

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/>

V zbirki je izvirna različica izdajatelja.

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

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 a publisher's version PDF file.

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

Sodnik, J., Vrečko, A., Podobnikar, T., Mikoš, M. 2012. Digitalni modeli reliefa in matematično modeliranje drobirskih tokov = Digital terrain models and mathematical modelling of debris flows. V: *Geodezija pri upravljanju z vodami : 41. geodetski dan, Dolenjske Toplice 19. - 20. oktober 2012 : [zbornik prispevkov]*. Geodetski vestnik 56, 4: 826-837

DOI: <http://dx.doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2012.04.826-837>  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/4977/>

Datum arhiviranja / Archiving Date: 15-10-2014

# DIGITALNI MODELI RELIEFA IN MATEMATIČNO MODELIRANJE DROBIRSKIH TOKOV

DIGITAL TERRAIN MODELS AND MATHEMATICAL MODELLING OF  
DEBRIS FLOWS

Jošt Sodnik, Anja Vrečko, Tomaž Podobnikar, Matjaž Mikoš

UDK: 502:519.7.528:7/.8

## IZVLEČEK

Matematično modeliranje je pomemben del postopka ocenjevanja nevarnosti in priprave kart nevarnosti zaradi delovanja naravnih pojavov. V raziskavi modeliranja drobirskih tokov smo uporabili licenčni matematični model Flo2D. Kakovostni podatki o topografiji terena so ključnega pomena za natančnost izračunov in torej za zanesljivost in točnost kart nevarnosti. Računska mreža modela se ustvari na podlagi vhodnih topografskih podatkov. Cilj raziskave je bil ugotoviti uporabnost javno dostopnih topografskih podatkov za podrobno modeliranje drobirskih tokov in njihova primerjava s podatki, pridobljenimi z lidarsko tehnologijo. V Sloveniji so javno dostopni podatki DMV5 in DMV12,5, ki pa so žal vprašljivi glede morfološke natančnosti. Alternativa so DMR, izdelani iz podatkov aerolaserskega skeniranja, ki zaradi boljše prostorske ločljivosti omogočajo dodatne obdelave in izboljšave. Rezultati z uporabo lidarskih DMR so bolj natančni, struga na vršaju je prikazana bolj izrazito. Z natančnejšimi podatki so bolje prikazani lokalni pojavi na vršaju, ki so za izdelovanje kart nevarnosti zelo pomembni. Težava pri podatkih laserskega skeniranja je še vedno relativno visoka cena, ki pogosto otežuje uporabo bolj natančnih podatkov. Druga slabost so veliko daljši časi za izračun modela, saj kakovostnejši in bolj natančni podatki o terenu pomenijo več geometrijskih nepravilnosti oziroma višinske razgibanosti mreže na vršaju, kar pa se odraža v krajših računskih korakih modela, ki zagotavljajo stabilnost računa. Z metodami, prikazanimi v prispevku, je mogoče lidarske podatke obdelati na način, ki prinese bistveno krajše računske čase in izboljšano kakovost rezultatov modela.

## KLJUČNE BESEDE

digitalni model reliefa, lidar, drobirski tok, matematično modeliranje, ocenjevanje nevarnosti zaradi naravnih nesreč;

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.08

## ABSTRACT

Mathematical modelling is a common approach when assessing debris-flow hazards. In this study on the mathematical modelling of debris flows, we applied the widely used Flo2D model. The high accuracy of the input parameters is essential for obtaining acceptable results. The numerical grid in the area of the debris-flow movement is generated from topographic data. The aim of our research was to assess the usefulness of public data for debris flow-modelling and to compare this data to the LiDAR-derived data. In Slovenia, DEM5 and DEM12.5 are publicly available data. However, the morphological accuracy of these datasets is questionable because of their development methods and their low morphologic resolution. A better solution is LiDAR-derived data with higher resolutions and a multiple options for further improvements with different methods and algorithms. The results with LiDAR data are more accurate; the torrential channel is better expressed. One downside of LiDAR data is its high price, which prevents wider usage of more precise data. Another downside is the much longer computational times of the model. More precise data means a more agitated surface of the computational grid, which results in shorter computational steps to ensure numerical stability. Methods for LiDAR-derived DEMs improvements are proposed in this study. With modified data, computational times are much shorter and results are even more precise than with non-modified DEMs.

## KEY WORDS

digital elevation model, LiDAR, debris flow, mathematical modelling, natural hazard assessment

## 1 UVOD

Naravne nesreče, ki povzročajo gmotno škodo in smrtne žrtve, so vse pogostejše in so spodbudile razvoj in napredek pri ocenjevanju nevarnosti zaradi njihovega delovanja. Drobirski tokovi veljajo za naravni pojav, ki povzroči veliko gmotne škode in je v nasprotju s poplavami neperiodičen. Drobirski tokovi so mešanica materiala in vode ali zraka. V Sloveniji so postali aktualna tema po katastrofalnem dogodku leta 2000 v Logu pod Mangartom, ko je drobirski tok terjal sedem smrtnih žrtev in povzročil veliko gmotno škodo (Mikoš et al., 2006). Kartiranje nevarnih območij zaradi naravnih pojavov v Sloveniji predpisuje Zakon o vodah (2002), v katerem so opredeljene karte nevarnosti zaradi plazenja tal (plazljiva območja) in karte nevarnosti zaradi delovanja poplav (poplavna območja). Za izdelavo kart poplavne nevarnosti je bila v letih 2007 in 2008 sprejeta področna zakonodaja (Pravilnik, Ur. l. RS, št. 60/2007, in Uredba, Ur. l. RS, št. 89/2008), ki natančno predpiše način, metodologijo in interpretacijo izdelave kart poplavne nevarnosti, pri čemer sta glavna parametra za določitev razreda nevarnosti maksimalne globine in maksimalne hitrosti toka. Težava pri drobirskih tokovih je fizikalna kompleksnost pojava in njegova uvrstitve glede na postavljene razdelitve v Zakonu o vodah. Drobirski tokovi se delijo na hudourniške, ki jih načeloma lahko uvrstimo med ekstremne erozijske pojave na področju poplav, medtem ko pobočni drobirski tokovi, ki nastanejo zunaj hudourniške struge, spadajo na področje plazenja tal. Če pobočni drobirski tok konča v strugi in tam nadaljuje svojo pot, govorimo o pobočno-hudourniških drobirskih tokovih. Ta kompleksnost pojava kaže, da je potrebna ločena zakonodaja za predpis metodologije pri določanju nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov, saj sedanja poplavna zakonodaja tega področja ne pokriva. To dejstvo kaže, da je na tem področju treba razviti metodologijo za ocenjevanje nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov. Pri ocenjevanju nevarnosti in pripravi strokovnih podlag za prostorsko planiranje je zelo pomembno matematično modeliranje, pri katerem simuliramo potencialni dogodek in njegov vpliv na potencialno ogroženo območje. Pri uporabi matematičnih modelov imajo zelo pomembno vlogo vhodni podatki, od katerih so močno odvisni rezultati. Od natančnosti rezultatov je končno odvisna kakovost in natančnost strokovnih podlag oziroma ocene nevarnosti.

