

Porušitvena erozija v občini Ajdovščina – možnosti in omejitve uporabe lidarskih podatkov za modeliranje padajočega kamenja

Rockfall in Municipality of Ajdovščina – Possibilities and Limitations of Use of Lidar Data for Rockfall Modeling

Milan KOBAL¹, Neža GANTAR²

Izvleček:

Kobal, M., Gantar, N.: Porušitvena erozija v Občini Ajdovščina – možnosti in omejitve uporabe lidarskih podatkov za modeliranje padajočega kamenja; Gozdarski vestnik, 74/2016, št. 9, V slovenščini s izvlečkom in povzetkom v angleščini, cit. lit. 40. Prevod Breda Misja, jezikovni pregled slovenskega besedila Marjetka Šivic.

Porušitvena erozija je posledica preperevanja kamnin, ki se v naravi najpogosteje kaže kot padajoče kamenje. Časovna napoved skalnih podorov je praktično nemogoča, lahko pa z uporabo različnih modelov določimo območja potencialnega premeščanja in odlaganja kamenja, ki jih lahko predpostavimo kot ogrožena območja. V raziskavi smo Občino Ajdovščina razdelili na območje, kjer prevladuje karbonatna matična podlaga, in na območje, kjer se kot matična podlaga pojavlja fliš. Mejni vrednosti naklonov, nad katerimi smo območja predpostavili kot potencialni izvor kamenja, smo povzeli po literaturi; za flišnata območja 46 °, za območje karbonatne matične podlage pa 53 °. Območja potencialnega premeščanja in potencialnega odlaganja kamenja smo določili z modelom Conefall, ki temelji na načelu energijske linije – uporabili smo kot energijske linije 32 °, kot vrha stožca pa $\pm 16^\circ$. Pri modeliranju smo uporabili lidarski digitalni model reliefa 1 × 1 m. Določili smo 1524 potencialnih izvorov padajočega kamenja s skupno površino 102,9 ha. Srednja velikost potencialnega območja izvora kamenja je 260 m². Na podlagi rezultatov modela Conefall smo na območju Občine Ajdovščine določili 3379,9 ha zemljišč, kjer je verjetnost gibanja oz. odlaganja padajočega kamenja, med območjema pa so opazne razlike glede deleža teh površin. Uporaba lidarskih podatkov je pri določanju potencialnih izvorov kamenja pogosta in ima številne prednosti pred drugimi metodami, vendar ima tudi pomanjkljivosti; določeni so bili nekateri nesmiselni izvori kamenja, na drugi strani pa s testirano metodo nismo zajeli določenih potencialnih izvorov. Obdelava podatkov je na večjem območju procesno potratna in terja zmogljivo računalniško opremo. Najboljša rešitev za modeliranje porušitvene erozije se zdi kombinacija uporabe lidarskega digitalnega modela reliefa ob hkratni terenski kontroli izločenih potencialnih območij izvora kamenja in kartiranja obstoječih skalnih podorov, ki naj poteka vzporedno s terenskim delom revirnih gozdarjev in gozdarskih načrtovalcev. Izdelava kart ogroženosti pred porušitveno erozijo bi morala postati obvezen del gozdnogospodarskih načrtov.

Ključne besede: porušitvena erozija, padajoče kamenje, varovalni gozd, skalni podori, karta ogroženosti padajočega kamenja, Občina Ajdovščina

Abstract:

Kobal, M., Gantar, N.: Rockfall in Municipality of Ajdovščina – Possibilities and Limitations of Use of Lidar Data for Rockfall Modelling. Gozdarski vestnik (Professional Journal of Forestry), 74/2016, vol 9. In Slovenian, abstract and summary in English, lit. quot. 40. Translated by Breda Misja, proofreading of the Slovenian text Marjetka Šivic.

Rockfall is a consequence rock decay, which is most often shown as rockfall in the nature. Time prediction of rockfalls is practically impossible, but using diverse models we can determine areas of potential rockfall motion and deposition we can assume to be hazard areas. In our research we divided the Ajdovščina Municipality into the area with prevailing calcareous bedrock and the area with flysch occurring as bedrock. Limit values of the slopes, above which the areas were assumed to be potential rockfall sources, come from the literature; for flysch areas 46° and 53° for calcareous bedrock area. The potential rock motion and run-out zones were determined using Conefall model based on the principle of energy line – we applied energy line angle 32° and angle of the cone top $\pm 16^\circ$. In modeling we used lidar digital relief model 1 × 1 m. We determined 1524 potential rockfall sources with total area of 102.9 ha. Mean size of the potential rockfall release zone is 260 m². On the basis of Conefall model results we determined 3379.9 ha of areas where there is probability of rockfall motion or run-out; there are large differences concerning the share of these areas. Lidar data is frequently used in determining potential rockfall sources and has many advantages over other methods, but it also has deficiencies. Some pointless rockfall

release areas were determined, while we did not embrace certain potential sources using the tested method. Data processing is, in terms of processing, lavish on a larger area and requires very capable computer software. The best solution for rockfall modeling seems to be combination of lidar digital relief model and simultaneous field control of the eliminated potential rockfall release and deposit areas. It should take place parallelly with field work of district foresters and forest planners. Preparation of rockfall hazard maps should become a mandatory part of forest management plans.

Key words: rockfall, rockfall release area, protection forest, rockfall motion, rockfall hazard map, Ajdovščina

1 UVOD

1 INTRODUCTION

1.1 Splošno o eroziji

1.1 General information on erosion

Erozija je proces razdiranja tal zaradi delovanja zunanjih sil, npr. vode, leda, snega, vetra in težnosti (Horvat, 2001). V slovenskem prostoru so erozijski procesi dokaj intenzivni, saj je Slovenija pretežno hribovita dežela. Erozijski pojavi so prisotni na 42–44 % njene površine (Zemljič, 1972). Poleg hudourniške erozije (površinsko sproščanje erozijskega drobirja, globinska ter bočna erozija), plazne (globinski in površinski plazovi v enovitih in plastovitih zemljinah, usadi, splazitve, zdrsi in počasno polzenje tal), snežne (drsenja, polzenje in plazenje snežne odeje), poplavlne (poplavljanje, preplavljanje in naplavljanje) poznamo tudi porušitveno (Horvat, 2001).

Porušitvena erozija nastaja zaradi preperevanja kamnine. Med porušitveno erozijo Horvat (2001) uvršča padanje kamenja, padanje skal, skalne podore in podore hriba. Vsi ti procesi se pojavljajo predvsem na strmih pobočjih in skalnih stenah, kjer je slojevitost kamnine vzporedna s pobočjem in kršenje poteka konstantno. Značilnost porušitvene erozije je, da se v zelo kratkem času sprosti velika količina energije. Kot navaja Brillys sod. (1999), so skalne porušitve nevarne zaradi a) premikov hribinskih gmot, ki lahko poškodujejo ali porušijo objekte ter b) odlaganja hribinskih gmot, ki lahko zajezijo vodotoke, prekinejo prometne povezave ter spremenijo podobo krajine.

Dorren in sod. (2011) podrobneje razlikujejo gibanje padajočega kamenja na: območje izvora kamenja (*angl. release zone*), območje premeščanja (*angl. transit zone*) in območje odlaganja (*angl. deposit zone*). V začetni fazi nastaja na strmem terenu in v skalnih stenah z večjim naklonom

sproščanje ter gibanje skal in kamenja. V tej fazi, ko je gibanje nemoteno, lahko ocenimo pospeševalce in sprožilce kamenja. Pospeševalci so pojavi, ki omogočajo in pospešujejo pojav padajočega kamenja, sprožilci pa so tisti pojavi, ki dejansko v trenutku sprožijo padec kamna ali skale (Dorren, 2003). Ko padajoče kamenje preide v območje premeščanja, doseže največjo hitrost in največje trke ter odboje od podlage. V zadnji fazi oz. fazi odlaganja kamenje postopoma izgublja hitrost in se na koncu tudi ustavi. Na istih lokacijah se lahko območja premeščanja in območja odlaganja prekrivajo.

