

SPREMLJANJE SKALNEGA PODORA Z UPORABO DALJINSKO VODENEGA LETALNIKA

SURVEYING OF ROCKFALL AREA USING REMOTELY PILOTED AIRCRAFT SYSTEMS

doc. dr. Milan Kobal, univ. dipl. inž. gozd.

milan.kobal@bf.uni-lj.si

Barbara Žabota, mag. geog.

barbara.zabota@bf.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta,

Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire

Tadej Jeršič, univ. dipl. inž. gozd.

tadej.jersic@apus.si

APUS, varstvo pred erozijo, hudourniki in

plazovi, d. o. o.

Znanstveni članek

UDK 504.4:551.3.053:528.8

Povzetek | Daljinsko vodeni letalniki postajajo splošno uporabljena tehnologija za spremljanje hudourniških in erozijskih procesov predvsem zaradi široke uporabe pridobljenih podatkov ter cenovne dostopnosti. V članku je prikazano spremljanje aktivnosti proženja skalnega gradiva z daljinsko vodenim letalnikom na območju skalnega podora nad vasjo Belca v občini Kranjska Gora. Podorno gradivo je poškodovano in zasulo gozdno cesto, glavčina materiala pa se je oz. se odlaga neposredno nad strugo hudournika Belca in vanjo. Ob nekontroliranem intenzivnem premeščanju materiala v hudournik obstaja nevarnost zamašitve pretočnega profila, kar lahko vodi do preusmeritve vodnega toka ali ojezeritve, ki se lahko razvije v porušitve bregov in v poplavni val. Zato je bilo v decembru 2018 in oktobru 2019 izvedeno miniranje nestabilne hribine. V štirih misijah smo z daljinsko vodenim letalnikom fotografirali območja proženja skalnega podora in iz pridobljenih podatkov izračunali oblak točk ter izdelali digitalne modele površja in ortofote. Za referenčno stanje pred podorom smo uporabili podatke laserskega skeniranja površja Slovenije iz leta 2014. Določili smo območja sprožitve ter ocenili prostornino sproženega materiala in spremembe v višini površja v štirih obdobjih. Primerjali smo razlike v ocenjenih prostorninah med posameznimi zaporednimi snemanji in vmesnimi daljšimi časovnimi obdobji v istih časovnih okvirih.

Ključne besede: skalni podor, daljinsko vodeni letalniki, daljinsko zaznavanje, naravne nevarnosti, hudourniki, erozija

Summary | Remotely piloted aircraft systems (RPAS) are becoming an increasingly common technology for monitoring torrential and erosion processes, mainly due to the widely used acquired data and their increasing affordability and semi-automatic control of flying. The paper presents monitoring of erosion processes with RPAS on the case of rockfall event above the village Belca in the municipality of Kranjska Gora. Material from the rockfall damaged the forest road, and it is depositing directly above and into the torrent Belca. In case of uncontrolled transportation of material into the riverbed of the torrent, there might be a risk of river blockage which could lead to the diversion of water flow or formation of temporal lake and further result in the erosion of riverbanks and/or in a flood wave. Therefore, controlled blasting of the potential rockfall release area was conducted on the 5th of December 2018 and on the 15th of October 2019. In four missions a survey of potential rockfall release area using RPAS was performed. Based on the obtained images, point clouds were calculated, as well as digital surface models and orthophotos. For

the reference state, which represented the state of the surface before the rockfall events, laser scans for Slovenia from 2014 were used. Based on the obtained data, rockfall release areas were determined, and the volume of the displaced material and the height changes in the surface were estimated. Moreover, we also compared the differences in the estimated volumes between successive RPAS surveys and surveys over the larger periods in the same time frames.

