koeficient turbulentnega trenja [m/s^2],
- μ ... koeficient kinetičnega trenja [-],
- g ... težnostni pospešek [m/s^2],
- ψ_u ... naklon cone iztekanja [-],
- h_m ... povprečna višina snežnih ostankov [m].

V enačbi za doseg (10) nastopa povprečna višina snežnih ostankov, ki jo različni avtorji različno podajajo. Osnovni obrazec po Woellmy-ju predstavlja enačba (11) (Kvaternik, 1980).

$$h_m = h_0 + \frac{v^2}{4g} \quad (11)$$

Če za izračun energijskih izgub upoštevamo Woellmyjevo formulacijo, moramo zajeti vpliv kinetičnega in turbulentnega trenja (Kvaternik, 1980).

$$I = F_s \cos \psi + F_d \frac{Q^2}{RS^2} \quad (12)$$

Kjer :

- F_s predstavlja koeficient kinetičnega trenja in je enak μ
- F_d predstavlja koeficient turbulentnega trenja in je enak $\frac{1}{8\sigma}$

2.3 Enačbi za izračun udarne sile na objekte

V splošnem obstajata dve osnovni enačbi za izračun udarne sile plazu oz. tlaka na objekt. Prva je izpeljana iz izreka o ohranitvi energije (a), druga pa iz izreka o ohranitvi gibalne količine (b) (Rajar, 1979).

a) Upoštevajoč Bernoullijevo enačbo lahko energijsko višino toka zapišemo s spodnjim izrazom.

$$H = h' + \frac{v^2}{2g} \quad (13)$$

V enačbi h' predstavlja navpično globino plazu, v pa hitrost pred trkom. Če predpostavimo, da se ob udarcu v oviro plaz popolnoma ustavi in zanemarimo razlivanje ob strani in prelivanje čez pregrado lahko upoštevamo, da se ob udarcu sprosti celotna energija H . Za tlak plazu na objekt tako dobimo naslednjo enačbo (Rajar, 1979).

$$p = \rho g h' + \frac{\rho v^2}{2} \quad (14)$$

ρ ... gostota plazu [kg/m^3]

b) Drugo enačbo pa lahko izpeljemo iz zakona o ohranitvi gibalne količine.

$$F dt = m dv \quad (15)$$

Ob upoštevanju predpostavke iz točke a velja, da se hitrost spremeni iz vrednosti v (pred trkom) na 0 (ob trku). Tako lahko zapišemo končno enačbo za udarno silo, iz nje pa dobimo še enačbo za tlak ob trku (Rajar, 1979).

$$F = \rho S v^2 \quad (16)$$

$$p = \rho v^2 \quad (17)$$

Enačbi (14) in (17) se med seboj zelo razlikujeta, zato je smiselno omeniti, da so meritve pokazale, da je en. (17) bolj uporabna za izračun prvotnega tlaka ob udarcu, en. (14) pa za izračun tlaka kasnejšega toka za čelom plazu (Rajar, 1979).

2.4 Opis programa PLAZEM15

Program PLAZEM15 je bil razvit na Katedri za mehaniko tekočin Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani. Osnova za model je program LAPLAZ, ki ga je leta 1980 napisal prof. Rajar z namenom računa snežnih plazov (Četina in sod., 2001).

Namenjen je enodimenzijski analizi nestalnega drobirskega toka v neprizmatičnih strugah. Za upoštevanje energijskih izgub so uporabljene enačbe po Binghamu, na isti način, kot so te enačbe v modelu Flo2D upoštewane v dveh dimenzijah. PLAZEM15 je identičen modelu PLA0722, ki je bil uspešno uporabljen za reševanje problema zemeljskega plazu v Logu pod Mangartom leta 2000 (Četina in sod., 2001).

Izvedenka modela PLAZEM15 je model PLAWOEL15, v katerem je dodatno vgrajena enačba Woelmyja za upoštevanje energijskih izgub. V modelu so tako tri možnosti za upoštevanje izgub:

- a) po Manningu, veljavno za tok vode,
- b) po Binghamu, veljavno za drobirski tok oz. zemeljske plazove,
- c) po Woelmyju, veljavno za simulacijo snežnih plazov. Kot je opisano dalje, ta model ni popolnoma preizkušen, v določenih primerih se pojavlja numerična nestabilnost.

Model PLAWOEL15 je namenjen predvsem simulaciji plazov, katere sestavlja moker in težek sneg. Dinamiko te vrste plazu je namreč mogoče opisati s podobnimi enačbami, kot veljajo za tok tekočine (glej pogl. 2.1), medtem ko je potrebno za plazove, ki nastanejo v bolj suhem in lažjem snegu (pršni plazovi) uporabiti druge računske metode (Rajar, 1979).

Teoretično podlago predstavljajta enačbi (1) in (3) za nestalni tok s prosto gladino. Model rešuje sistem parcialnih diferencialnih enačb po eksplicitni metodi končnih razlik Lax-Wendroff. Ta z uporabo II. St. Venantove enačbe v konservativni obliki (3) omogoča simulacijo strmega čela vala drobirskega toka brez dodatnih enačb (Četina in sod., 2001).

Pri računu se parcialni odvodi aproksimirajo s končnimi vrednostmi, sam postopek pa poteka v dveh korakih. Najprej se izračunajo vrednosti parametrov (S, Q, z) v času $t + \Delta t/2$, nato pa še v času $t + \Delta t$ (Rajar, 1980).

2.5 Opis programa LAPLAZ

Program LAPLAZ je matematični model za računanje dinamike snežnih plazov, ki ga je leta 1979/80 razvil prof. Rajar (LMTe 1979, 1980). Model temelji na hidravliki nestalnega toka s prosto gladino in rešuje St. Venantovi enačbi po numerični metodi Lax-Wendroff. Program je enodimenzijski, kar

pomeni, da upošteva le hitrost in širjenje plazu v eni smeri (prečne in vertikalne hitrosti so zanemarjene). Prednost programa je ta, da omogoča izračun iskanih parametrov (višina plazu, hitrost) v vseh profilih in v poljubnem času, ter da omogoča analizo dinamike snežnih plazov na poljubnih neprizmatičnih plaziščih. Za upoštevanje energijskih izgub je vgrajena samo Woelmyjeva enačba, načeloma veljavna za simulacijo snežnih plazov (Rajar, 1979).

Poleg modela LAPLAZ je bil razvit tudi program PLAZOS, ki je poenostavljena verzija modela LAPLAZ in je namenjen simulaciji snežnih plazov v prizmatičnih strugah (Rajar, 1979).