Gibanje padajočega kamenja je odvisno predvsem od naklona terena in hrapavosti – gladka podlaga absorbira malo kinetične energije, medtem ko npr. melišče absorbira več energije padajočega kamenja. V grobem ločimo prosti pad, odbijanje od tal, kotaljenje, drsenje in na koncu zaustavitev, ki je lahko hipna (Dorren, 2003).

1.2 Metode modeliranja porušitvene erozije

1.2 Methods of rockfall modelling

Porušitvene erozije ni mogoče časovno natančno napovedati, lahko pa z uporabo različnih modelov določimo območja potencialnega premeščanja in potencialnega odlaganja kamenja, skal in hribin (v nadaljevanju padajočega kamenja), ki jih lahko predpostavimo kot ogrožena območja. Pri modeliranju porušitvene erozije je torej treba najprej določiti a) potencialne izvore padajočega kamenja ter b) območja potencialnega premeščanja in s tem tudi območja potencialnega odlaganja kamenja.

¹ Doc. dr. M. K., univ. dipl. inž. gozd., Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. Večna pot 83, SI-1000 Ljubljana, Slovenija. milan.kobal@bf.uni-lj.si

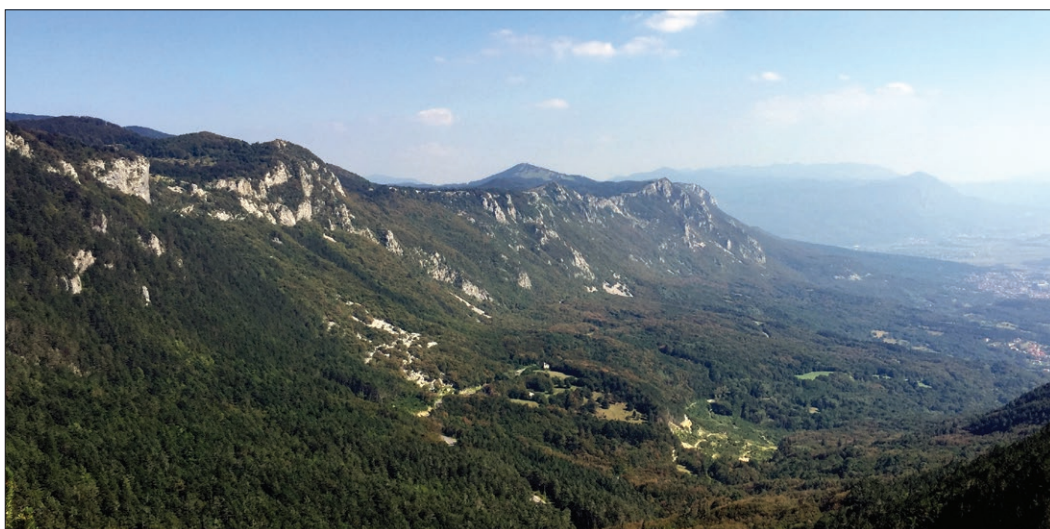
² N. G., dipl. inž. gozd (UN), Godovič 177, SI-5275 Godovič, Slovenija. neza.gantar@gmail.com

Za določanje območij potencialnih izvorov padajočega kamenja se v literaturi pojavljajo različni pristopi. Najstarejša metoda je terensko kartiranje; je najbolj natančna, vendar zamudna metoda in zato primerna samo za podrobne analize na že znanih območjih. Na tak način so za območje Trente ogroženost pred porušitveno erozijo določili Petje in sod. (2005). Pogosto se območja potencialnega izvora kamenja določi tudi na podlagi Temeljnih topografskih načrtov merila 1 : 5000 in 1 : 10000 (TTN 5/10) oz. na podlagi Državne topografske karte merila 1 : 25000 (DTK 25) (npr. Novak, 2014).

Naslednji pristop temelji na enotno določeni mejni vrednosti naklona pobočja, nad katerim predpostavimo večjo verjetnost nastanka porušitvene erozije (Toppe, 1987; van Dijke in van Westen, 1990). V Sloveniji sta deloma na tak način potencialne izvore kamenja določila Skudnik in Kušar (2011), dodatno sta upoštevala še rabo tal, geološko karto in masko skalovitosti, pridobljeno na podlagi državne topografske karte Slovenije; v gozdovih sta kot območja potencialnega izvora določila vse površine z naklonom, večjim od 39° , na neporaslih zemljiščih pa več kot 42° . Podobno je območja sproščanja določil tudi Guček (2016). Novejši je pristop, ki je uporaben predvsem za modeliranje padajočega kamenja na območjih, za katere imamo natančnejši digitalni model reliefa

(DMR) visoke prostorske ločljivosti (npr. 1×1 m). Površino (npr. občina, gozdnogospodarsko območje, statistična regija), znotraj katere modeliramo padajoče kamenje, najprej razdelimo na geomorfološko homogene enote. Kriterij delitve so najpogostejše geološka zgradba, talne značilnosti, reliefna razgibanost itn. (Loye in sod., 2009). Nato za posamezno geomorfološko homogeno enoto izdelamo porazdelitev naklonov po 1° razredih, to porazdelitev pa nadalje razstavimo na več Gaussovih porazdelitev (angl. decomposition of a distribution). Pri tem minimiziramo vsoto kvadratov odstopanj dejanske porazdelitve naklonov od vsote novonastalih normalnih porazdelitev. Po navadi določimo od 3 do 5 novih porazdelitev. Zgornji dve (oz. ena) porazdelitvi predstavljata skalne stene in pobočja, ki jih prevzamemo kot območja potencialnega izvora padajočega kamenja. Na tak način sta območja sproščanja v Švici določila Loye in sod. (2009) ter Corona in sod. (2013).

Modele, s katerimi določimo območja potencialnega premeščanja in potencialnega odlaganja kamenja, lahko delimo v dve skupini glede na to, ali doseg skalnega podora določimo na podlagi statično določenega kota (npr. Conefall; Jaboyedoff, 2003) ali na podlagi simuliranja gibanja kamenja po pobočju (npr. RockyFor3D; Dorren, 2012), kjer je glavni rezultat snop trajektorij potovanja kame-



Slika 1: Pogled na del potencialnih izvorov padajočega kamenja v občini Ajdovščina (foto: M. Kobal)
Figure 1: View of the part of potential rockfall release zones above Ajdovščina (photo: M. Kobal)

nja od njegovega izvora do mesta zaustavitve. Kot vhode v model potrebujemo podatke o gozdnem sestoju, digitalnem modelu reliefa, lastnostih terena, obliki skalnih mas, tipu talne površine in morebitni zaščiti pred padajočim kamenjem na obravnavani površini. Z modelom Conefall določimo doseg skalnega podora na obravnavanem območju, hitrost gibanja skal, kinetično energijo in število prehodov kamenja preko posamezne točke. Prisotnost pojava padajočega kamenja na terenu ocenimo na območju odlaganja kamenja, kjer lahko opazimo kamenje prejšnjih pobočnih procesov (Slika 1), ki se je zaustavilo v obliki melišč ali posameznih kamnov, t. i. nemih prič (Dorren in sod., 2005).

1.3 Gozdovi z varovalno in zaščitno funkcijo

1.3 Indirect and direct protection forests

Na območjih, kjer obstaja verjetnost potencialnega premeščanja in potencialnega odlaganja kamenja, je gozd naravna ovira gibanju padajočega kamenja. Gozdarji tako že vrsto let kartiramo funkcije, ki jih opravljajo gozdovi; v kontekstu porušitvene erozije sta to predvsem funkcija varovanja gozdnih zemljišče in sestojev (skupina ekoloških funkcij) ter zaščitna funkcija (skupina socialnih funkcij).

Prostorska opredelitev funkcij gozdov oz. kartiranje funkcij je (lahko) subjektivna, čemur pa se izognemo z uporabo različnih prostorskih modelov napovedovanja razširjenosti nekega pojava. V Sloveniji so tako že narejene raziskave padajočega kamenja za cesto Kranjska Gora–Vršič–Bovec (Horvat, 1996), Zgornje Posočje (Koren, 2005), območje Trente (Petje in sod., 2005), vas Brezno (Štampe, 2006), Kamniško Bistrico (Skudnik in Kušar, 2011), odsek železniške proge Podbrdo–Most na Soči; Baško grapo (Rak in sod., 2012), Sotesko pri Bohinju (Novak, 2014), del vršiške ceste (Noč, 2014), gozdnogospodarski enoti Jezersko in Tržič (Guček, 2016). Na Ljubelju so modeliranje padajočega kamenja opravili Rebernik (2013) ter Kajdiš in sod. (2015), na cesti Godovič–Idrija pa Kunc (2008).