Key words: rockfall, remotely piloted aircraft systems, remote sensing, natural hazards, torrents, erosion

1 • UVOD

Skalne podore opredeljujemo kot odlome in gibanje posameznih skal (kamenje in bloki) kot tudi skalne mase, ki lahko razpadejo na posamezne bloke (Petje, 2005a). Zaradi različnega dosega, velikih kinetičnih energij, ki jih pri tem dosežejo, in nepredvidljivega časovnega pojavljanja predstavljajo veliko nevarnost za infrastrukturo in človeška življenja (Petje, 2005b). Ob nastanku skalnega podora namreč ni časa za dodatne zaščitne ukrepe, ki bi lahko dogodek preprečili oziroma omilili njegov negativni vpliv na okolico ((Dorren, 2007), (Volkwein, 2011)). Ker je časovno napovedovanje pojavljanja skalnih podorov izredno zahtevno oziroma nemogoče, je treba območja potencialne nevarnosti ustrezno spremljati in zagotoviti ustrezne preventivne ukrepe, s katerimi lahko tovrstne dogodke preprečimo ali vsaj omilimo njihov učinek ((Petje, 2005c), (Petje, 2006), (Abbruzzese, 2009)).

V zadnjem desetletju se povečuje uporaba daljinsko vodenih letalnikov za zajem prostorskih podatkov na različnih področjih, in sicer zaradi (Sotier, 2015):

- i) avtomatiziranega načina zajema podatkov,
- ii) zajema podatkov visokih prostorskih ločljivosti in
- iii) pestrega nabora programskih orodij, ki omogočajo poenostavljen postopek obdelave zajetih posnetkov.

Zaradi manjšega časovnega in finančnega vložka za zajem podatkov nam v primerjavi s

klasičnimi terenskimi metodami zajema daljinsko vodeni letalniki omogočajo tudi višjo časovno ločljivost podatkov, s čimer izboljšamo spremljanje časovnega razvoja določenega pojava (npr.: (Kobal, 2015), (Sotier, 2015), (Car, 2016), (Buil, 2016), (Gomez, 2016), (Peternel, 2017)). Pri tem je treba upoštevati še dejstvo, da so erozijska in hudourniška območja pogosto na težko dostopnih območjih (npr. ozke doline, strme skalne stene ipd.), ki so hkrati tudi nevarna za terensko delo. Z daljinsko vodenimi letalniki pa lahko taka območja/objekte posnamemo brez izpostavljanja nevarnosti terenske skupine.

Uporaba daljinsko vodenih letalnikov nam na področju spremljanja erozijske in hudourniške dejavnosti omogočajo ocenjevanje nestabilnih delov pobočja, spremljanje hitrosti erozije, ocenjevanje vertikalnih in horizontalnih pomikov, ocenjevanje količin odlomljenih skalnih blokov, ocenjevanje škode na vegetaciji in infrastrukturi ipd. (Kobal, 2015), (Sotier, 2015), (Giordan, 2015), (Car, 2016), (Buil, 2016), (Fink, 2018), (Žabota, 2018), (Kobal, 2019)).

Pri cikličnih snemanjih obstaja več izvorov napak in negotovosti, ki se lahko odražajo v razlikah v spremembi površja in ocenjeni prostornini. Eden izmed virov je lastnost opreme, ki jo uporabljamo, kar zajema vse od tipa in kakovosti fotoaparata na brezpilotnem letalniku, pozicijsko natančnost talnih oslonilnih točk med posameznimi snemanji in njihovo

prostorska razporeditev do drugih sistemskih napak. Pri razgibanem reliefu (kot so območja skalnih podorov) lahko do napak oziroma razlik v ocenah prostornine prihaja zaradi večje hrapavosti površja, prepletanja z vlažnimi oz. suhimi območji, območji z vegetacijo in sencami in brez njih; te se lahko pojavljajo zaradi npr. vegetacije ali konfiguracije reliefa. Rezultat snemanja takega reliefa se odraža v tem, da so v nekaterih območjih oblaki točk gostejši oziroma redkejši. Pomemben vir negotovosti in napak so tudi način snemanja, območje snemanja, višina snemanja, število in kot zajetih fotografij ter večje/manjše prekrivanje fotografij (povzeto po (Brodu, 2012), (Jaboyedoff, 2012), (Lauge, 2013), (Michoud, 2014), (Passalacqua, 2015), (James, 2017a), (James, 2017b), (Kasprzak, 2018), (Nourbakhshbeidokhti, 2019)).