3 DVODIMENZIJSKE SIMULACIJE DROBIRKEGA TOKA IN SNEŽNIH PLAZOV

3.1 Kontinuitetna in dinamični enačbi

Enačbe za hidravliko nestalnega toka tekočine s prosto gladino v dveh dimenzijah so podobne tistim iz poglavja 2.1, le da je v tem primeru upoštevano tudi premikanje tekočine v prečni smeri, zaradi česar je potrebna ena dinamična enačba več.

Osnovo za računsko analizo nestalnega drobirskega toka sta leta 1975 podala Mahmood in Yevdjevich in je sledeča (Fazarinc, 2002).

- kontinuitetna enačba,

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u_m h) + \frac{\partial}{\partial y}(v_m h) = 0 \quad (18)$$

- konservativna oblika dinamične enačbe v smeri x,

$$\frac{\partial}{\partial t}(u_m h) + \frac{\partial}{\partial x} \left[u_m^2 h + \frac{gh^2}{2} \right] + \frac{\partial}{\partial y}(hu_m v_m) = gh(S_x - S_{fx}) \quad (19)$$

- konservativna oblika dinamične enačbe v smeri y.

$$\frac{\partial}{\partial t}(v_m h) + \frac{\partial}{\partial y} \left[v_m^2 h + \frac{gh^2}{2} \right] + \frac{\partial}{\partial x}(hu_m v_m) = gh(S_y - S_{fy}) \quad (20)$$

Kjer je:

- h ... globina toka [m],
- u_m, v_m ... povprečna hitrost po globini v smeri x in y [m/s],
- g ... težnostni pospešek [m/s²],
- S_x, S_y ... naklon dna terena v smeri x in y [-],
- S_{fx}, S_{fy} ... naklon energijske črte v smeri x in y [-].

Pri uporabi zgornjih enačbah veljajo iste predpostavke, kot v poglavju 2.1. Edina razlika je ta, da pri dvodimenzijski analizi prečne hitrosti niso zanemarjene (Fazarinc, 2002).

3.2 Enačbe za upoštevanje energijskih izgub

Za upoštevanje izgub pri dvodimenzijski analizi naravnih procesov nam osnovo predstavljajo enačbe iz poglavja 2.2, le da so te po analogiji zapisane za vsako smer posebej. Tako posebej izračunamo izgube toka v smeri x in y.

3.3 Opis programa PCFLOW2D

Model PCFLOW2D je bil razvit na Katedri za mehaniko tekočin na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani. Program rešuje sistem parcialnih diferencialnih enačb (18), (19) in (20) s pomočjo Patankar-Spaldingove implicitne metoda končnih volumnov. Za račun naklona energijskih črt prav tako kakor model Flo2D uporablja O'Brienovi enačbi v dveh dimenzijah. Model se uporablja predvsem za analizo dvodimenzijskega toka vode in drobirskih tokov. Uporabljen je bil tudi za obravnavo plazov in preverbo zaščitnih ukrepov za plaz v Logu pod Mangartom leta 2000 (Četina in sod., 2001).

3.4 Opis programa Flo2D

Model Flo2d je bil razvit v ZDA, v komercialni prodaji, in je bil prvotno namenjen analizi drobirskih tokov (program Mudflow), danes pa se uporablja tudi za poplavne študije. Pri nas je bil med drugim uporabljen tudi za računsko analizo plazov v Logu pod Mangartom leta 2000. Zaradi pomembnosti problema (zaščita človeških življenj) sta bila v tem primeru uporabljena oba modela, PCFLOW2D in Flo2D, katerih rezultati so bili primerjani (Četina in sod., 2001).

Model rešuje St. Venantove enačbe za nestalni tok s prosto gladino v dveh dimenzijah z eksplicitno metodo končnih razlik:

- kontinuitetna enačba,

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V_x}{\partial x} + \frac{\partial h V_y}{\partial y} = i \quad (21)$$

- dinamična enačba v smeri x,

$$S_{fx} = S_{0x} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \quad (22)$$

- dinamična enačba v smeri y.

$$S_{fy} = S_{0y} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_y}{\partial t} \quad (23)$$

Kjer je:

- h ... globina toka [m],
- V_x, V_y ... povprečna hitrost v smeri x in y [m/s],
- g ... težnostni pospešek [m/s^2],
- S_{0x}, S_{0y} ... naklon dna terena v smeri x in y [-],
- S_{fx}, S_{fy} ... naklon energijske črte v smeri x in y [-],
- i ... intenziteta padavin [m/s].

Za izračun energijskih izgub model uporablja O'Brienovi enačbi v dvodimenzijski obliki (Četina in sod., 2001).

4 SIMULIRANI PRIMERI

Moje delo je zajemalo računsko analizo drobirskih tokov in snežnih plazov v programu PLAZ1D oz. PLA0722, kasneje PLAZEM15, PLAWOEL15 in Flo2D. Za oba pojava sem poskusil določiti vpliv spreminjanja parametrov in topografije na doseg plazov. Spreminjal sem mejno strižno trdnost (τ_y) in viskoznost (μ) mase, v okviru topografije pa sem dodal različne razširitve kanala in lome v višinskem profilu. Za snežne plazove pa sem na koncu še ponovil nekatere izračune, ki so dokumentirani v poročilu Dinamika snežnih plazov, 2. del (Rajar, 1980a) in primerjal rezultate.

Večino časa sem delal s programom PLAZ1D, katerega uporaba je sorazmeroma enostavna. Prof. Rajar mi je pripravil model in nastavil nekatere računske parametre v programu, ter določil vrednosti parametrov in topografske podatke, za katere sem izvedel račune. Vseeno pa je bilo potrebno narediti še nekaj poskusnih serij, preden sem lahko začel dokumentirati rezultate.

Za definicijo prečnih profilov sem si pomagal s programom Visual Studio, v katerem sem napisal osnoven program za zapis poljubnih profilov. Ta se je izkazal za zelo uporabnega, saj bi bilo ročno vnašanje podatkov zaradi količine neprimerno. Rezultate sem dokumentiral v tabelah, za grafični prikaz pa sem uporabil program Microsoft Excel. Naredil sem tudi serijo računov, v kateri sem preverjal vpliv spremembe računskih parametrov Hminlr (minimalna višina na levem robu, ki jo model še upošteva pri računu) in Hvminza (numerična omejitev, ki jo program upošteva pri računanju členov upora) v programu, katerih definicija je potrebna zaradi samega izračuna. Spreminjanje le teh ni vplivalo na rezultate, tako da lahko zaključim, da so bile vrednosti dobro izbrane.