V raziskavah so pogosto narejene tudi presoje varovalnega učinka gozdov na padajoče kamenje, za kar se uporablja model Rockfor.NET. Učinkovitost in zanesljivost zaščite pred naravnimi

nevarnostmi, ki jo zagotavlja gozd, sta odvisni od a) naravne nevarnosti, b) frekvence in intenzivnosti škodnih dogodkov ter c) stanja gozda (Brang in sod., 2006).

Vpliv gozda na padajoče kamenje v izvornem območju ima pozitivne in negativne učinke. Korenine dreves zadržujejo kamenje in tako preprečujejo začetek podornih procesov, po drugi strani pa preperevanje zaradi organskih kislin in preraščanje korenin v razpoke skal pospešuje nastanek padajočega kamenja. V območju gibanja in območju zaustavljanja prihaja do trkov kamenja z drevesi in posledično do zmanjšanja njihove hitrosti oziroma njihove zaustavitve (Dorren in sod., 2005). Gostota drevja je pomembnejša od premera pri manjšem kamenju, za zaustavitev večjega pa je nujna prisotnost drevja večjih premerov (Dorren in sod., 2011).

Namen prispevka je: a) na območju Občine Ajdovščina s pomočjo lidarskega digitalnega modela reliefa določiti območja potencialnega izvora kamenja in območja potencialnega premeščanja ter odlaganja kamenja ter b) ugotoviti možnosti in omejitve, ki jih pri modeliranju padajočega kamenja prinaša lidarski digitalni model reliefa.

2 METODE

2 METHODS

2.1 Občina Ajdovščina

2.1 Municipality of Ajdovščina

Občina Ajdovščina se razprostira na 245,2 km² in šteje 19047 prebivalcev (Statistični urad RS, 2016). Območje Občine Ajdovščina se reliefno razlikuje. Osrednji del Vipavske doline, kjer leži mesto Ajdovščina (106 m n. v.), na severu preide v kraško planoto Trnovskega gozda (1495 m n. v.), na severovzhodnem delu pa planoto Hrušica. Na jugu se dvigajo Vipavski griči. Na zahodnem delu prevladuje ravninski del, od koder prihaja vpliv sredozemskega podnebja. Najnižja točka občine je rokav Vipave pod Batujami (60 m n. v.).

Trnovski gozd sestavljajo apnenci in dolomiti mezozojske starosti. Najstarejši skladi apnencev in dolomitov iz zgornjega triasa so na severovzhodu, nato jim proti jugozahodu sledijo jurski in kredni skladi (Vidmar, 2010). Hrušica je zgrajena iz kre-

dnih apnencev. Vipavsko dolino, Vipavske griče in spodnja pobočja Trnovskega gozda sestavljajo terciarne flišne kamnine. Na pobočju Trnovskega gozda in v ravninskem delu Vipavske doline so kvartarne pobočne breče, pobočni grušč, aluvialni nanosi rek in potokov ter kraška ilovica.

V Občini Ajdovščina je po podatkih karte rabe tal Ministrstva za kmetijstvo gozdarstvo in prehrano (MKGP, 2016a) 7294,4 ha kmetijskih zemljišč ter 15923,4 ha gozdov. Med geomorfološko homogenima enotama so razlike zlasti v deležu kmetijskih in deležu gozdnih zemljišč. Razlikuje se tudi delež pozidanih zemljišč (Preglednica 1).

2.2 Modeliranje padajočega kamenja

2.2 Rockfall modelling

2.2.1 Določanje območij sproščanja padajočega kamenja

2.2.1 Rockfall source area identification

Pri določanju potencialnih izvorov padajočega kamenja smo uporabili pristop, ki temelji na dekompoziciji porazdelitve naklonov znotraj geomorfološko homogenih regij. Občino Ajdovščina smo razdelili na dve geomorfološko homogeni

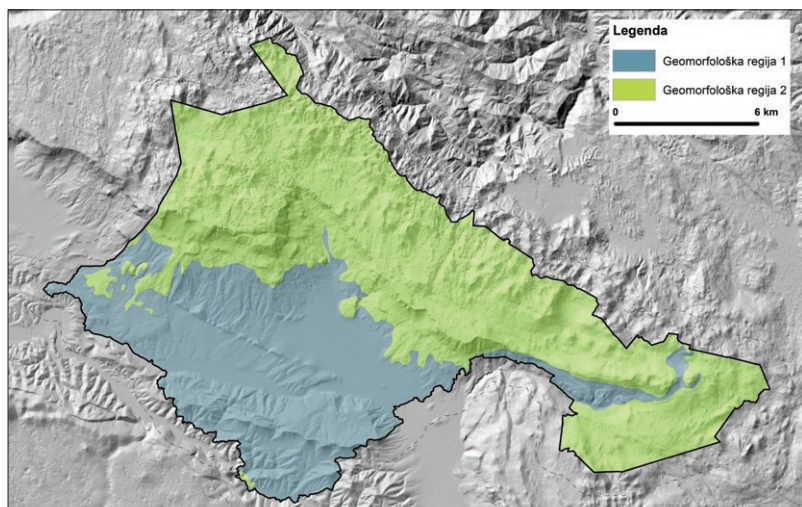
enoti (Slika 2) glede na matično podlago iz pedološke karte Slovenije DPK25 v merilu 1 : 25000 (MKGP, 2016b). Razlikovali smo med karbonatno matično podlago (apnenec) in flišem v Vipavski dolini. Lidarske podatke za izdelavo DMR smo pridobili na spletni strani eVode Agencije Republike Slovenije za Okolje (ARSO, 2016). V programu ArcMAP 10.4 (ESRI, 2016) smo iz oblaka lidarskih točk, določenih kot talnih, izdelali DMR prostorske ločljivosti 1×1 m, v nadaljevanju pa tudi karto naklonov po razredih 1° . Frekvenčno porazdelitev naklonov znotraj obeh geomorfološko homogenih regijah smo izdelali na podlagi atributne tabele sloja naklonov (Slika 3).

Kot mejne vrednosti naklonov, nad katerimi smo območja določili kot potencialni izvori kamenja, smo prevzeli vrednosti, ki jih je za primerljive matične podlage v Švici določil Loyer sod. (2009) – 46° za območje, kjer prevladujejo fliš, oz. 53° za območje karbonatne matične podlage. V nadaljevanju smo izločili vse potencialne izvore, kjer je bila površina območja manjša od 10 m^2 (povzeto po Loyer in sod., 2009), ter izvore, kjer je bila razlika v nadmorski višini znotraj območja potencialnega izvora manj kot 5 m.

Preglednica 1: Raba tal na območju občine Ajdovščina leta 2016 (MKGP, 2016a)

Table 1: Land use in the municipality of Ajdovščina in 2016 (MAFF, 2016a)

Raba tal MKGP	Geomorfološka regija 1 (karbonatna matična podlaga)		Geomorfološka regija 2 (flišna matična podlaga)		Občina Ajdovščina (skupaj)	
	površina (ha)	delež (%)	površina (ha)	delež (%)	površina (ha)	delež (%)
Njive in vrtovi	1050,4	10,9	27,4	0,2	1077,8	4,4
Trajni nasadi	1080,4	11,2	24,0	0,2	1104,4	4,5
Travniške površine	2452,4	25,4	1885,0	12,7	4337,4	17,7
Druge kmetijske površine	537,3	5,6	237,6	1,6	774,8	3,2
Gozd	3606,1	37,4	12317,3	82,8	15923,4	64,9
Pozidana in sorodna zemljišča	866,7	9,0	227,0	1,5	1093,7	4,5
Zamočvirjeno zemljišče	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
Suho in odprto zemljišče	8,6	0,1	152,6	1,0	161,2	0,7
Voda	49,5	0,5	1,1	0,0	50,6	0,2
Skupaj	9651,4	100,0	14872,0	100,0	24523,4	100,0