V prispevku je prikazano spremljanje dinamike skalnega podora Belca z daljinsko vodenim letalnikom z namenom spremljanja krušenja količine skalnega gradiva. Območje skalnega podora je bilo posneto v štirih ločenih obdobjih (misijah), pri tem smo:

- a) določili območja proženja materiala,
- b) ocenili spremembo v višini,
- c) ocenili količino porušenega gradiva med posameznimi misijami ter
- d) primerjali oceno količine porušenega gradiva med posameznimi misijami z oceno z daljšimi časovnimi obdobji z namenom ugotavljanja razlik v izračunu prostornine materiala istih območij.

triasa (karnij), ki jih sestavlja sivi dolomit, v katerem se pojavljajo razpoke, ki potekajo pravokotno na plastovitost. Kamninske plasti vpadajo proti severu (Geotrias, 2018).

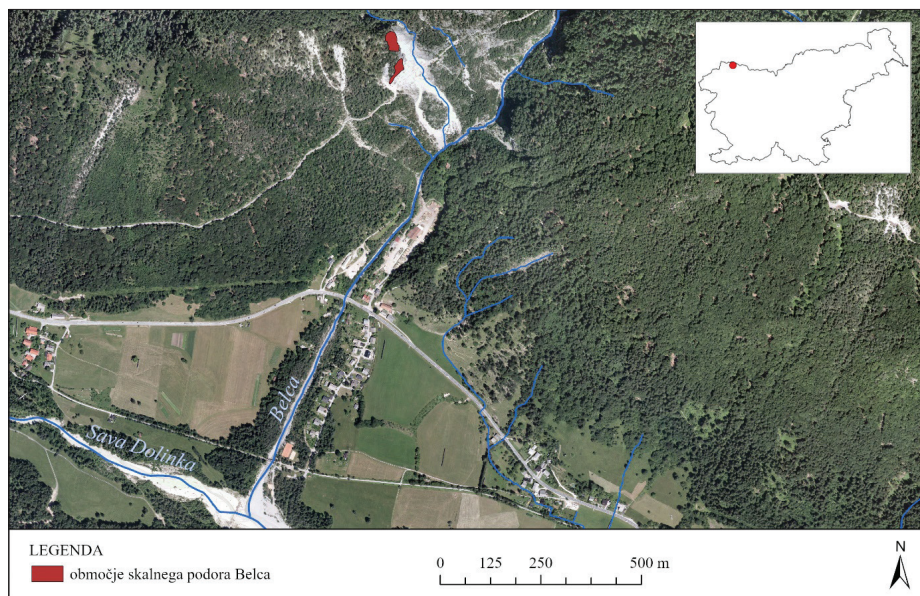
V obdobju zadnjih štirih let sta se zgodila dva večja dogodka, ki sta popolnoma zaprla gozdno cesto: 4. septembra 2014 in 4. februarja 2018. Po dogodku leta 2014 so gozdno cesto očistili in popravili, v letu 2018 pa so v

2 • PODOR BELCA IN METODE OPAZOVANJA

2.1 Opis območja

Proučevani skalni podor se nahaja v severozahodnem delu Slovenije nad naseljem Belca v občini Kranjska Gora in se odlaga na desno brežino hudournika Belca (slika 1). Hudournik se ob koncu naselja izteka v Savo Dolinko. Ob-

močje sprožitve skalnega izvora je nad gozdno cesto Belca–Jepca, imenovanega Štenge, kjer se večje ali manjše proženje skalnega materiala pojavlja že od začetka gradnje gozdne ceste naprej (60. leta 20. stoletja). Proučevano območje sestavljajo kamnine zgornjega