V raziskavi je bil uporabljen licenčni model Flo2D, pri katerem so pretekle analize pokazale, da imata najbolj pomembno vlogo pri določanju vhodnih podatkov geometrija oziroma podatki o topografiji hudourniškega vršaja in magnituda drobirskega toka, ki predstavlja celotno količino sproženega materiala skupaj z vodo v enem dogodku (scenarij dogodka) (Sodnik in Mikoš, 2010). Določanje magnitude drobirskega toka je zelo zahtevna naloga, saj v nasprotju s poplavami poleg padavin na količino materiala vpliva več dejavnikov, kot so geološka sestava povodja, naklon, ukrivljenost površja, plazljivost terena, padec struge vodotoka (Sodnik in Mikoš, 2006). V raziskavi sta prikazana vpliv različnih tipov topografskih podatkov na rezultate modela in metoda za njihovo izboljšavo. Prikazana je primerjava med javno dostopnimi podatki in lidarskimi podatki ter njihova uporabnost za matematično modeliranje gibanja drobirskih tokov.

## 2 OBMOČJE RAZISKAVE IN MODEL FLO2D

### 2.1 Hudourniški vršaj Bele

Koroška Bela je naselje na vršaju hudournika Bela v SZ Sloveniji, v občini Jesenice. Vršaj ima površino 1,02 km<sup>2</sup> in je gosto poseljen z 2200 prebivalci. Na dnu vršaja potekata regionalna cesta Moste–Jesenice in mednarodna železniška proga Ljubljana–Jesenice–Beljak. Leta 1789 je velik drobirski tok na tem vršaju uničil 40 hiš in več mlinov (Jež et al., 2008). Veliko nevarnost pomeni tudi aktivni zemeljski plaz v zaledju, ki se lahko v neugodnih razmerah spremeni v drobirski tok. Vzpostavljen je bil tudi terenski sistem monitoringa, s katerim je bilo potrjeno aktivno plazenje (Komac et al., 2012). Visok škodni potencial in povečana verjetnost za nastanek drobirskega toka kažeta na nujnost izdelave ustrezne ocene nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov.



Slika 1: Vršaj Bele z naseljem Koroška Bela

## 2.2 Model Flo2D

Flo2D je kvazi dvodimenzijski model, namenjen modeliranju gibanja vode in masnih tokov, med katere spadajo tudi drobirski tokovi. V osnovi je to model, ki konzervira (ohranja) prostornino, ko se voda ali masni tok premikata po računski mreži kvadratnih celic, ki jo določi uporabnik in z njo zajame geometrijo terena, struge, objektov in drugih geometrijskih parametrov terena. Račun gibanja tekočine poteka v dveh dimenzijah z integracijo osnovnih enačb in ohranjanjem prostornine tekočine (O'Brien, 2006). Osnovni enačbi modela sta kontinuitetna in dinamična enačba.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V_x}{\partial x} = i$$

$$S_{fx} = S_{0x} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t},$$

kjer je  $h$  globina toka,  $V_x$  je po globini povprečna hitrost toka v smeri  $x$ ,  $S_{fx}$  je naklon energijske črte,  $S_{0x}$  pa je padec struge oziroma terena. V enačbi so upoštevani tudi gradient tlaka in lokalni pospeški toka.

Dinamična enačba je vrednotena tako, da je povprečna hitrost toka v računski celici izračunana posebej za vsako izmed osmih kardinalnih smeri, ki se nanašajo na strani neba S, J, V, Z, SV, SZ, JV in JZ. Hitrost je v vsaki smeri izračunana kot enodimenzionalna in neodvisna od drugih hitrosti. Za reševanje enačb program uporablja eksplicitno shemo končnih razlik (O'Brien, 2006). Numerična stabilnost te sheme je zagotovljena z merilom kontrole dolžine posameznega časovnega koraka. Če izračun postane nestabilen in so kontrolne vrednosti izgub volumna modelirane tekočine oziroma toka presežene, se časovni korak iteracije izračuna skrajša in račun ponovi.

Za opis geometrije računskega območja se v modelu uporablja mreža poljubno velikih kvadratnih računskih celic, pri čemer ima vsaka celica svojo nadmorsko višino. Gibanje drobirskih tokov je odvisno od reoloških lastnosti mešanice, geometrije terena oziroma vršaja, naklona oziroma padca terena in hrapavosti površine obravnavanega terena.