Slika 2: Razdelitev Občine Ajdovščina na dve geomorfološko homogeni enoti glede na podatke o matični podlagi iz pedološke karte Slovenije DPK25 v merilu 1 : 25.000

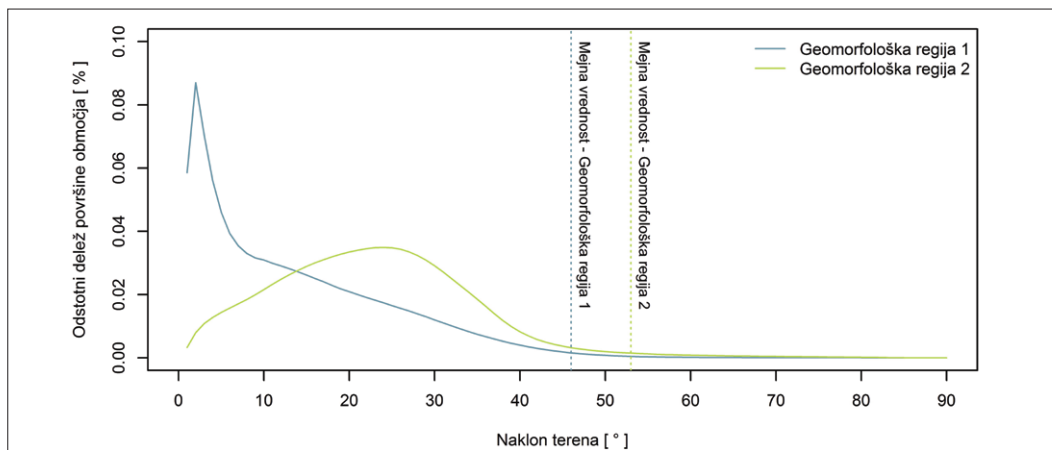
Figure 2: Subdivision of Ajdovščina into two geomorphological homogeneous units according to data on the bedrock of the soil map of Slovenia DPK25 in the scale of 1: 25,000

2.2.2 Določanje območja odlaganja padajočega kamenja

2.2.2 Modelling rockfall deposit zones

Za določitev območja potencialnega premeščanja in odlaganja kamenja smo uporabili program Conefall (Jaboyedoff, 2003). Model je primeren za uporabo na regionalnem in tudi na lokalnem nivoju in temelji na načelu energijske linije. Ta določa največji doseg, do koder se kamenje lahko odloži in je bil določen na podlagi terenskih opa-

zovanj skalnih podorov (Heime, 1932, Berger in sod., 2005). Prav tako je bil na podlagi terenskih opazovanj določen tudi kot največjega lateralnega odlaganja kamenja. V modelu Conefall sta opisana kota vključena tako, da so za določanje dosega skalnega podora izbrane vse površine, ki so znotraj stožca (ki ga določata kota) v 3D prostoru, pri tem pa potencialni izvor padajočega kamenja predstavlja vrh stožca. Uporabili smo kot energijske linije 32° , kot vrha stožca pa $\pm 16^\circ$.



Slika 3: Porazdelitev naklonov za dve geomorfološko homogeni regiji v Občini Ajdovščina. Širina razreda je 1°

Figure 3: The distribution of slope of two geomorphological homogeneous regions in Ajdovščina. The width of the class is 1°

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

3 RESULTS AND DISCUSSION

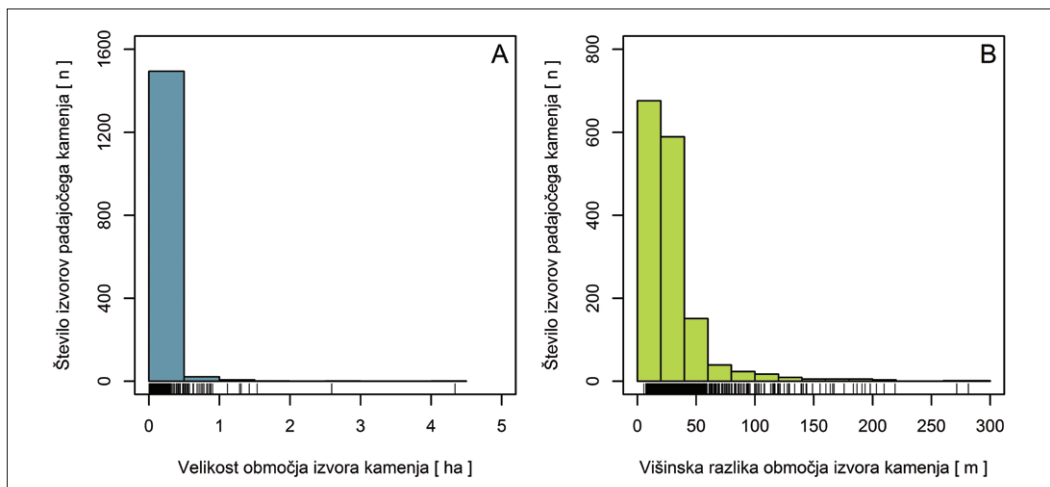
3.1 Območja potencialnih izvorov padajočega kamenja

3.1 Potential Rockfall source area

Na območju Občine Ajdovščine smo znotraj dveh geomorfološko homogenih regij določili 1524 območij, za katere na podlagi modela sklepamo, da so lahko potencialni izvori padajočega kamenja (Slika 4 – levo) s skupno površino 102,9 ha (Slika 4 - desno). Srednja velikost (mediana) območja potencialnega izvora kamenja je 260 m². Znotraj geomorfološke regije 1 smo zaznali 328

čja potencialnega izvora kamenja je bila 23,4 m, največja višinska razlika pa 281,4 m. Na sliki 5 je prikazan izsek iz senčenega digitalnega modela površja na območju nad izvirom Hublja, kjer so s črno barvo označena potencialna območja izvora porušitvene erozije (Slika 5).

Lidarski podatki se smiselno uporabljajo na številnih področjih, tako v gozdarstvu (Kobler in Zafran, 2006; Kobal, 2014; Kobal in sod., 2015) kot tudi pri določanju in spremljanju erozijsko ogroženih območij (Hengxing in sod., 2010; Bossi in sod., 2015; Kobal, 2015). Sicer je uporaba lidarskih podatkov pri določanju izvornih območji kamenja pogosta (npr. Loye, 2009; Cororna in sod., 2013), vendar ima tudi pomanjkljivosti. Na



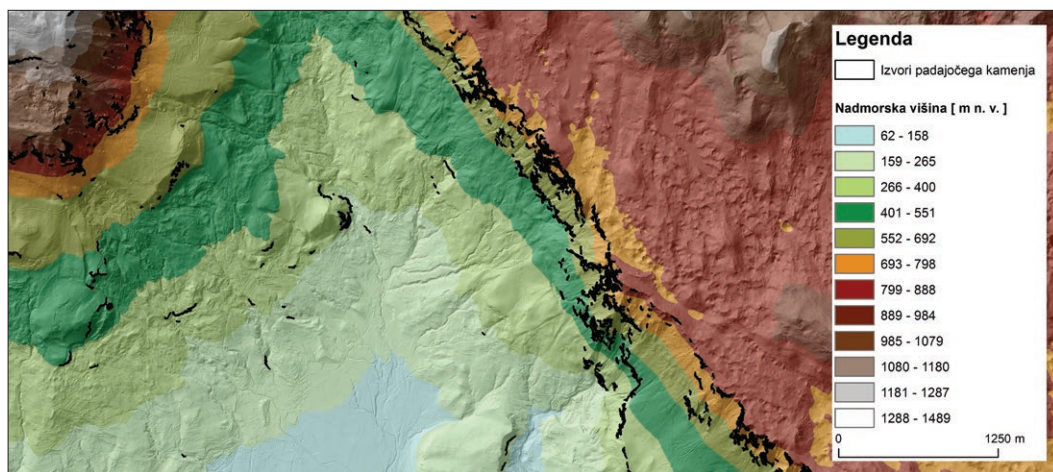
Slika 4: Frekvenčna porazdelitev površine potencialnih izvorov kamenja (levo) ter frekvenčna porazdelitev višinskih razlik potencialnih izvorov kamenja (desno)

Figure 4: Frequency distribution of areas of potential rockfall sources (left) and frequency distribution of differences in height of potential rockfall sources (right)

potencialnih izvorov kamenja v skupni površini 16,0 ha. Srednja velikost (mediana) območja potencialnega izvora kamenja je bila 266 m², največja velikost pa 0,86 ha. Srednja višinska razlika (mediana) znotraj območja potencialnega izvora kamenja je bila 16,8 m, največja višinska razlika pa 119,7 m. Znotraj geomorfološke regije 2 smo zaznali 1223 potencialnih izvorov kamenja v skupni površini 86,9 ha. Srednja velikost (mediana) območja potencialnega izvora kamenja je bila 263 m², največja velikost pa 4,34 ha. Srednja višinska razlika (mediana) znotraj obmo-

nekatero smo naleteli tudi na primeru Občine Ajdovščina; model je izločil nekatera nesmiselna območja izvora kamenja (Slika 6), v nekaterih primerih pa je bil model premalo natančen in ni zajel določenih območij, za katera je znano iz terenskega pregleda, da so potencialni izvori padajočega kamenja (Slika 7).