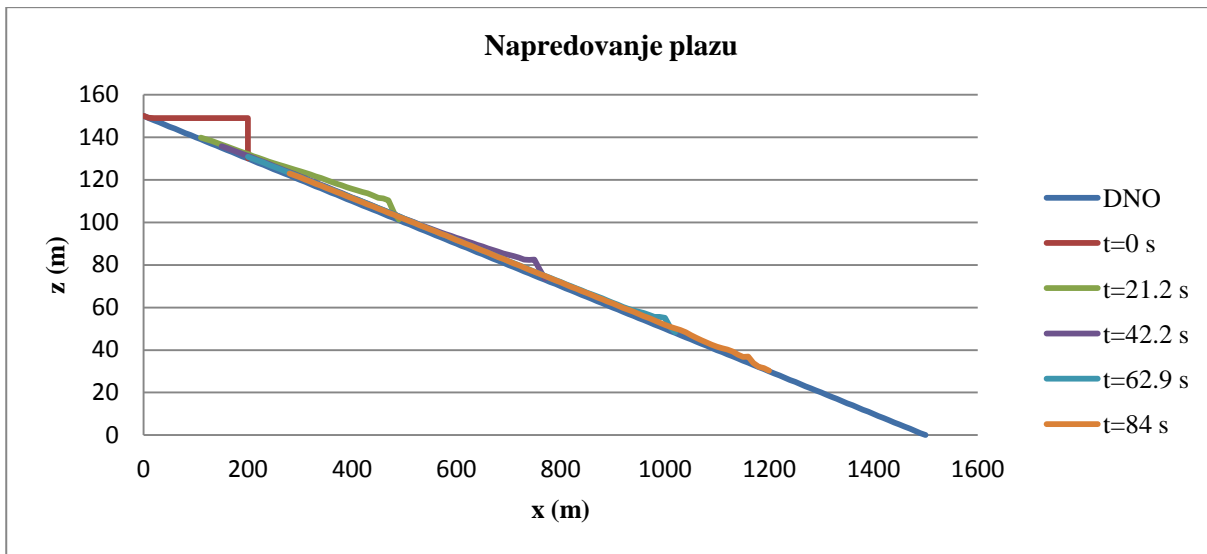
Poskusil sem tudi z analizo snežnih plazov v programu Flo2D, vendar se je izkazalo, da zaradi drugačnega reološkega modela (Julien-O'Brien) rezultati niso primerljivi. Že v osnovnem opisu tega modela je navedena možnost simulacije vodnega ali drobirskega toka, ne pa tudi snežnih plazov. Podoben problem je nastal pri analizi snežnih plazov v programu PLAZ1D. Za račun snežnih plazov se namreč najbolj široko uporablja Woellmy-jev model, ki uporablja drugačne parametre. Povezav med njimi pa ni, tako da primerjava ne more biti natančna. To je bil tudi razlog, da je prof. Rajar v model PLAZEM15 dodal še modul za račun energijskih izgub po Woellmy-ju. Izbrane račune je nato prof. Rajar ponovil v novem programu PLAWOEL15 in so predstavljeni v poglavju 6.2.

4.1 Osnovni primer za drobirski tok

Osnova za račune z modelom PLAZEM15 in primerjavo rezultatov je bil tako imenovani osnovni ali standardni primer. To je prizmatični kanal širine 10 m s konstantnim naklonom terena 10%. Prečne profile sem definiriral na vsakih 10 m. V modelu je upoštevano, da začetna masa miruje in je zbrana za pregrado višine 20 m (glej grafikon 1, $t = 0$ s). Ta se ob začetku simulacije poruši, kar sproži drobirski tok po hribu navzdol. Pregrada stoji na stacionaži 200 m, kar pomeni, da je bilo za njo akumuliranih približno 18000 m^3 materiala. Upoštevani podatki o materialu pa so naslednji:

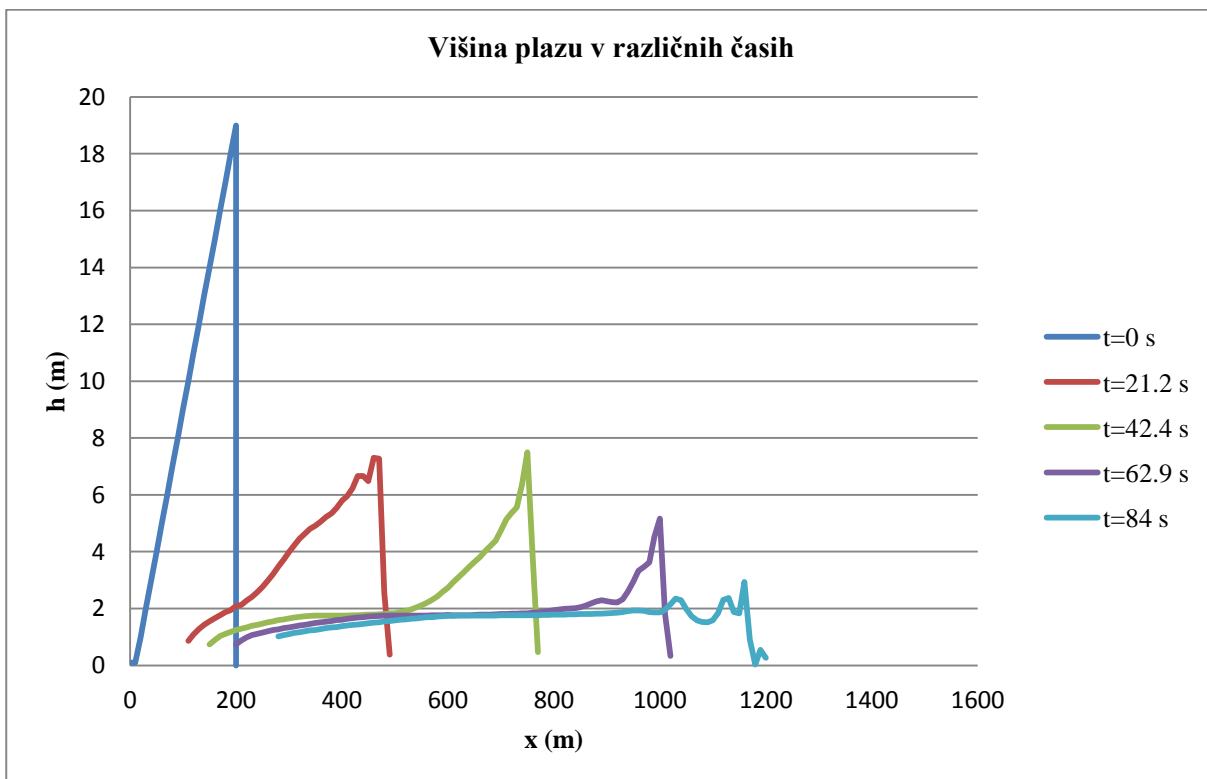
- $\mu = 8 \text{ kg/ms}$,
- $\tau_y = 6 \text{ N/m}^2$,
- $N_g = 0,05 \text{ s/m}^{1/3}$,
- globina toka pred čelom plazov je bila predpostavljena na $H_{sp} = 0.3 \text{ m}$,
- $\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$.