Slika 1 • Lokacija odloma skalnega podora Belca (ortofoto posnetek: GURS, 2014).

občini Kranjska Gora zaradi velike nevarnosti ponovne porušitve ali premika celotnega skalnega bloka sprejeli odločitev, da sanacija gozdne ceste ni možna, ter pričeli izdelavo projektne dokumentacije za novo gozdno cesto, ki izvirno območje obide. V postopku sanacije skalnega podora Belca so 5. decembra 2018 in 15. oktobra 2019 izvedli miniranje na potencialnem območju proženja, s čimer so želeli preprečiti nenadzorovano porušitev večje količine hribine.

Zaradi odložitve podornega materiala nad strugo hudournika Belca je potreben monitoring aktivnosti potencialne podorne aktivnosti in premeščanja že odloženega materiala v strugo hudournika Belca. V primeru, da se v strugo odloži večja količina podornega materiala, se lahko pojavi sprememba toka struge in s tem pojav poplavne nevarnosti tam, kjer je sicer ni pričakovati. Če pa se pretočni profil popolnoma zamaši, to predstavlja močno motnjo odtočnih razmer, kar lahko vodi do ojezeritve, porušitve bregov in v poplavni val. Takšna nenadna sprostitvev odtoka lahko vodi do poplavnega vala, ki je lahko znatno večji od največjega zabeleženega odtoka. V tem primeru je lahko pomembno ogroženo celotno naselje Belca (Kostevc, 2018).

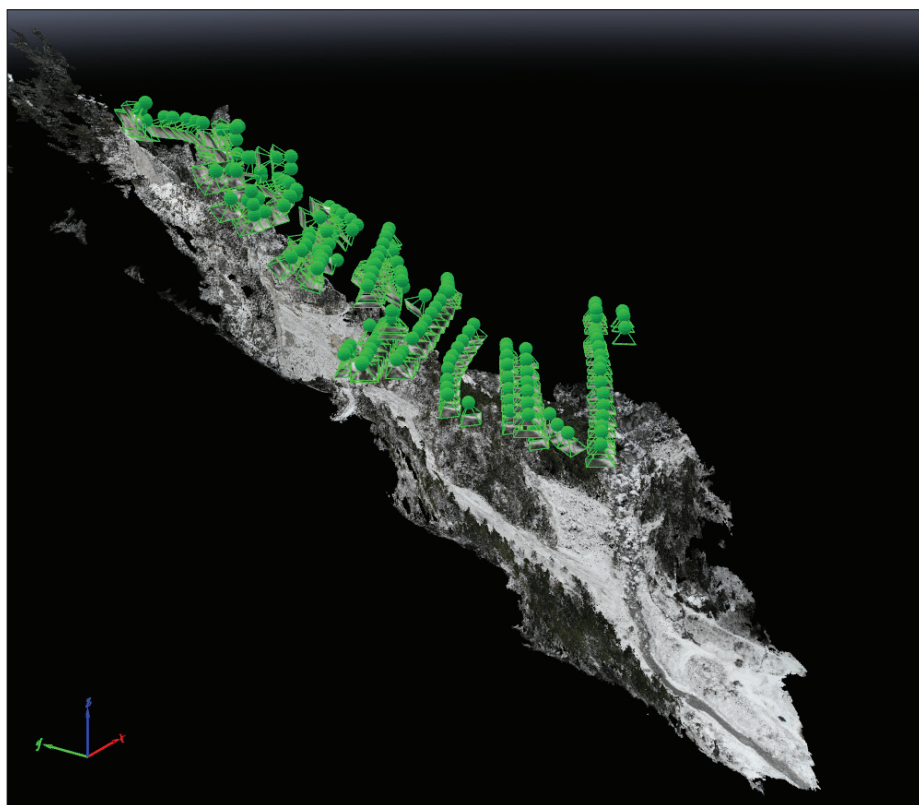
Tovrstni dogodek se na območju naselja Belca ne bi zgodil prvič, saj se je podoben dogodek zgodil že leta 1953, ko je hudournik razdeljal širše območje spodnjega toka, lesni obrat, cestni in železniški most ter preusmeril vlak proti naraslim vodam Save (Pintar, 1977). Nazadnje je do podobnega dogodka prišlo 30. oktobra 2018 po krajšem intenzivnem ob-