Zagotovo bi bilo smiselno pri določanju območij potencialnih izvorov upoštevati dostopne karte rabe tal, vendar ne le pri določanju mejnih vrednosti naklonov površja (npr. Skudnik in Kušar, 2011), ampak tudi nasploh pri verjetnosti



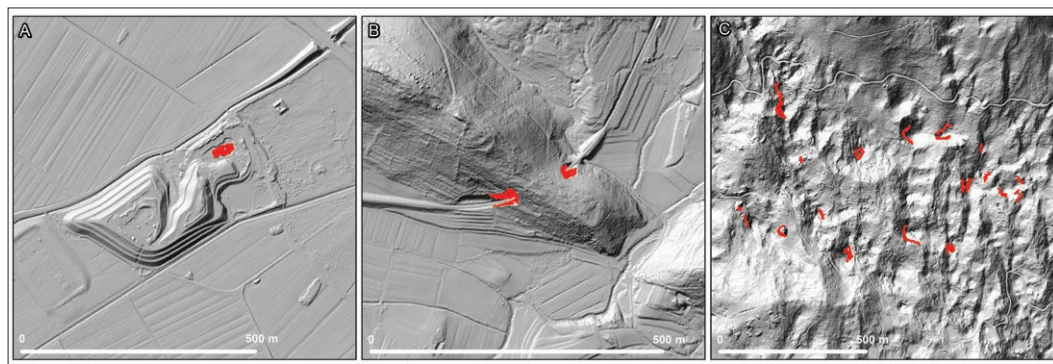
Slika 5: Izsek iz senčenega digitalnega modela reliefa SZ nad izvirom Hublja, kjer so s črno barvo označeni potencialni izvori kamenja.

Figure 5: A section of the shaded digital model of relief NW above the spring of Hubelj, where potential rockfall sources are marked with black color.

za pojav območja sproščanja (npr. strmi nakloni na območju teras v vinogradih in nadvozih/podvozih avtoceste, pozidana in sorodna zemljišča, npr. smetišče, Slika 6 – desno, Slika 6 – sredina). Primer upoštevanja rabe tal je predstavljen v Lopez-Saez in sod. (2016). V našem primeru smo na območju karbonatne matične podlage precej izvorov kamenja določili tudi v vrtačah na visokem krasu (Slika 6 – desno), zato bi

bila smiselna predhodna analiza reliefa, kjer se vrtače pojavljajo; metodologija za prepoznavanje vrtač iz lidarskega digitalnega modela reliefa je znana (npr. Kobal in sod., 2015).

Na drugi strani pa smo z opisano metodologijo zagotovo "spregledali" precej potencialnih izvorov kamenja, tudi zaradi pomanjkanja lidarskih talnih točk (Slika 7 – levo). Na pobočjih, kjer je naklon podoben mejni vrednosti naklona



Slika 6: Primeri nesmiselno določenih potencialnih izvorov kamenja na podlagi mejnih vrednosti naklonov pobočja iz lidarskega digitalnega modela reliefa. A: potencialni izvor kamenja na območju zbirnega centra v okviru Centra za ravnanje z odpadki Ajdovščina pod Dolgo Poljano. B: potencirani izvor kamenja na območju predora železniške proge pred Dobravljami. C: Številni potencialni izvori padajočega kamenja se pojavljajo na območju vrtač visokega krasa.

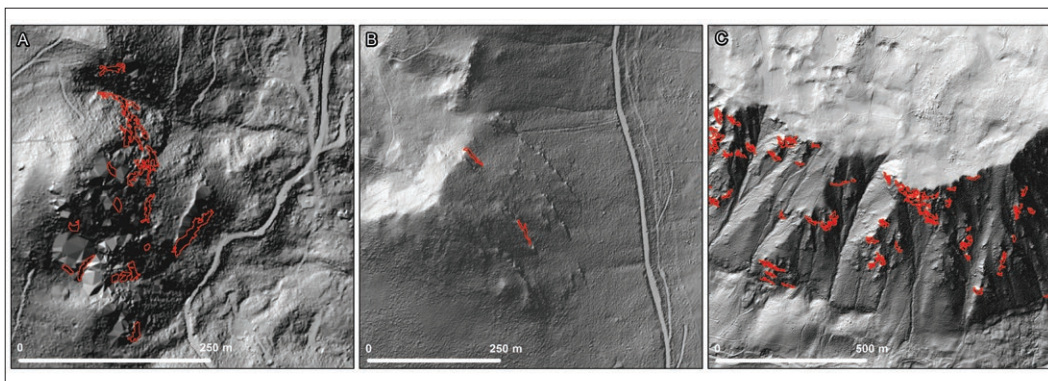
Figure 6: Examples of pointlessly determined potential rockfall sources based on the limit slope values from lidar digital relief model. A: A potential rockfall source in the area of assembly center in the framework of the Ajdovščina Waste Management Center under Dolga poljana. B: A potential rockfall source in the area of railway before Dobravlje. C: Numerous potential rockfall sources occur in the sinkholes area of high Karst.

za izločanje potencialnih izvornih območij (Slika 7 – desno), na podlagi testirane metodologije določimo sicer več potencialnih območij sproščanja, vendar manjša zaradi nepovezanosti z drugimi večjimi izpadejo (izločili smo vsa območja sproščanja, kjer je bila površina manjša od 10 m²). V teh primerih bi bilo smiselno narediti generalizacijo rastrske karte potencialnih izvorov kamenja oz. območja izvorov prostorsko omejiti z uporabo metodologije konveksnih množic v prostoru. Na tak način so Eysn in sod. (2012) določili gozdni prostor, metodologija pa se zdi smiselna tudi v

3.2 Območja gibanja in odlaganja padajočega kamenja v Občini Ajdovščina

3.2 Rockfall risk assessment in the municipality of Ajdovščina

V raziskavi smo preverili tudi možnosti določanja območji potencialnega premeščanja in odlaganja kamenja na podlagi lidarskega DMR 1 × 1 m, ki je od leta 2015 dostopen za celotno območje Slovenije. Iz rezultatov modela Conefall sklepamo, da je na območju Občine Ajdovščina 3379,9 ha zemljišč (Preglednica 2), kjer obstaja verjetnost



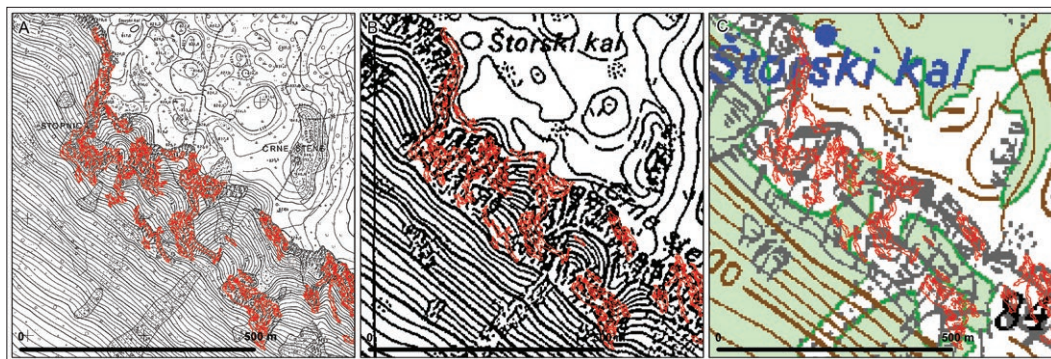
Slika 7: Primer nepravilno določenih potencialnih izvorov kamenja na podlagi mejnih vrednosti naklonov pobočja iz lidarskega digitalnega modela reliefa. A: primer nenatančnega digitalnega modela reliefa zaradi premalo lidarskih točk, določenih kot talnih. B in C: primer premalo izločenih potencialnih izvorov kamenja
Figure 7: An example of falsely determined potential rockfall sources based on limit slope values from lidar digital relief model. A: An example of inaccurate digital relief model due to a too little number of lidar points, determined as ground points. B and C: An example of not enough eliminated potential rockfall sources

primeru določanja izvornih območij kamenja (Slika 7 – sredina).