Doseg plazju je v tem primeru znašal 1200 m, čas plazenja pa 84 s. Na spodnjem diagramu je prikazano gibanje plazju v različnih časih.



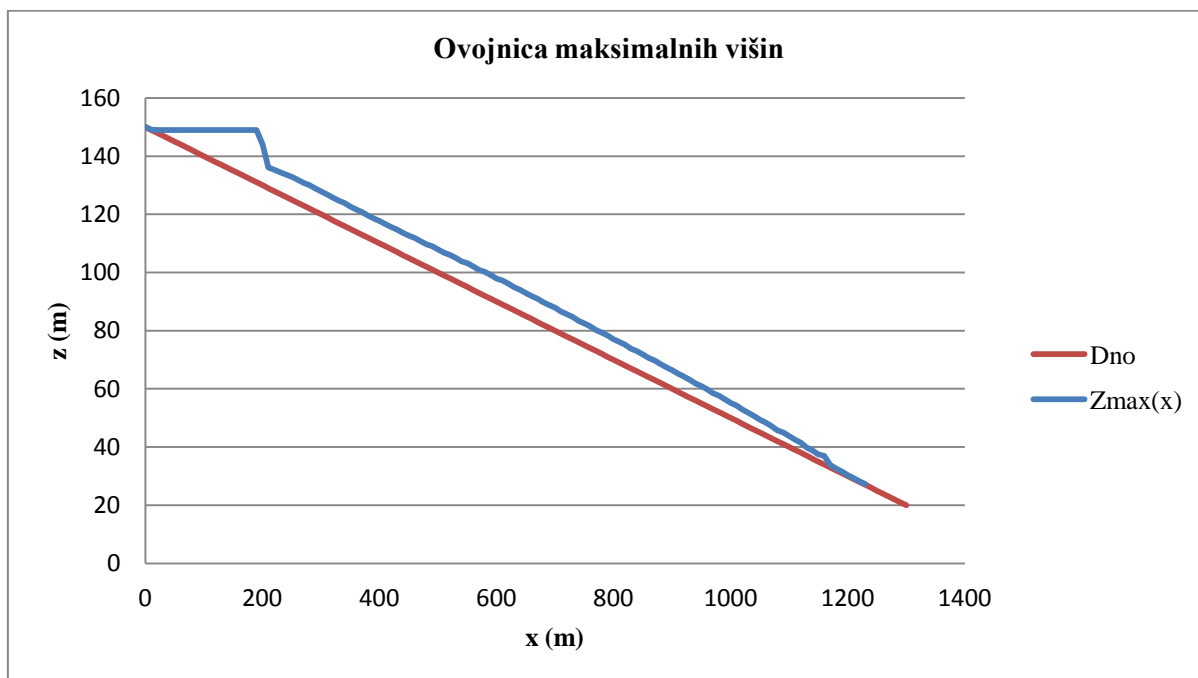
Grafikon 1: Napredovanje plazju za osnovni primer drobirskega toka.

Za detajlnejši vpogled v višine mase med širjenjem prilagam še spodnji diagram.



Grafikon 2: Višine toka za osnovni primer drobirskega toka v različnih časih.

V praksi nas navadno poleg dosega zanima tudi ovojnica maksimalnih višin, zato jo podajam tudi za osnovni primer.



Grafikon 3: Ovojnica maksimalnih višin za osnovni primer drobirskega toka.

5 VPLIV PARAMETROV NA DOSEG PLAZU

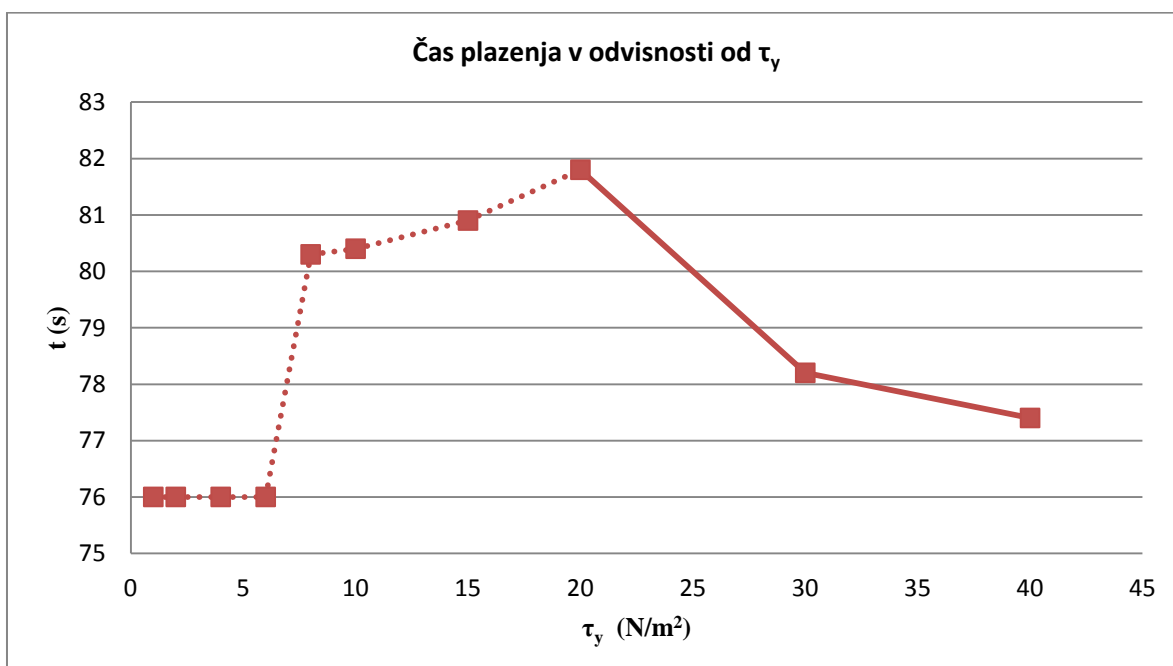
V tem poglavju so predstavljeni rezultati simulacij drobirskega toka pri različnih lastnostih drobirske mase.