dobju deževja (315 mm padavin v treh dneh (ARSO, 2018)), ko je na območju skalnega podora prišlo do nove porušitve ter spiranja drobnejšega podornega gradiva s pobočja v narasel hudournik Belca. Premeščeno skalno gradivo skupaj z gradivom iz zaledja hudournika se je odložilo na območju do mostu v naselju Belca, pri čemer je zasulo bližnja

gospodarska objekta (žago in malo HE), iz bližnje ležečih stanovanjskih objektov pa je bilo preventivno evakuiranih 36 prebivalcev.

2.2 Zajem zračnih posnetkov, izdelava 3D-oblake točk in določitev območja proženja

Na območju skalnega podora smo snemanja z daljinsko vodenim letalnikom DJI Mavic Air (fotoaparati FC2103_4.5_4056x3040) opravili: 3. 7. 2018, 15. 11. 2018, 14. 12. 2018 (po prvem miniranju; slika 2) in 18. 10. 2019 (po drugem miniranju). Območje proženja skalnega podora smo fotografirali s poševnimi posnetki pod kotom 45°, območje premeščanja in delno odlaganja skalnega podora nad strugo pa z nadirnimi posnetki. Snemanja v primeru tega članka so bila izvedena ročno, brez določenega plana višine letenja, območja zajema in števila zajema fotografij. Talne oslonilne točke (slika 3) smo posneli z GNSS-sprejemnikom Leica Zeno 20 in Leica GG04 Smart Antenna, ki omogoča zajem lokacij s centimetrsko natančnostjo. Posamezno točko smo snemali v intervalu 30 sekund, jo zajeli dvakrat, v časovnem presledku treh ur, končno lokacijo talne oslonilne točke pa smo izračunali kot povprečje obeh zajetih lokacij. Za zajem lokacij smo uporabili državni koordinatni sistem D96. Oblake točk smo iz zračnih



Slika 2 • Primer oblaka točk z lokacijami odvzetih posnetkov (snemanje: 14. december 2018).

Misija	x (m)	y (m)	z (m)
3. 7. 2018 (7 GCP)	0,010	0,020	0,017
15. 11. 2018 (9 GCP)	0,021	0,021	0,067
14. 12. 2018 (8 GCP)	0,066	0,036	0,093
18. 10. 2019 (12 GCP)	0,011	0,012	0,031

Preglednica 1 • Točnost (RMSE) georeferenciranja vseh snemanj, ki so bila izvedena v štirih misijah. RMSE je skupen rezultat natančnosti meritev z GNSS, višine leta ter napak pri procesu dodajanja lokacij fotografijam.