Primerjava naših rezultatov izločenih potencialnih izvorov kamenja s prejšnjimi raziskavami padajočega kamenja v Sloveniji (npr. Skudnik in Kušar, 2011; Novak, 2014; Guček, 2016) ni korektna, ker v prejšnjih raziskavah lidarskih podatkov še ni bilo na voljo. Za primerjavo natančnosti lidarskih podatkov in v prejšnjih raziskavah uporabljenih kart je na Sliki 9 prikazano isto območje na kartah različnih meril; iz lidarskih podatkov določeni izvori kamenja so označeni z rdečo barvo. Na kartah različnih meril so jasno vidne tudi stene – v nekaterih omenjenih študijah so bile stene iz podatkov prikazanih kart vključene med območja izvora kamenja.

premeščanja oz. odlaganja padajočega kamenja. Opazne so razlike med obema regijama; znotraj geomorfološke regije 1 je takih površin 3,74 % oz. 360,7 ha. K tej površini največ prispevajo območja, ki jih poraščajo gozdovi (132,9 ha). Večja je površina potencialnega gibanja in odlaganja kamenja na območju geomorfološke regije 2; skupno 3019,2 ha, kar je dobra petina celotnega območja oz. 12,3 % Občine Ajdovščina. Prav tako tudi na tem območju največji delež predstavljajo gozdovi (1327,4 ha oz. 8,9 % celotne Občine Ajdovščina). Na sliki 9 je prikazan izsek senčenega digitalnega modela površja na območju nad izvirom Hublja, kjer so z barvno lestvico označena števila potencialnih prehodov kamenja preko površine, velikosti 1 m².

Model Conefall je sicer primeren tudi za uporabo na regionalnem nivoju, vendar je obdelava



Slika 8: Primer treh preglednih kart z vrisanimi izvori kamenja, določenimi na podlagi mejnih vrednosti naklonov pobočja iz lidarskega digitalnega modela. A: TTN v merilu 1 : 5000, DPK v merilu 1 : 25000 ter DPK v merilu 1 : 50000

Figure 8: An example of three general maps with delineated rockfall sources, determined on the basis of limit slope values from lidar digital model. A: TTN in the scale of 1:5000, DPK in the scale of 1:25000, and DPK in the scale of 1:50000

podatkov procesno potratna in je potrebna zmogljiva računalniška oprema. V našem primeru smo Občino Ajdovščina razdelili na 65 podenot in modeliranje dosega padajočega kamenja izvajali ločeno za vsako podenoto. Pri tem je treba opozoriti, da so se morale podenote znatno prekrivati (odvisno od naklona pobočja), sicer

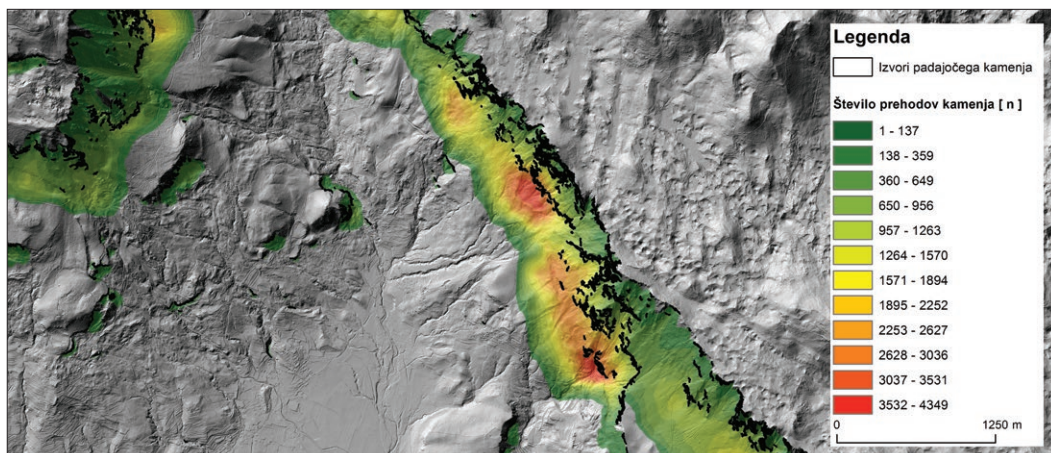
bi zaradi modeliranja lateralnega gibanja kamenja na mestih spajanja podenot nastale napake; kamenje iz ene podenote mora prosto prehajati tudi na drugo podenoto.

Nadgradnjo prikazanega modeliranja potencialnega premeščanja in odlaganja kamenja predstavlja 3D simuliranje kotaljenja kamenja po

Preglednica 2: Območja potencialnega premeščanja in potencialnega odlaganja kamenja v Občini Ajdovščina, določena z modelom Conefall glede na rabo tal

Table 2: Potential rockfall motion and run-out zones in the Ajdovščina Municipality, determined using the Conefall model with regard to soil use

Raba tal MKGP	Geomorfološka regija 1 (karbonatna matična podlaga)		Geomorfološka regija 2 (flišna matična podlaga)		Občina Ajdovščina (skupaj)	
	površina (ha)	delež (%)	površina (ha)	delež (%)	površina (ha)	delež (%)
Njive in vrtovi	0,2	0,00	0,1	0,00	0,3	0,00
Trajni nasadi	28,0	0,29	33,6	0,23	61,6	0,25
Travniške površine	1,6	0,02	11,2	0,07	12,7	0,05
Druge kmetijske površine	8,6	0,09	16,9	0,11	25,5	0,10
Gozd	132,9	1,38	1327,4	8,93	1460,3	5,95
Pozidana in sorodna zemljišča	7,5	0,08	8,9	0,06	16,4	0,07
Zamočvirjeno zemljišče	0,7	0,01	68,1	0,46	68,8	0,28
Suho in odprto zemljišče	0,8	0,01	43,4	0,29	44,3	0,18
Voda	180,3	1,87	1509,6	10,15	1690,0	6,89
Skupaj	360,7	3,74	3019,2	20,30	3379,9	13,78



Slika 9: Izsek iz senčenega digitalnega modela reliefa SZ nad izviro Hublja, kjer so z barvno lestvico označena števila potencialnih prehodov kamenja preko površine velikosti 1 m²

Figure 9: A section of the shaded digital model of relief NW above the spring of Hubelj, where the numbers of potential rockfall passages over an area of 1 m² are marked with color scale

pobočju (npr. Stoffel in sod., 2006; Rammer in sod., 2010), vendar je ta metodologija še bolj računalniško potratna in terja še več časa. Zato je še toliko pomembnejše, da na eni strani določimo le območja, ki so zares izvori kamenja. Najboljša rešitev določanja izvorov kamenja se trenutno zdi kombinacija uporabe lidarskega DMR in določanje izvorov glede na mejni kot znotraj geomorfološko homogene enote, hkrati pa terenska kontrola izločenih potencialnih izvorov. Tu vidimo veliko priložnost za gozdarsko stroko, ki bi lahko odigrala pomembnejšo vlogo pri določanju območij, ogroženih zaradi porušitvene erozije, ne le v obliki izdelave kart varovalnih gozdov, torej gozdov, ki opravljajo funkcijo varovanja gozdnih zemljišč, ter izločanju zaščitne funkcije gozdov. Evidentiranje izvorov kamenja in dosegov skalnih podorov (kartiranje t.i. nemih prič) bi lahko potekalo vzporedno s terenskim delom revirnih gozdarjev in gozdarskih načrtovalcev, izdelava kart ogroženosti pred porušitveno erozijo pa bi morale postati obvezen del gozdnogospodarskih načrtov oziroma preostalih prostorskih načrtov.