5.1 Mejna strižna trdnost τ_y

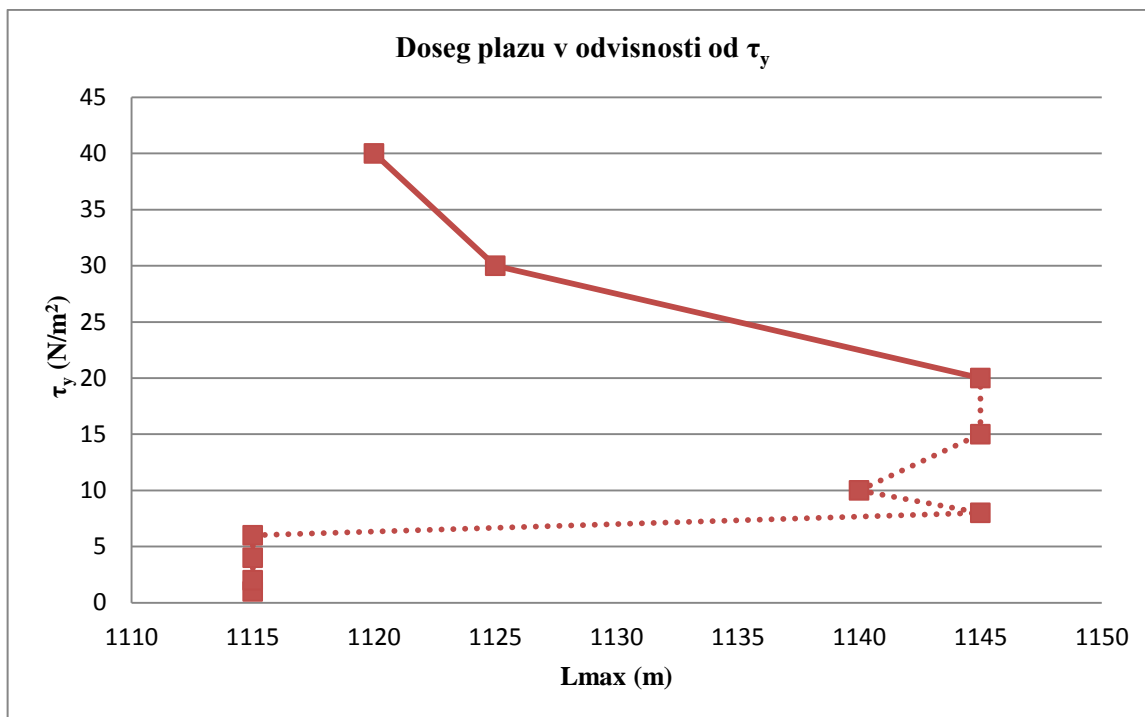
V tej seriji računov sem za osnovo vzel standardni primer in za različne vrednosti τ_y preveril doseg in čas plazenja. Rezultate sem dokumentiral v tabeli in za lažjo primerjavo tudi grafično. Zaradi boljših rezultatov sem kasneje ponovil serijo še za razmak med prečnimi profili $\Delta x = 5$ m, tako da podajam samo dobljene vrednosti pri tem Δx .

Preglednica 1: Čas plazenja in doseg plazu v odvisnosti od τ_y .

τ_y (N/m ²)	t (s)	Lmax (m)
1	76,0	1115
2	76,0	1115
4	76,0	1115
6	76,0	1115
8	80,3	1145
10	80,4	1140
15	80,9	1145
20	81,8	1145
30	78,2	1125
40	77,4	1120



Grafikon 4: Čas plazenja v odvisnosti od τ_y .



Grafikon 5: Doseg plazov v odvisnosti od τ_y .

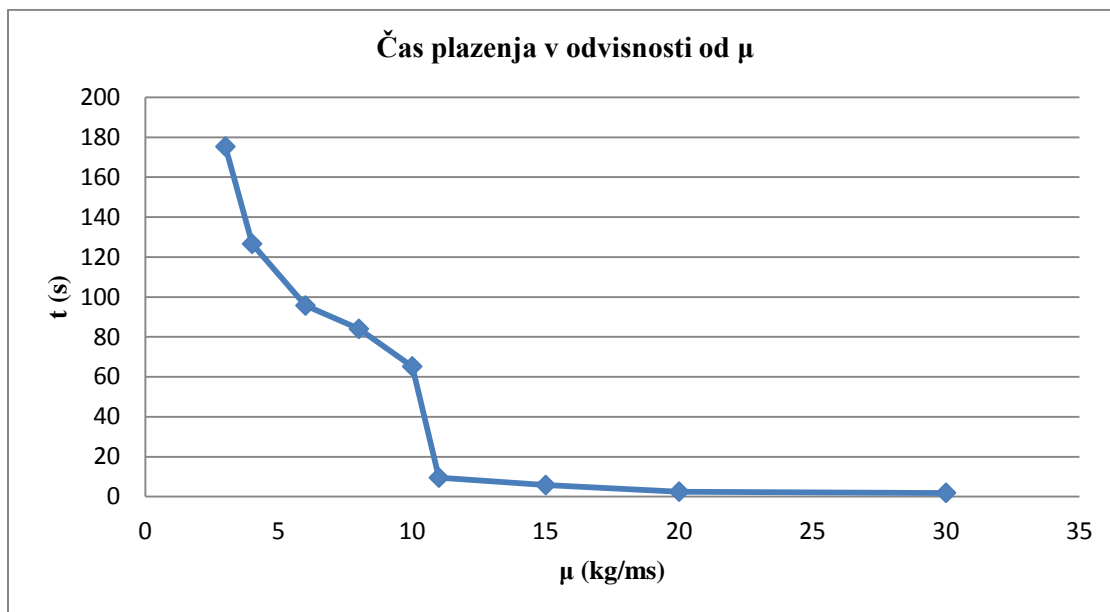
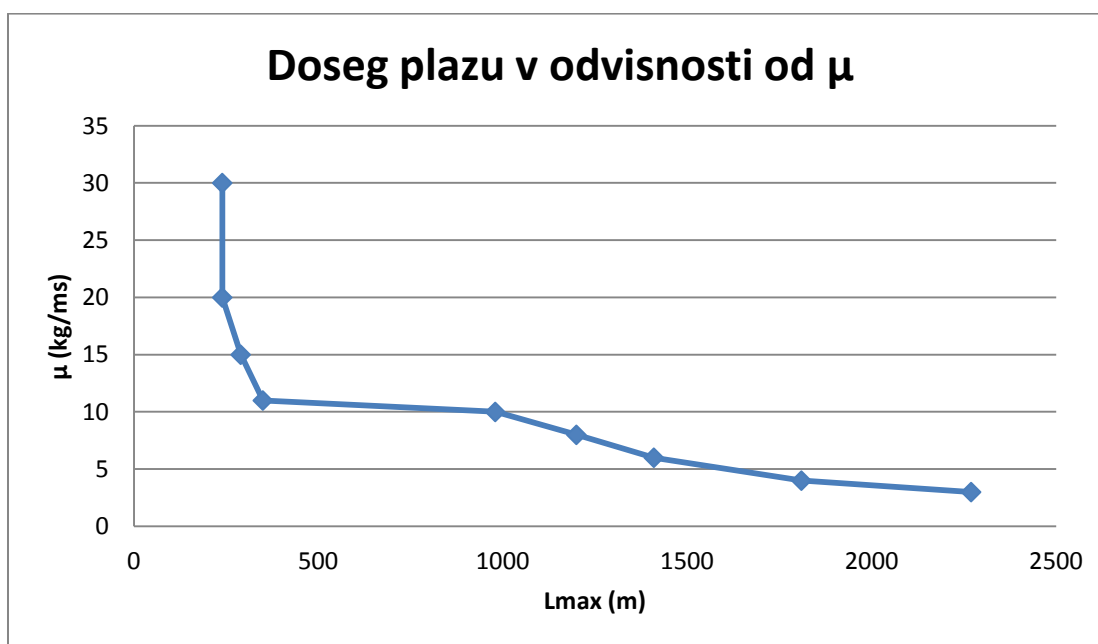
Predvsem grafikon 5 kaže, da za majhne vrednosti τ_y model ne daje zanesljivih rezultatov, saj se z manjšanjem τ_y po enačbi (8) manjšajo tudi energijske izgube in glede na logiko fizikalnega pojava bi se doseg moral povečevati. Je pa tu problem kompleksen, ker gre za hkratni vpliv obeh parametrov tako τ_y kot viskoznosti μ . V okviru diplomske naloge pa ni bilo možnosti pridobiti rezultate kakih meritev, na podlagi katerih bi bolj detajlno lahko verificirali in umerili model.