Mešanica je sestavljena iz vode in drobirja različnih frakcij. Količina oziroma koncentracija materiala določa specifično težo mešanice  $\gamma_m$ , strižno odpornost  $\tau$  in viskoznost mešanice  $\eta$ . Koncentracija materiala v mešanici je izražena z volumsko koncentracijo  $C_v$ , ki je izražena kot razmerje med prostornino drobirja in prostornino mešanice. Koncentracija  $C_v$  je pomembna, saj s tem podatkom na podlagi podatka o količini vode določamo tudi skupno magnitudo drobirskega toka.

## 2.2 Uporabljeni računski primeri

Cilj raziskave je bila primerjava rezultatov modela z uporabo različnih prostorskih podatkov, zato je bil v vseh primerih uporabljen enak scenarij dogodka in so bili vsi preostali parametri modela enaki. V raziskavi so bili uporabljeni naslednji vhodni parametri: hidrogram: trajanje 15min, maksimalni pretok  $Q_{max} = 250\text{m}^3/\text{s} + \text{drobir} = 431\text{m}^3/\text{s}$ ; magnituda:  $155.000\text{ m}^3$ ; volumska koncentracija mešanice:  $C_v = 0,42$ ; reološki parametri: strižna odpornost: 20 Pa; Binghamova viskoznost: 10 Pas; Manningovi koeficienti: gozd  $0,16\text{ sm}^{-1/3}$ ; hiše  $0,20\text{ sm}^{-1/3}$ , travnik  $0,033\text{ sm}^{-1/3}$ , struga  $0,13\text{ sm}^{-1/3}$ .

## 3 TOPOGRAFSKI PODATKI

### 3.1 Pomen topografskih podatkov pri matematičnem modeliranju

Z razvojem orodij za matematično modeliranje naravnih procesov sta se izboljšali njihova uporabnost in natančnost rezultatov. Boljša orodja so pripeljala do potrebe po bolj natančnih topografskih podatkih. Klasična terestrična izmera (s tahimerom), GNSS-izmera in geodetski

posnetki so bili dolgo edini viri podatkov o reliefu za uporabo v matematičnih orodjih. Vedno večja območja obravnave so pomenila zelo zamudno in drago terestrično snemanje terena, poleg tega je bilo za kakovosten in predvsem v fazi modeliranja uporaben posnetek terena treba posneti višine na veliko točkah.

Velik napredek v tej smeri bi lahko bili digitalni modeli reliefa (DMR) različne kakovosti, dostopni na Geodetski upravi Republike Slovenije (GURS), ki pa so se žal večinoma izkazali kot neuporabni za potrebe matematičnega modeliranja (Sodnik et al., 2009). Prav nezadostna kakovost teh podatkov je pripeljala do vse širše uporabe DMR, pridobljenih z lidarsko tehnologijo (laserskim skeniranjem). Največje prednosti lidarskih podatkov so visoka gostota zajetih točk in talne točke, zajete tudi pod vegetacijo. Težava pri lidarski tehnologiji je še vedno visoka cena produktov za končnega uporabnika. Pri ocenjevanju nevarnosti zaradi delovanja poplav in s poplavami povezanih naravnih pojavov, med katere spadajo tudi drobirski tokovi, je težava topografskih podatkov specifična, saj je zelo pomemben segment podatkov DMR struge vodotoka. Tudi z lidarsko tehnologijo je težko dovolj kakovostno zajeti obliko struge vodotoka. Bližnja okolica strug in brežine strug so namreč pogosto poraščene z vegetacijo ali pozidane z objekti. V obeh primerih se najprej srečamo s težavo, kako iz oblaka točk izločiti vse točke, ki niso posledica odbojev laserskega žarka od tal (reliefa), in kako modelirati relief na območjih, kjer zaradi tega nimamo talnih odbojev. Dodatna težava je lahko modeliranje dna struge, saj svetloba z valovno dolžino v infrardečem spektru, ki se najpogosteje uporablja v laserskih skenerjih, slabo prodira skozi vodo, in tako ne dobimo odbojev z dna struge. V našem primeru to ni bilo težava, saj je bila hudourniška struga med snemanjem suha. Zaradi navedenih omejitev lidarske tehnologije je predvsem pri manjših vodotokih še vedno pogosto bolj racionalno strugo posneti na klasičen način. Kakovostni topografski podatki so eden izmed najpomembnejših parametrov pri matematičnem modeliranju in močno vplivajo na rezultate. Tudi pretekle analize občutljivosti modela Flo2D so pokazale, da sta najpomembnejša vhodna parametra, ki imata tudi največji vpliv na rezultate, magnituda drobirskega toka in topografski podatki oziroma geometrija obravnavanega terena. DMR je temelj, na podlagi katerega model Flo2D ustvari računsko mrežo s poljubno velikostjo računskih celic. Pri ustvarjanju mreže na podlagi digitalnega modela reliefa se uporablja metoda interpolacije višin računskih celic po vnaprej določenih algoritmičnih inverzne razdalje. Za modeliranje drobirskih tokov na vršaju je bolj kot sama položajna natančnost DMR pomembna geomorfološka kakovost. Ključno je, da model dovolj dobro (v skladu z zahtevano natančnostjo rezultatov analiz) predstavi obliko geomorfoloških pojavov na vršaju, ki vplivajo na gibanje toka v fazi razlivanja po vršaju, predvsem obliko hudourniške struge. Zaradi boljšega prikaza kakovosti posameznega niza podatkov hudourniška struga na vršaju ni bila dodatno posneta in vključena v model, ampak so bili uporabljeni osnovni nizi podatkov.