4 POVZETEK

Erozija je razdiranja tal zaradi delovanja zunanjih sil (voda, led, sneg, veter in težnost). V slovenskem prostoru so erozijski procesi dokaj intenzivni. Porušitvena erozija (padanje kamenja, padanje

skal, skalne podore in podore hriba) nastaja zaradi preperevanja kamnine. Značilnost porušitvene erozije je, da nastane v zelo kratkem času, nena- dno se sprostijo velike količine energije. Skalnih podorov ni mogoče časovno natančno napovedati, lahko pa z uporabo različnih modelov določimo ogrožena območja. Pri tem je treba določiti poten- cialne izvore padajočega kamenja ter območja potencialnega premeščanja in odlaganja kamenja. V literaturi se pojavljajo različni načini določanja območij potencialnega izvora padajočega kamenja. V prispevku smo na testnem območju Občine Ajdovščina preverili možnost določanja poten- cialnih izvorov kamenja in modeliranje dosega kamenja iz lidarskih podatkov. Pri določanju izvorov padajočega kamenja smo uporabili pristop, ki temelji na dekompoziciji porazdelitve naklonov znotraj geomorfološko homogenih regij. Občino smo na podlagi podatkov o matični podlagi razdeli na dve regiji – razlikovali smo med apnencem in flišem. Kot mejne vrednosti naklonov za izvore kamenja smo prevzeli vrednosti, ki so jih za primerljive matične podlage v Švici določil Loyer in sod. (2009): za območje fliša 46°, za območje apnenca 53°. Za določitev območja potencialnega premeščanja in odlaganja kamenja smo uporabili program Conefall. Model je primeren za uporabo na regionalnem in tudi lokalnem nivoju in temelji na principu energijske linije. Ta določa največji

doseg, do koder se kamenje lahko odloži in je bil določen na podlagi terenskega opazovanj skalnih podorov (nemih prič). Prav tako je bil na podlagi terenskih opazovanj določen tudi kot največjega lateralnega odlaganja kamenja. Uporabili smo kot 32° ter $\pm 16^\circ$ za vrh stožca.

Na območju Občine Ajdovščine smo določili 1524 območij potencialnih izvorov padajočega kamenja s skupno površino 102,9 ha. Srednja velikost območja potencialnega izvora kamenja je 260 m^2 . Sicer je uporaba lidarskih podatkov pri določanju potencialnih izvorov kamenja pogosta, vendar ima tudi pomanjkljivosti, na katere smo naleteli tudi na primeru Občine Ajdovščina. Bodisi smo izločili nekatere nesmiselne izvore padajočega kamenja bodisi je bila taka metoda premalo natančna in nismo mogli zajeti vseh potencialnih izvorov. Zagotovo bi bilo smiselno pri določanju območij sproščanja upoštevati dostopne karte rabe tal, prav tako bi bila smiselna predhodna analiza reliefa, kjer se pojavljajo vrtače. Na drugi strani pa smo z opisano metodologijo zagotovo "spregledali" precej potencialnih izvorov kamenja, tudi zaradi pomanjkanja lidarskih talnih točk. Na pobočjih, kjer je naklon podoben mejni vrednosti naklona za izločanje potencialnih izvornih območij, na podlagi testirane metodologije določimo le večje potencialne izvore, manjša pa izpadejo zaradi nepovezanosti z drugimi, večjimi.

Na podlagi rezultatov modela Conefall lahko sklepamo, da je na območju Občine Ajdovščine $3379,9 \text{ ha}$ zemljišč, kjer obstaja verjetnost gibanja oz. odlaganja padajočega kamenja. Opazne so razlike med obema območjema. Obdelava podatkov je na večjem območju procesno potratna in je potrebna zmogljiva računalniška oprema. Nadgradnjo prikazanega modeliranja odlaganja kamenja predstavlja 3D simuliranje kotaljenja kamenja po pobočju, vendar je ta metodologija še bolj računalniško potratna in terja še več časa. Zato je še toliko pomembnejše, da natančno določimo izvore kamenja. Najboljša rešitev se zdi kombinacija uporabe lidarskega digitalnega modela reliefa in določanje izvorov glede na mejni kot znotraj geomorfološko homogene enote, hkrati pa terenska kontrola izločenih potencialnih območij, ki naj poteka vzporedno s terenskim delom revirnih gozdarjev in gozdarskih načrtovalcev. Izdelava kart

ogroženosti pred porušitveno erozijo bi morale postati obvezen del gozdnogospodarskih načrtov oziroma preostalih prostorskih načrtov.

4 SUMMARY

Erosion is ground decay due to actions of external forces (water, ice, snow, wind, and gravity). Erosion processes are rather intense in Slovenian area. Rockfall (falling of stones, falling of boulders, rockfall, and cliff collapse) occurs due to rock decay. Typical for rockfall is its occurring in a very short time, large quantities of energy are suddenly released. Rockfalls cannot be temporally accurately predicted, but using diverse models we can determine risk zones. Thereby potential rockfall release zones and rockfall motion and run-out zones must be determined. Diverse manners of determining potential rockfall release zones occur in the literature. In this article we checked the possibility of determining potential rockfall release zones and modeling rockfall run-out from lidar data on the test area of Ajdovščina Municipality. Determining rockfall release zones we applied the approach based on the decomposition of slope distribution within geomorphologically homogenous regions; we divided the municipality on the basis of data about bedrock into two regions – we differentiated between lime and flysch. As limit values for rockfall sources we adopted values, defined for comparable parent materials in Swiss by Loye et al. (2009); for flysch zones 46° , for limestone zones 53° . We used Conefall program for determining potential rockfall motion and run-out zones. The model is suitable for use on both regional and local level and is based on the principle of energy line. It defines maximal range where the rockfall can run out and was determined on the basis of field observations of rockfalls (silent witnesses). On the basis of field observations also the angle of the maximal lateral run-out of rocks was determined. We applied angle 32° and $\pm 16^\circ$ for the top of the cone.

In the area of Ajdovščina Municipality we determined 1524 potential rockfall release zones with total area of 102.9 ha . Mean size of the potential rockfall release zone is 260 m^2 . Although the use of lidar data for determining potential rockfall release zones is frequent, it also has deficiencies we met

also at the Ajdovščina Municipality example. We either eliminated some pointless rockfall sources or such method lacked accuracy and we could not embrace all potential sources. It would certainly make sense to take into account available land use maps for determining rockfall release zones, also a preliminary analysis of the relief, where sinkholes occur, would be reasonable. On the other hand, applying the described methodology we certainly “oversaw” a considerable number of potential rockfall release zones, also due to lack of lidar ground points. On the slopes with inclination similar to the limit value of inclination for eliminating potential release zones, on the basis of the tested methodology only larger potential release areas are determined, the smaller ones fall out due to their disunion with the other, larger ones.

On the basis of the Conefall model results we can conclude that in the Ajdovščina Municipality area there are 3379.9 ha of land, where the probability of rockfall motion or run-out is present. Differences between both areas are notable. Data processing is, in terms of processing, lavish on a larger area and requires very capable computer software. 3D simulation of rolling of rock down the slope is an upgrade of the presented modeling of rockfall run-out, but this methodology is even more computer lavish and requires even more time. Therefore it is even more important to determine rockfall release zones accurately. The best solution seems to be the combination of lidar digital relief model use and determination of sources with regard to the limit angle within the geomorphologically homogenous unit and simultaneous field control of eliminated potential zones; it should take place parallelly with field work of district foresters and forest planners. Preparation of rockfall hazard maps should become a mandatory part of forest management plans respectively other spatial plans.

5 ZAHVALA

5 ACKNOWLEDGEMENT

Delo je nastalo v okviru programske skupine P4-0059: Gozd, gozdarstvo in obnovljivi gozdni viri, hkrati z nastajanjem prijave Alpine Space projekta ROCKtheALPS. Avtorja se za nasvete in

predloge pri pripravi prispevka zahvaljujeva dr. Galu Fideju. Za hiter odziv se zahvaljujeva tudi uredništvu Gozdarskega vestnika.