5.2 Viskoznost μ

V tej seriji sem spreminjal viskoznost mešanice μ in beležil rezultate. Ostali podatki so ostali enaki kot prej (osnovni primer).

Preglednica 2: Čas plazenja in doseg plazov v odvisnosti od μ .

μ (kg/ms)	t (s)	L_{max} (m)
3	175,3	2270
4	126,6	1810
6	95,7	1410
10	65,2	980
11	9,5	350
15	5,8	290
20	2,5	240
30	1,9	240

Grafikon 6: Čas plazenja v odvisnosti od μ .Grafikon 7: Doseg plazu v odvisnosti od μ .

Iz grafikona 7 je razvidno, da model daje logične rezultate, saj doseg plazu pada z večanjem viskoznosti, kar je v skladu z enačbo (8). Večja viskoznost pomeni večje energijske izgube in posledično krajši doseg plazu.

6 VPLIV TOPOGRAFIJE NA DOSEG PLAZU

6.1 Drobirski tok

Ker topografija terena igra pomembno vlogo pri napredovanju plazov, sem obravnaval tudi to poglavje. Predvsem na doseg plazov vplivajo razširitve, ki povzročajo razlivanje mase in skrajšanje dosega. Ta pojav lahko natančneje analiziramo s pomočjo dvodimenzijskih programov, kljub temu pa nam lahko že enodimenzijski programi pokažejo vpliv razširitev struge. Serijo sem naredil za standardni primer (poglavje 4), pri katerem sem od stacionaže $x = 600$ m naprej dodal različne razširitve struge.

Preglednica 3: Čas plazenja in doseg plazov v odvisnosti od topografije terena (razširitev).

Razširitev (m/10m kanala)	t (s)	Lmax (m)	Skrajšanje dosega (%)
0	84	1200	
10	41,5	750	37,5
20	36,6	690	42,5
30	36,7	690	42,5

Iz rezultatov je razvidno, da razširitve opazno skrajšajo doseg plazov v primerjavi z osnovnim primerom ($L_{max} = 1200$ m), kar je v skladu s pričakovanji. Enak rezultat v zadnjih dveh primerih lahko razlagamo s tem, da razširitve ki so večje od 20 m/100 m kanala nimajo več vpliva na sam doseg, saj se plaz ustavi prej kot v 100 metrih po začetku spreminjanja širine B in se širi brez omejitev na straneh.

V okviru topografskih sprememb sem naredil še primer, pri katerem je od stacionaže 1000 m naprej horizontalno dno kanala. Omenjen primer je razen loma dna struge identičen osnovnemu primeru. Izračun je tudi v primeru spremembe naklona dna kanala v primerjavi s standardnim primerom pokazal 15% skrajšanje dosega plazov, in sicer na 1020 m.

Preglednica 4: Čas plazenja in doseg plazov v odvisnosti od topografije terena (lom naklona dna).

Topografija struge	t (s)	Lmax (m)	Skrajšanje dosega (%)
Standardni primer	84	1200	
Lom naklona dna struge	41,5	750	15

6.2 Snežni plaz

Vpliv razširitve struge na dinamiko snežnih plazov je očitno iz primerjave izračunov za dva različna terena (primer AA in CC). Vhodni in topografski podatki so zaradi namena primerjave rezultatov vzeti iz poročila Dinamika snežnih plazov II. del (Rajar, 1980a). Podobni izračuni so namreč že bili narejeni leta 1980 v programu LAPLAZ.

V osnovi gre v obeh primerih za prizmatičen kanal širine 10 m s standardnim naklonom dna (glej Dinamika snežnih plazov II. del, priloga 14, Rajar 1980a). Seriji, ki sta bili narejeni leta 1980, sta

poimenovani A in C, kjer je v primeru A širina kanala konstantna, v primeru C pa se na stacionaži 600 m začne enakomerna razširitev velikosti 8 m na 15 m dolžine kanala. V obeh primerih je snežna masa razporejena na prvih 105 metrih kanala in ima konstantno višino H_0 .

Letos narejeni seriji izračunov sta poimenovani AA in CC. Izvršeni sta bili v posodobljenem modelu PLAWOEL15, ki je nadgradnja modela PLAZEM15. Izbrani primeri in pripadajoči vhodni podatki so zbrani v spodnjih dveh tabelah. Primeri, ki so dali najboljše primerljive rezultate, so odebeleni.

Pojasnila parametrov v preglednicah 5 in 6:

- F_s , koeficient kinetičnega trenja po Woellmyju iz en. (12),
- H_{spod} , privzeta globina snega v področju naprej od pregrade,
- F_{akdt} , faktor zmanjšanja časovnega koraka Δt , s katerim se lahko poveča stabilnost izračuna (Rajar, 1980a).