### 3.2 Topografski podatki v raziskavi

V Sloveniji GURS upravlja dva javno dostopna digitalna modela reliefa z različnimi prostorskimi ločljivostmi in natančnostmi: i) digitalni model reliefa s prostorsko ločljivostjo 5 metrov (DMV5)<sup>1</sup>

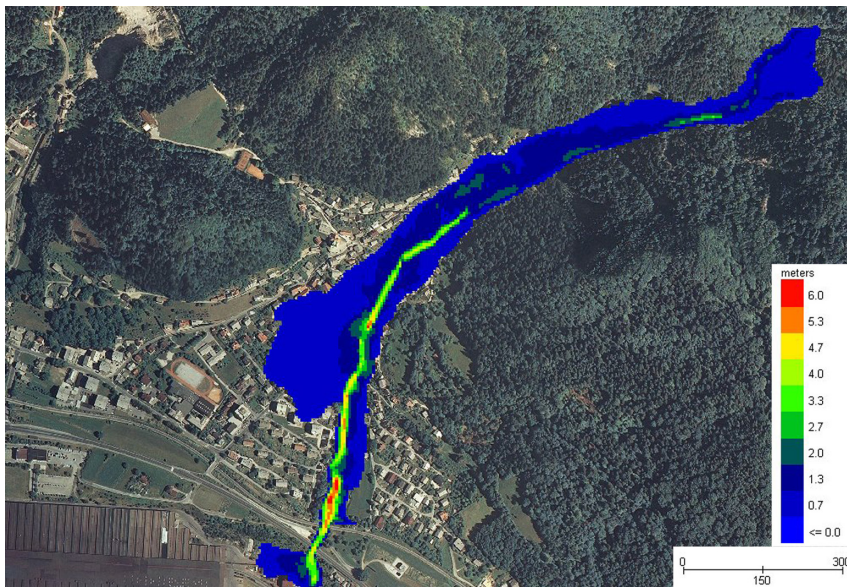
<sup>1</sup> Uradni naziv GURS za uporabljene zbirke podatkov je »Digitalni model višin - DMV 5« in »Digitalni model višin - DMV 12,5« (Centralna evidenca prostorskih podatkov, 2012). Ker je to digitalni model reliefa, v članku uporabljamo le ta termin.

in ii) digitalni model reliefa Slovenije, iz katerega so bili izvedeni digitalni modeli reliefa (s podatkovno strukturo celične mreže) s prostorskimi ločljivostmi 100 metrov, 25 metrov in 12,5 metra (DMV12,5). Oba niza podatkov sta bila izdelana na podlagi različnih podatkov, z različnimi metodami in postopki, kar se odraža tudi v njihovi različni kakovosti (Centralna evidenca prostorskih podatkov, 2012, Podobnikar, 2008). Podatki s prostorsko ločljivostjo 100 in 25 metrov so neprimerni za prevzorčenje na prostorsko ločljivost 10 metrov in manj (ciljna velikost računske celice v Flo2D), zaradi česar so neuporabni za modeliranje drobirskih tokov. V nasprotju z DMR 100 in 25 metrov sta niza podatkov s prostorsko ločljivostjo 12,5 metra in 5 metrov uporabna za modele z manjšimi računskimi celicami, lahko pa je vprašljiva njuna geomorfološka kakovost. Ta je pri DMV12,5 dobro dokumentirana, kar omogoča oceno kakovosti rezultatov analize in sploh odločitev, ali so podatki primerni za uporabo v naš namen. Poleg tega je v izbranem primeru uporabljena magnituda potencialnega drobirskega toka tako velika oziroma so maksimalni pretoki ( $431 \text{ m}^3/\text{s}$ ) toliko večji od prevodnosti same struge, da je ta za končne rezultate manj pomembna.

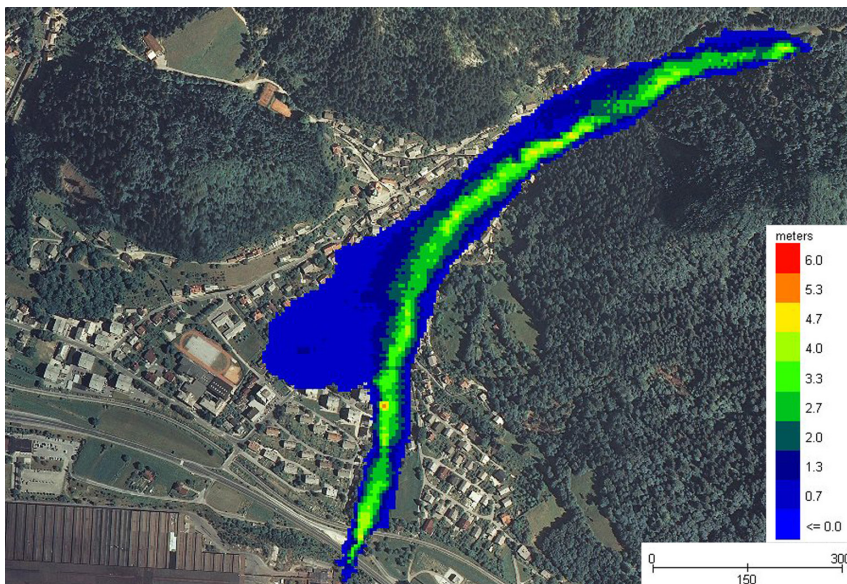
V raziskavi je bila opravljena primerjava uporabe različnih nizov podatkov pri matematičnem modeliranju gibanja drobirskih tokov na hudourniškem vršaju z modelom Flo2D. Uporabljeni so bili DMV12,5, DMV5 in trije DMR, izdelani na podlagi podatkov, pridobljenih z lidarsko tehnologijo. Prvi DMR s prostorsko ločljivostjo 0,5 metra (DMR0,5) je bil iz oblaka točk interpoliran z linearno interpolacijo znotraj trikotnikov v nepravilni trikotniški mreži (TIN). Drugi DMR s prostorsko ločljivostjo 5 metrov (DMR0,5\_5) je bil izdelan s prevzorčenjem DMR0,5, pri čemer je bila uporabljena bilinearna interpolacija. Pri izdelavi tretjega DMR s prostorsko ločljivostjo 0,5 metra (obdelan DMR0,5) smo se osredotočili na modeliranje območja hudourniške struge. Na oblaku točk (ki je bil uporabljen tudi za DMR0,5) smo ponovili postopek filtriranja, za katerega smo uporabili kombinacijo filtrov MCC (Multiscale curvature classification) (Evans in Hudak, 2007), HRI (Hierarchical robust interpolation) (Kraus in Pfeifer, 1998) in Lasground (Isenburger, 2011), predlagano v Podobnikar in Vrečko (2012). Rezultati so bili boljši predvsem na območju brežin hudourniške struge, kjer je bil uporabljen algoritem MCC. Lomne linije reliefa so bile bolj izrazite in bolj gladke, kar je predvsem posledica manj agresivnega filtriranja (filtriranje tukaj pomeni odstranjevanje netalnih točk iz oblaka točk). Zaradi tega je na drugih območjih v filtriranem oblaku točk ostalo nekaj netalnih točk pod ravno terena, ki so se odrazile kot ozke jame, globoke do enega metra. Sledili so ročni popravki filtriranja na območju struge, odstranjevanje točk, posnetih na mostovih, in odstranjevanje grobih napak (netalnih točk) po celotnem območju. Za nekatere točke (predvsem na območjih z redkimi talnimi odboji) zgolj iz oblaka točk ni bilo mogoče določiti, ali so talne ali ne. Pri interpretaciji smo uporabili tudi ortofoto, kljub temu so mogoče v oblaku točk ostale točke, ki so delno ali v celoti posledica odboja laserskega žarka od netalnih površin. Ocenjujemo, da vpliv takih točk na vrednosti višin v DMR ni presegel 0,5 metra. Zvezno in gladko ploskev smo iz tako obdelanega oblaka točk interpolirali z metodo naravnega sosedu. Za optimalen končni model terena smo rezultat interpolacije na območju hudourniške struge primerjali z DMR0,5 in v končni model (obdelani DMR0,5) zapisali nižjo izmed obeh višin v vsaki celici, s čimer smo še zmanjšali vpliv morebitnih preostalih netalnih točk v oblaku točk.