6 VIRI

6 REFERENCES

- ARSO. 2016. Agencija republike Slovenije za okolje. Portal eVode, <http://evode.arso.gov.si/indexd022.html?q=node/12>
- Bossi, G., Cavalli, M., Crema, S., Frigerio, S., Quan Luna, B., Mantovani, M., Marcato, G., Schenato, L., Pasuto, A. 2015. Multi-temporal LiDAR-DTMs as a tool for modelling a complex landslide: a case study in the Rotolon catchment (eastern Italian Alps). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 15: 715–722.
- Brang, P., Schönerberger, W., Frehner, M., Schwitter, R., Thormann, J.-J., Wasser, B. 2006. Management of protection forests in the European Alps: an overview. *Forest Snow and Landscape Research*, 80, 1: 23–44.
- Brilly, M., Mikoš, M., Šraj, M. 1999. *Vodne ujme – varstvo pred poplavami, erozijo in plazovi*. 1. izdaja. Ljubljana, Komisija za tisk Fakultete za gradbeništvo in geodezijo: 186 str.
- Corona, C., Trappmann, D., Stoffel, M. 2013. Parameterization of rockfall source areas and magnitudes with ecological recorders: When disturbances in trees serve the calibration and validation of simulation runs. *Geomorphology*, 202: 33–42.
- Dorren, L. K. A. 2012. Rockyfor3D (v5.0) revealed. Transparent description of the complete 3D rockfall model. EcorisQ paper.
- Dorren, L. K. A., Berger, F., le Hir, C., Mermin, E., Tardif, P. 2005. Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests. *Forest Ecology and Management*, 215: 183–195.
- Dorren, L. K. A. 2003. A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress In Physical Geography*, 27: 69–87.
- Dorren, L. K. A., Domaas U., Kronholm K., Labiouse V. 2011. Methods for predicting rockfall trajectories and run-out zones. *Rockfall engineering*: 143–173.
- ESRI. 2016. ArcMAP 10.4.
- Eysn, L., Hollaus, M., Schadauer, K., Pfeifer, N. 2012. Forest Delineation Based on Airborne LIDAR Data. *Remote Sens*, 4(3): 762–783.
- Guček, M., 2016. Opredelevitev gozdnih območij s poudarjeno varovalno in zaščitno funkcijo, magistrsko delo. Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. Ljubljana, samozal: 130 str.
- Heim, A., 1932. *Bergsturz und Menschenleben*. Beiblatt zur Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, 77: 218.

- Hengxing, L., Derek, M., Chenghu, Z., Chang, H. L. 2010. Rockfall hazard analysis using LiDAR and spatial modeling. *Geomorphology*, 118: 213–223.
- Horvat, A. 2001. Metode določanja erozijsko ogroženih območij, doktorsko delo. Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. Ljubljana, samozal: 194 str.
- Horvat, A., 1996. Ogroženost ceste R 302 Kranjska Gora – Vršič – Bovec zaradi erozije. *UJMA*, 1996, 10: 161–165.
- Jaboyedoff, M. 2003. Conefall 1,0 user's guide: 18 str.
- Kajdiž, P., Diaci, J., Rebernik, J. 2015. Modelling Facilitates Silvicultural Decision-Making for Improving the Mitigating Effect of Beech (*Fagus Sylvatica* L.) Dominated Alpine Forest against Rockfall. *Forests*, 6(6), 2178–2198.
- Kobal, M. 2015. Rockfall monitoring by the combination of lidar and unmanned aerial vehicle technology. V: *EUFORIA : European forest research and innovation area: programme and book of abstracts*. Kraigher H. (ur.). Ljubljana, Slovenian Forestry Institute, Silva Slovenica Publishing Centre: 63.
- Kobal, M., 2014. Ocena lesne zaloge sestojev iz podatkov zračnega laserskega skeniranja površja = Growing stock estimation based on airborne laser scanning data. *Gozdarski vestnik*, 72, 5/6: 249–262.
- Kobal, M., Bertonecelj, I., Pirotti, F., Dakskobler, I., Kutnar, L. 2015. Using lidar data to analyse sinkhole characteristics relevant for understory vegetation under forest cover-case study of a high karst area in the Dinaric mountains. *PLoS one*, 10: 19.
- Kobler, A., Zafrañ, J. 2006. Podatki letalskega lidarskega snemanja in njihova uporaba pri gospodarjenju z gozdom = Aerial lidar data and their application in forest management. V: *Monitoring gospodarjenja z gozdom in gozdnato krajino = Monitoring the management of forests and forested landscapes (Studia forestalia Slovenica)*. Hladnik D. (ur.). Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 83–96.
- Koren, M., 2005. Analiza erozijske ogroženosti turističnih kampov v Zgornjem Posočju, diplomsko delo. Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. Ljubljana, samozal: 89 str.
- Kunc, K., 2008. Vpliv gospodarjenja na stabilnost varovalnih gozdov nad glavno cesto Godovič - Idrija, diplomsko delo. Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. Ljubljana, samozal: 60 str.
- Lopez-Saez, J., Corona, C., Eckert, N., Stoffel, M., Bourrier, F., Berger, F. 2016. Impacts of land-use and land-cover changes on rockfall propagation: Insights from the Grenoble conurbation. *Science of the total environment*, 547: 345–355.
- Loye, A., Jaboyedoff, M., Pedrazzini, A. 2009. Identification of potential rockfall source areas at a regional scale using a DEM-based geomorphometric analysis. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 9: 1643–1653.
- MKGP. 2016a. Grafični podatki RABA za celo Slovenijo: <http://rkg.gov.si/GERK/> (25. 6. 2016)
- MKGP. 2016b. Pedološka karta Slovenije. Služba za Register kmetijskih gospodarstev: <http://rkg.gov.si/GERK/> (25. 6. 2016)
- Noč, M., 2014. Presoja varovalnega učinka gozda pred padajočim kamenjem nad delom Vršičke ceste, diplomsko delo. Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. Ljubljana, samozal.: 50 str.
- Novak, L., 2014. Sestojna zgradba in nevarnost padajočega kamenja v Soteski pri Bohinju, diplomsko delo. Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. Ljubljana, samozal: 107 str.
- Petje, U., Mikoš, M., Majes, B. 2005. Modeliranje gibanja skalnih podorov = Modelling of rockfall motion. *Acta hydrotechnica* 23, 38: 19–37.
- Rak, G., Zupančič, G., Papež, J., Kozelj, D., 2012. Izdelava kart nevarnosti, ranljivosti in ogroženosti zaradi snežnih plazov in padajočega kamenja na odseku Bohinjske proge. *UJMA*, 2012, 25: 130–137.
- Rebernik, J., 2008. Proučevanje vpliva padajočega kamenja v varovalnem gozdu na Ljubelju, diplomsko delo. Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. Ljubljana, samozal: 71 str.
- Skudnik, M., Kušar, G. 2011. Uporaba 3D procesnega modela za določitev gozdov, ki varujejo pred skalnimi podori – primer Kamniške Bistrice (Use of 3D process-based model to determine forests protecting against rockfall-case study Kamniška Bistrica). *Acta geographica Slovenica*, 51-2: 253–276.
- Statistični urad RS, 2016.
- Štampe, S., 2006. Analiza nevarnosti padajočega kamenja v vasi Brezno, diplomsko delo. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerzitetni program vodarstvo in komunalno inženirstvo. Ljubljana, samozal: 89 str.
- Toppe, R. 1987. Terrain models – a tool for natural hazard mapping, *IAHS*, 162, 629–638.
- van Dijke, J. J., van Westen, C. J. 1990. Rockfall hazard, a geomorphological application of neighbourhood analysis with ILWIS, ITC – Publication Number, 1, 40–44.
- Vidmar, P., 2010. Geomorfologija izbranih območij pobočja Trnovskega gozda, diplomsko delo. Univerza na primorskem, Fakulteta za humanistične študije Koper. Koper, samozal: 83 str.
- Zemljič, M. 1972. Erozijski pojavi v Sloveniji. *Gozdarski vestnik*, 30 (8): 233–238.