Preglednica 5: Rezultati s pripadajočimi parametri serije AA (L_{max}) in primerjava z rezultati serije A iz leta 1980 (L_{max80}).

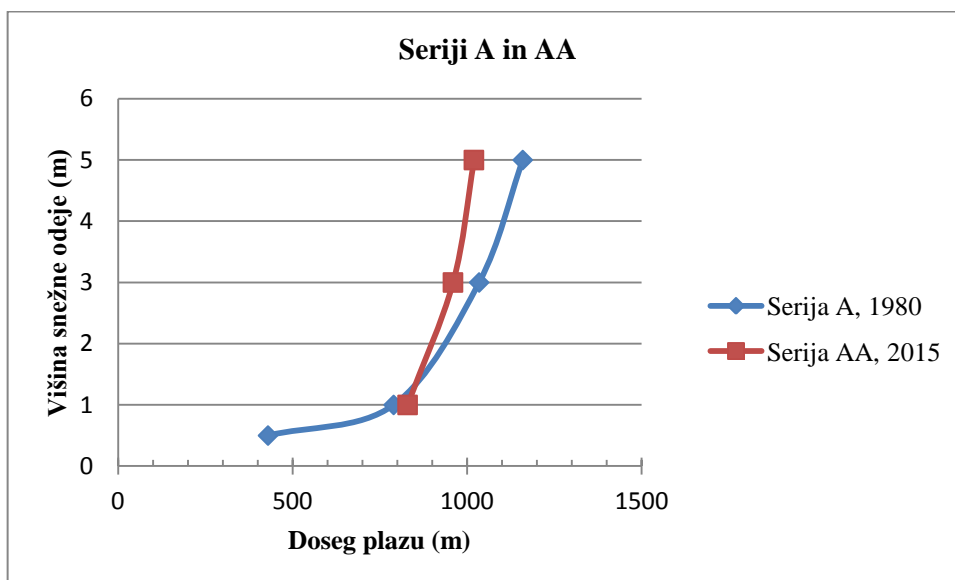
H_0 (m)		F_s	F_{akdt}	H_{spod}	L_{max} (m)	L_{max80} (m)
1	AA1	0,36	0,8	0,02	nestabilnost	830
1	AA1	0,36	1,0	0,02	790	830
1	AA1	0,36	0,8	0,05	nest,	830
3	AA3	0,36	0,8	0,1	1105	960
3	AA3	0,36	0,8	0,02	nest,	960
3	AA3	0,36	0,8	0,05	1035	960
5	AA5-37	0,37	0,8	0,1	nest,	1020
5	AA5-36	0,36	0,8	0,05	1160	1020

Preglednica 6: Rezultati s pripadajočimi parametri serije CC (L_{max}) in primerjava z rezultati serije C iz leta 1980 (L_{max80}).

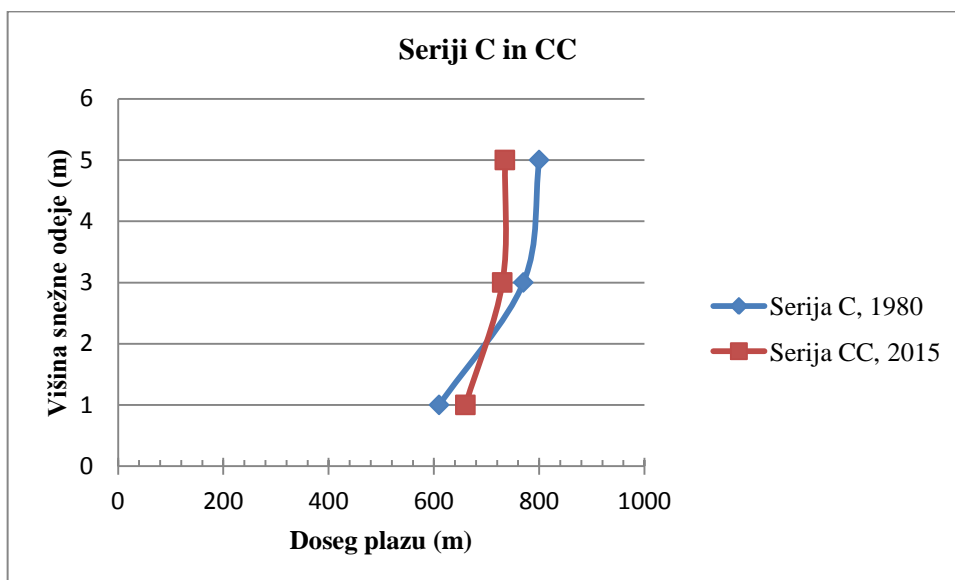
H_0 (m)		F_s	F_{akdt}	H_{spod}	L_{max} (m)	L_{max80} (m)
1	CC1	0,36	1,0	0,02	660	610
1	CC1	0,36	0,8	0,02	nest,	610
3	CC3-36a	0,36	0,9	0,02	700	770
3	CC3-36	0,36	0,8	0,05	730	770
3	CC3-37	0,36	0,7	0,02	nest,	770
3	CC3-36b	0,36	0,8	0,1	1090	770
5	CC5	0,36	0,8	0,02	710	800
5	CC5	0,36	0,8	0,05	695	800
5	CC5	0,36	0,8	0,2	735	800

Rezultati izračunov po tem modelu se v grobem ujemajo z rezultati modela LAPLAZ. Iz njih je tudi očitno, da razširitev tako kot pri drobirskem toku tudi v tem primeru skrajša doseg plazov.

Vendar se je pri uporabi modela PLAWOEL15 v serijah AA in CC pokazalo, da v določenih primerih nastopa nestabilnost, kar je delno prikazano v zgornjih tabelah. V bodočih raziskavah bo treba ta problem še detajlno raziskati. Za boljšo predstavo spodaj prilagam še grafično primerjavo rezultatov.



Grafikon 8: Primerjavo rezultatov iz leta 1980 in 2015 za prizmatično strugo s konstantno širino.



Grafikon 9: Primerjavo rezultatov iz leta 1980 in 2015 za prizmatično strugo z razširitvijo.

7 IZRAČUN UDARNE SILE

Za račun udarne sile oz. pritiska plazov na objekte sem za namen primerjave dobljenih rezultatov uporabil obe enačbi (glej poglavje 2.3). V praksi je v večini primerov uporabnejša enačba (17), ki je izpeljana iz zakona o ohranitvi gibalne količine, saj nas pri projektiranju objektov zanima obtežba, ki nastane zaradi trka čela plazu in je praviloma večja kot sila, ki jo dobimo z izračunom kasnejšega tlaka, ki ga povzroči tok za čelom plazu.