#### 4 REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELIRANJA Z RAZPRAVO

Pri rezultatih matematičnega modela z uporabo različnih DMR je bila izvedena primerjava izračunanih maksimalnih globin in hitrosti. Prav maksimalne globine in hitrosti gibanja toka so najpomembnejše pri ocenjevanju nevarnosti na obravnavanem območju in so podlaga za določitev razredov nevarnosti. V nadaljevanju so podane slike maksimalnih globin drobirskega toka na obravnavanem vršaju.

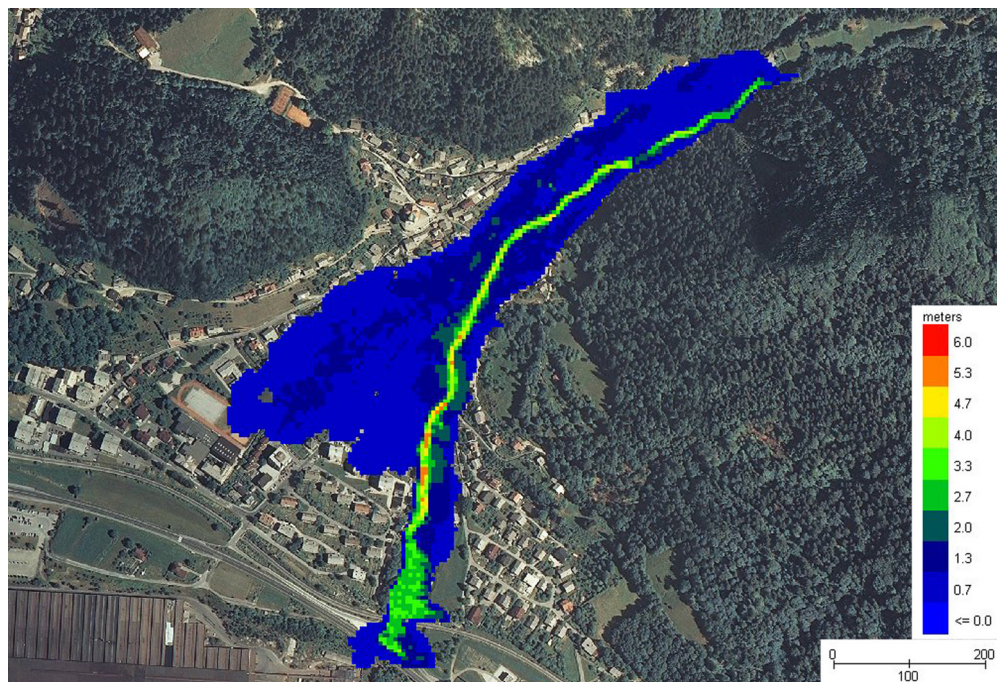


Slika 2: Maksimalne globine z uporabo DMV5

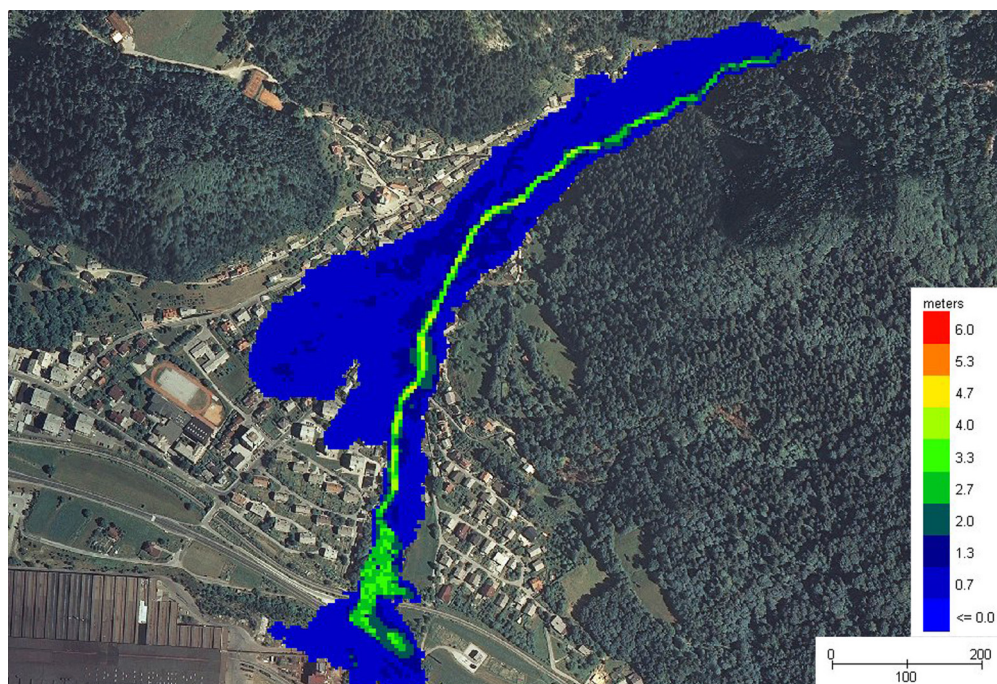


Slika 3: Maksimalne globine z uporabo DMV12,5

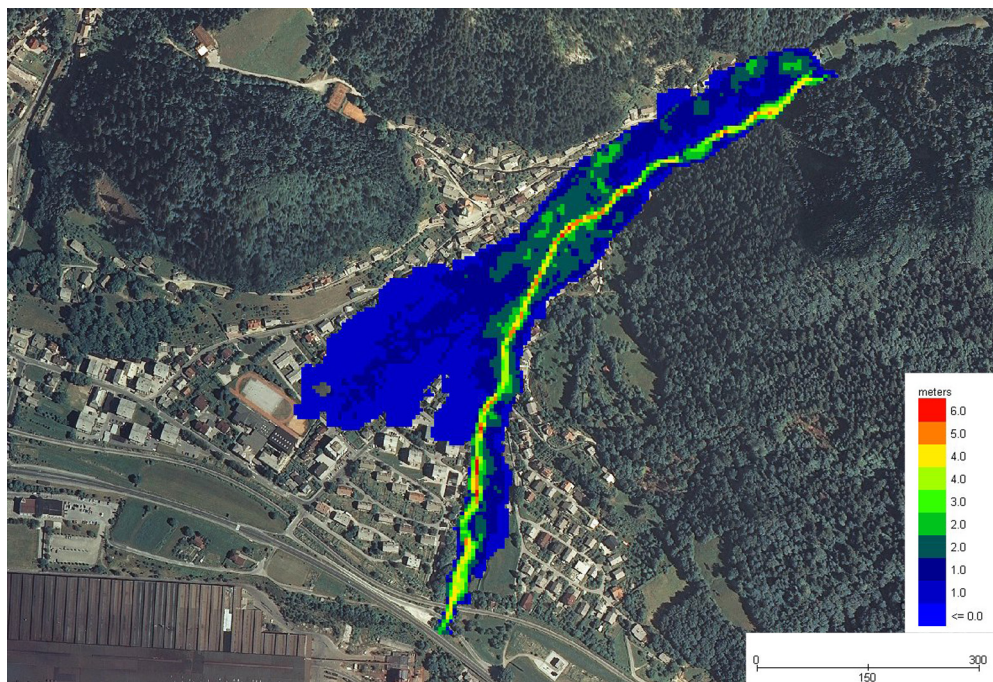




Slika 4: Maksimalne globine z uporabo DMR0,5 (interpoliran iz lidarskih podatkov)



Slika 5: Maksimalne globine z uporabo DMR0,5\_5 (interpoliran iz lidarskih podatkov)



Slika 6: Maksimalne globine z uporabo obdelanega DMR0,5 (interpoliran iz lidarskih podatkov)

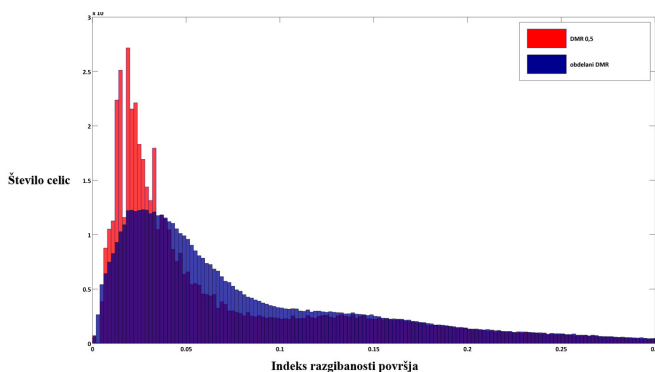
Slika 3 rezultatov modeliranja prikazuje pomanjkanje morfološke kakovosti podatkov DMV5, saj je struga na zgornjem delu zelo neizrazita, kar so odraža v obširnem razlivanju toka na tem delu. Taki rezultati privedejo do precenjevanja nevarnosti v tem delu vršaja. Tudi v spodnjem delu vršaja so globine toka v strugi manjše kot pri drugih modelih. Slika 4 modela s podatki DMV12,5 pa kaže po eni strani morfološko bolj pravilno sliko z izrazitejšim prikazom struge, ki pa je zaradi manjše prostorske ločljivosti vhodnih podatkov preširoka. V naravi je struga široka od 4 do 6 metrov, zato je pri podatkih s prostorsko ločljivostjo 12,5 metra pričakovati slabši prikaz hudourniške struge na vršaju. Preširoka struga v modelu se odraža v manjši natančnosti rezultatov na drugih delih vršaja in v manjši površini poplavljanja drobirskega toka (prevelik delež toka se kanalizira v strugi). S tem modelom dobimo v strugi pretirane količine toka, na preostalem delu vršaja pa posledično podcenjeno nevarnost (premajhne globine toka) zaradi delovanja drobirskih tokov. Sliki 5 in 6 modelov z uporabo DMR, razvitih na podlagi lidarskih podatkov, kažeta na prednosti uporabe natančnejših in pravilnejših podatkov. Struga je izražena bolje kot pri DMV5 in ni precenjena kot pri DMV12,5. Globine toka na razlivenem območju so pri uporabi lidarskih podatkov bolj raznolike, kar kaže na večjo natančnost podatkov na območju vršaja. S tem so bolje prikazane lokalne razmere in posledično bolj natančno ocenjena nevarnost na območju vršaja. Primerjava med slikama 5 in 6 kaže na razlike med metodama interpolacije višin mreže 5 x 5 m. V prvem primeru z DMR0,5 je bila uporabljena metoda interpolacije vgrajena v model Flo2D, v drugem pa je bil DMR0,5 z uporabo metode bilinearne interpolacije prevzorčen v DMR0,5\_5 s prostorsko ločljivostjo 5 metrov. Največja razlika med modeloma se vidi na razlivenem območju vršaja, kjer je pri neposredni uporabi DMR0,5 opaziti