7.1 Drobirski tok

Izračun sem naredil za osnovni primer drobirskega toka (glej poglavje 4.1) za objekt na stacionaži $x = 1000$ m in 600 m. V prvem primeru ($x = 100$ m) čelo plazu do ovire potuje približno eno minuto in doseže hitrost $v = 10,5$ m/s, ter višino čela $h' = 5,4$ m. Upoštevana gostota materiala je 1600 kg/m³.

$$p = \rho gh' + \frac{\rho v^2}{2} = 173 \frac{kN}{m^2}$$

$$p = \rho v^2 = 176 \frac{kN}{m^2}$$

Iz primerjave rezultatov je razvidno, da je v tem primeru razlika majhna in znaša samo slaba 2%. V drugem primeru ($x = 600$ m) pa je razlika že nekoliko večja in sicer skoraj 10%. Opaziti je tudi, da so pričakovane obremenitve ob trku večje, saj je pot plazu za polovico krajša kot v prvem primeru. Zaradi tega je čelo plazu višje, $h' = 7,9$ m, in se hitreje širi, $v = 13,8$ m/s.

$$p = \rho gh' + \frac{\rho v^2}{2} = 276 \frac{kN}{m^2}$$

$$p = \rho v^2 = 305 \frac{kN}{m^2}$$

7.2 Snežni plaz

Zaradi nižje gostote in drugačne razporeditve mase pred začetkom plazenja gre v primerih snežnih plazov pričakovati nižje udarne tlake kot pri zemeljskih plazovih. Razporeditev snega je bila v računih namreč upoštevana tako, da je na prvih 105 m dolžine kanala snežna odeja konstantne debeline, ki ob začetku simulacije začne plazeti. Račun sem naredil za dva primera iz serije AA: AA1 in AA3 (za vhodne podatke glej poglavje 6.2), pri maksimalnih hitrostih na stacionaži 600 m in pripadajočih višinah snežne mase. Za primer AA1, višina snežne odeje zgoraj $H_0 = 1$ m, sem odčital ekstremno hitrost $v = 8,3$ m/s in višino $h' = 0,7$ m. V vseh izračunih sem upošteval gostoto snežne mase $\rho = 700$ kg/m³.

$$p = \rho gh' + \frac{\rho v^2}{2} = 28,9 \frac{kN}{m^2}$$

$$p = \rho v^2 = 48,2 \frac{kN}{m^2}$$

Rezultata se občutno razlikujeta, kar kaže na pomembnost izbire ustrezne metode izračuna pri projektiranju. V drugem primeru AA3, višina snežne odeje zgoraj $H_0 = 3$ m, plaz na isti stacionaži doseže največjo hitrost $v = 8,7$ m/s pri višini $h' = 0,8$ m.

$$p = \rho gh' + \frac{\rho v^2}{2} = 32,0 \frac{kN}{m^2}$$

$$p = \rho v^2 = 53,0 \frac{kN}{m^2}$$

Iz primerjave rezultatov za oba primera je razvidno, da so pri večji višini snežne odeje zgoraj H_0 tudi nekoliko večje udarne sile, kar je fizikalno smiselno.

Primerjava obremenitev pri zemeljskih in snežnih plazovih potrди prvotno pričakovanje, da bodo udarne sile pri snežnih plazovih manjše. Razlika med rezultati je zelo velika, kar je smiselno, če si pogledamo objekte, ki v praksi varujejo pred udarom plazov. Na zasneženih pobočjih so večinoma v uporabi zaščitne ograje in mreže, ki lahko prenesejo obtežbe danega reda velikosti. Medtem ko so za zaščito pred drobirskimi tokovi potrebni masivnejši objekti, kot so npr. betonski razbijači toka in pa armiranobetonske stene za usmerjanje plazu.

8 ZAKLJUČEK

Moje delo je zajemalo računsko analizo dinamike drobirskih tokov in snežnih plazov v različnih računalniških modelih. Kljub velikemu številu opravljenih simulacij jih je v tem diplomskem delu dokumentiranih le majhen del, kar kaže na kompleksnost pojava plazov za podrobno matematično modeliranje z zadovoljivo natančnostjo. Opravil sem občutljivostno analizo modela PLAZEM15 na spreminjanje reoloških parametrov τ_y in μ ter na spremembo topografije. Serija računov pri spreminjanju viskoznosti mase je dala dobre in fizikalno smiselne rezultate, prav tako ta, ki je zajemala vpliv spreminjanja topografskih podatkov. V primeru, ko sem variiral mejno strižno trdnost plazečega materiala, pa se je izkazalo, da pri manjših vrednostih τ_y prihaja do numerične nestabilnosti v računu. Te so se pokazale tudi v določenih primerih analize snežnih plazov v programu PLAWOEL15, katerega osnova je enaka osnovi zgoraj omenjenega modela.

Kljub dejstvu, da je bila predhodna verzija omenjenih programov uspešno umerjena in uporabljena za analizo v primeru plazu Stože v Logu pod Mangartom, lahko zaključim, da bo v prihodnje modela potrebno nadalje preučiti in izpopolniti. Pred dokončno praktično uporabo bi bila predvsem zelo pomembna primerjava z meritvami v naravi, ki v tej fazi niso bile na razpolago.

VIRI

Četina, M., Rajar, R., Hojnik, T., Zakrajšek, M., Krzyk, M., Mikoš, M. 2001. Case study: Numerical simulations of debris flow below Stože, Slovenia. *Journal of hydraulic engineering ASCE*: 132, 2, 121-130.

Četina, M., Rajar, R., Hojnik, T., Zakrajšek, M., Krzyk, M. 2001. Enodimenzijski in dvodimenzijski matematični model murastega toka od plazu Stože pod Mangartom do Loga pod Mangartom in ocena ogroženosti naselja Log pod Mangartom. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem: 41 f.

Fazarinc, R. 2002. Matematično modeliranje drobirskega toka v Logu pod Mangartom. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba R. Fazarinc): 189 f.

Kvaternik, K. 1980. Opis in primerjava metod za računanje hitrosti in dosega snežnih plazov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo (samozaložba K. Kvaternik): 50 f.

Rajar, R. 1979. Dinamika snežnih plazov. I. del. Poročilo o raziskavi. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 60 f.

Rajar, R. 1980a. Dinamika snežnih plazov. II. del. Poročilo o raziskavi. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 22 f.

Rajar, R. 1980b. Hidravlika nestalnega toka. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: str. 13-25, 61-64.

Steinman, F. 1999. Hidravlika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 136-138.