večjo natančnost pri izpisu maksimalnih globin toka, kar je pogoj za večjo natančnost pri pripravi ocene nevarnosti. Na sliki 7 pa so prikazani rezultati modela z obdelanimi podatki DMR0,5. V primerjavi z modelom z neobdelanimi podatki DMR0,5 se največja razlika vidi na območju struge, na katerem so opazni rezultati ročnih popravkov, opisanih v prejšnjem poglavju. Struga je bolj izrazita kot pri modelu z neobdelanimi podatki, tudi prikaz območij razlivanja je bolj natančen, globine so lokalno bolje prikazane.

Uporabljeni DMR	DMV5	DMV12,5	DMR0,5	DMR0,5_5	obdelan DMR0,5
Poplavljen površina [m <sup>2</sup> ]	145.325	118.675	131.200	131.325	113.750
Povprečna maks. globina [m]	0,785	1,180	0,801	0,638	1,025
Povprečna maks. hitrost [m/s]	2,435	2,420	1,881	2,479	2,500
Čas računanja [h]	1,3	0,9	13,2	13,0	2,5

Preglednica 1: Rezultati matematičnega modeliranja drobirskih tokov

V preglednici 1 so tabelarično prikazani rezultati vseh modelov. Primerjava velikosti poplavnih površin kaže na bistvene razlike med modeli, pri katerih je struga slabše izražena, in modeli, pri katerih je struga bolje izražena. Pri uporabi javnega DMV5, kjer je struga najslabše izražena, je površina razlivanja največja. Pri uporabi neobdelanih lidarskih podatkov je površina pričakovano zelo podobna pri obeh modelih. Pri DMV12,5 in obdelanem DMR0,5 pa je površina zaradi večjega vpliva struge manjša od preostalih. Velikost poplavnega območja zaradi enakega volumna toka pri vseh modelih določa tudi povprečne maksimalne globine na vršaju. Primerjava hitrosti in globin pri modelih z neobdelanimi lidarskimi podatki kaže, da je pri modelu z DMR0,5\_5 računski površina zaradi metode interpolacije bolj gladka, globine so manjše in hitrosti višje. Velike razlike med modeli pa so opazne pri računskih časih, ki so od 0,9 pa do 13,2 ure za 15-minutni dogodek, kar pomeni računsko razmerje od 1/3,5 do 1/52. Krajši računski časi pri uporabi manj natančnih podatkih so pričakovani zaradi manj natančne računske mreže, ki dovoljuje daljši časovni korak (angl. time step) modela. Najdaljši časovni korak pri uporabi DMR iz neobdelanih lidarskih podatkov je zaradi večje natančnosti prav tako pričakovan. Presenetljivo krajši čas računa pri obdelanih lidarskih podatkih pa kaže na velik vpliv odprave grobih napak in odstranjevanja netalnih točk, ki na modelni površini računske mreže pomenijo višinske ovire. Tudi slika 7 prikazuje, da so obdelani podatki sicer bolj razgibani, a so spremembe bolj zvezne.



Slika 7: Primerjava histogramov indeksa razgibanosti površja (Riley et al., 1999) med DMR 0,5 (rdeč histogram) in obdelanim DMR (moder histogram).

Večjo razgibanost potrjujejo globine na poplavljenih območjih na sliki 6, bolj zvezno spreminjanje pa se odraža v bistveno krajših časih računanja. Povprečni časovni korak računa pri obdelanih lidarskih podatkih je 0,004 sekunde, pri neobdelanih pa pade pod 0,001 sekunde. Daljši časovni korak pomeni, da je bilo potrebnega manj skrajševanja zaradi nestabilnosti računa in izgub volumna, ki v našem primeru nastaneta zaradi lokalnih nepravilnosti v računski mreži.

## 5 SKLEP

V prispevku je prikazana uporaba matematičnega modeliranja drobirskih tokov za pripravo kart nevarnosti in uporaba različnih topografskih podatkov za osnovno geometrijo modela. Prikazana je primerjava med javno dostopnimi podatki DMV5 in DMV12,5 in podatki, pridobljenimi z lidarsko tehnologijo. Prikazana je tudi ena od možnosti za izboljšavo lidarskih podatkov, ki pripomore h krajšanju računskih časov modela in večji natančnosti rezultatov, bistveni za pripravo kart nevarnosti. Rezultati primerjave so pokazali, da so javno dostopni podatki na GURS neuporabni za podrobno modeliranje zaradi slabe morfološke kakovosti in slabše natančnosti (preslabe prostorske ločljivosti podatkov). Lidarski podatki zaradi natančnosti omogočajo bolj natančne izračune in rezultate, imajo pa tudi slabosti. Ena izmed njih so grobe napake in bistveno daljši računski časi modela. V prispevku je prikazana metoda za izboljšavo lidarskih podatkov, s katero so podatki morfološko bolj kakovostni oz. pravilni, hkrati pa so računski časi modela bistveno krajši, saj se računski čas za 15-minutni dogodek skrajša s 30 ur na 2,5 ure. Te izboljšave kažejo na velik potencial lidarskih podatkov in potrjujejo njihovo široko uporabnost. Poleg uporabe kakovostnih in natančnih podatkov je nujen razvoj metodologije za določanje magnitude drobirskih tokov ter predpis metodologije za ocenjevanje nevarnosti in pripravo kart nevarnosti. Karte nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov bi morale, podobno kot karte poplavne nevarnosti, biti del strokovnih podlag v procesu prostorskega načrtovanja.

## 6 ZAHVALA

Del opravljene raziskave je bil izveden v okviru raziskovalnega projekta PARAMount, ki sta ga financirala Evropski regionalni razvojni sklad (ERDF) in Javna agencija Republike Slovenije za raziskovalno dejavnost (program P2-0180 Hidrotehnika, hidravlika in geotehnika, projekt L4-2244). Tudi delo druge avtorice kot mlade raziskovalke na UL FGG pri tej raziskavi je sofinancirala Javna agencija Republike Slovenije za raziskovalno dejavnost po pogodbi št. 1000-10-310269.

## Literatura in viri:

- Evans, J. S., Hudak, A.T. (2007). *A multiscale curvature algorithm for classifying discrete return LiDAR in forested environments*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(4), 1029–1038.
- Izenburg, M. (2011). *LAStools: converting, filtering, viewing, gridding and compressing LIDAR data*. <http://www.cs.unc.edu/~izenburg/lastools/> (pridobljeno 15. 10. 2011).
- Centralna evidenca prostorskih podatkov. 2012. <http://prostor.gov.si/cepp/> (pridobljeno 20. 7. 2012).
- Jež, J., Mikoš, M., Trajanova, M., Kumelj, Š., Budkovič, T., Bavec, M. (2008) *Vršaj Koroška Bela – Rezultat katastrofičnih pobočnih dogodkov = Koroška Bela alluvial fan – The result of the catastrophic slope events (Karavanke Mountains, NW Slovenia)*. *Geologija*, 51(2), 219–227.

- Komac, M., Milanič, B., Holley, R., Mahapatra, P., Hanssen, R., van der Marel, H., Fromberg, A. (2012). I2GPS – a new approach to 3D surface displacement monitoring. *Conference Proceedings of the 10th Anniversary of ICL, Kyoto*.
- Kraus, K., Pfeifer, N. (1998). Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry Remote Sensing*, 53(4), 193–203.
- Mikoš, M., Fazarinc, R., Majes, B., Rajar, R., Žagar, D., Krzyk, M., Hojnik, T., Četina, M. (2006) Numerical simulation of debris flows triggered from the Strug rock fall source area, W Slovenia, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, 261–270.
- O'Brien, J. (2006). *Users Manual FLO-2D, Version 2007.06, June 2007*. Nutrioso, Arizona, ZDA. Internet: [http://www.flo-2d.com/v2007/Documentation/Users Manual\\_2007.pdf](http://www.flo-2d.com/v2007/Documentation/Users Manual_2007.pdf) (pridobljeno 6. 2. 2009).
- Podobnikar, T. (2008), Nadgradnja modela reliefa Slovenije z visokokakovostnimi podatki, *Geodetski vestnik* 52/2008 - 4, 834-853
- Podobnikar, T., Vrečko, A. (2012). Digital Elevation Model from the best Results of Different Filtering of a Lidar Point Cloud. *Transactions in GIS*, 16-5, 603-617.
- Riley, S. J., De Gloria, S. D., Elliot, R. (1999). A Terrain Ruggedness that Quantifies Topographic Heterogeneity. *Intermountain Journal of Science*, 5(1–4), 23–27.
- Sodnik, J., Mikoš, M. (2006). Estimation of magnitudes of debris flows in selected torrential watersheds in Slovenia. *Acta geographica Slovenica*, 46(1). Ljubljana. doi: 10.3986/AGS46104.
- Sodnik, J., Petje, U., Mikoš, M. (2009). Topografija površja in modeliranje gibanja drobirskih tokov (Terrain topography and debris-flow modelling). *Geodetski vestnik*, 53(2). Ljubljana.
- Sodnik, J., Mikoš, M. (2010). Modeling of a debris flow from the Hrenovec torrential watershed above the village of Kropa. *Acta geographica Slovenica*. 50(1). 59–84. <http://giam.zrc-sazu.si/sites/default/files/ags50103.pdf>
- Uradni list (2008). Uredba o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, *Uradni list RS*, št. 89/2008.
- Uradni list (2007). Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti, *Uradni list RS*, št. 60/2007.
- Zakon o vodah (2002). *Zakon o vodah*. *Uradni list RS*, št. 67/2002.

**Prispelo v objavo: 25. september 2012**

**Sprejeto: 8. november 2012**

**asist. mag. Jošt Sodnik, univ. dipl. inž. grad.**

Vodnogospodarsko podjetje d. d., Ulica Mirka Vadnova 5, SI-4000 Kranj  
Univerza v Ljubljani, FGG - Oddelek za gradbeništvo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana  
e-pošta: jost.sodnik@gmail.com

**Anja Vrečko, univ. dipl. inž. geod.**

Univerza v Ljubljani, FGG - oddelek za geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana  
e-pošta: anja.vrecko@fgg.uni-lj.si

**doc. dr. Tomaž Podobnikar, univ. dipl. inž. geod.**

ZRC-SAZU, Novi trg 2, SI-1000 Ljubljana  
Univerza v Ljubljani, FGG - Oddelek za geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana  
e-pošta: tomaz.podobnikar@fgg.uni-lj.si

**prof.dr. Matjaž Mikoš, univ. dipl. inž. grad.**

Univerza v Ljubljani, FGG - oddelek za gradbeništvo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana  
e-pošta: matjaz.mikos@fgg.uni-lj.si