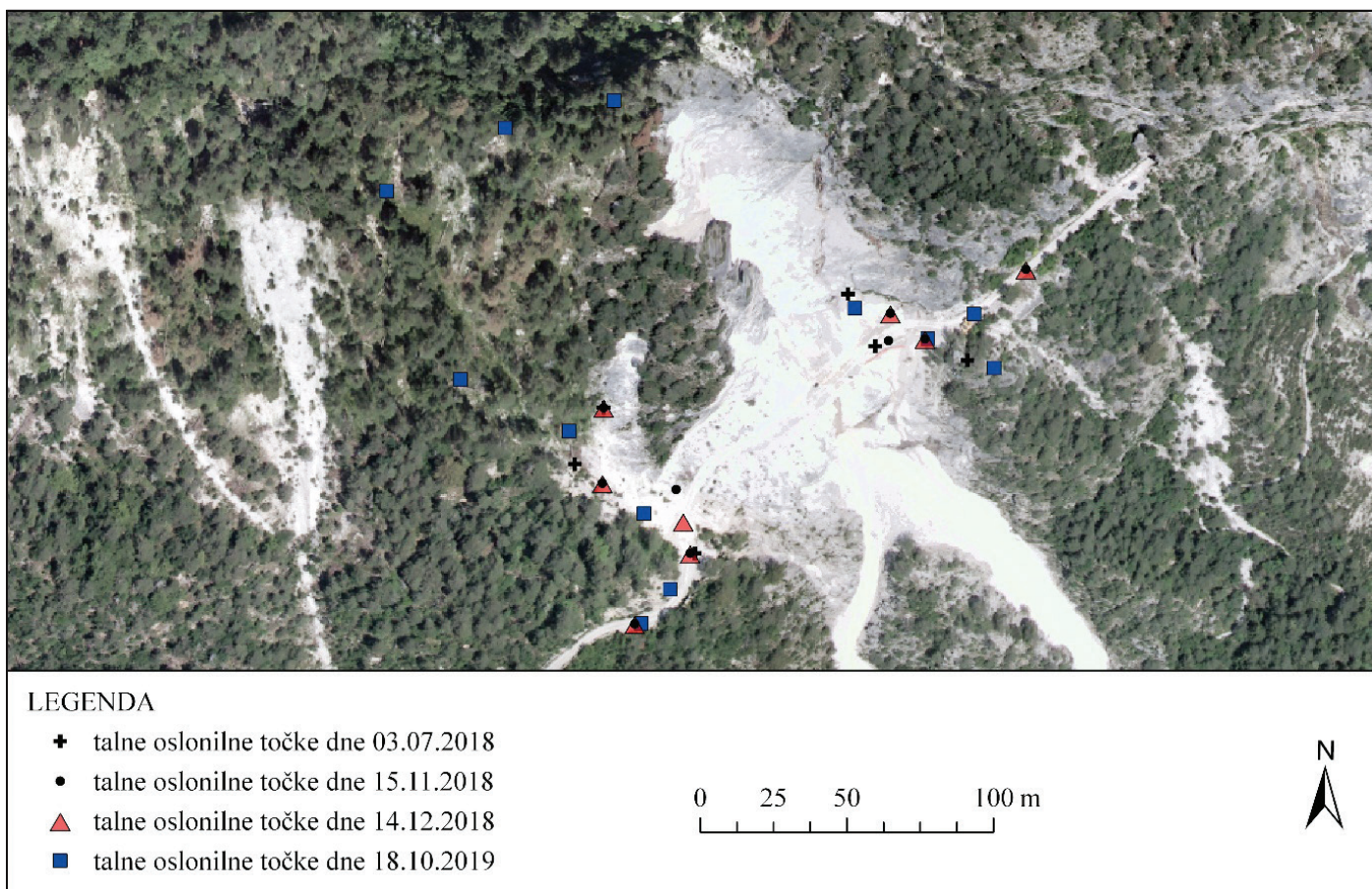
posnetkov izdelali v programu Pix4DMapper (Pix4D Mapper, 2018). Iz posnetkov smo izdelali oblake točk z različnimi gostotami in ortofoto. Natančnost georeferenciranja vseh snemanj je prikazana v preglednici 1.

Čeprav smo oblake točk različnih snemanj georeferencirali, smo jih v programu CloudCompare (CloudCompare, 2018) poravnali na isto ravnino, in sicer z uporabo orodja Fine Registration (ICP) ((Besl, 1992), (Zhang, 1994)). T. i. referenčni oblak v procesu poravnave služi za osnovo poravnave, medtem ko se bo t. i. registrirani oblak iterativno premaknil glede na referenčni oblak. Za transformacijo oblakov točk uporabimo le tiste dele

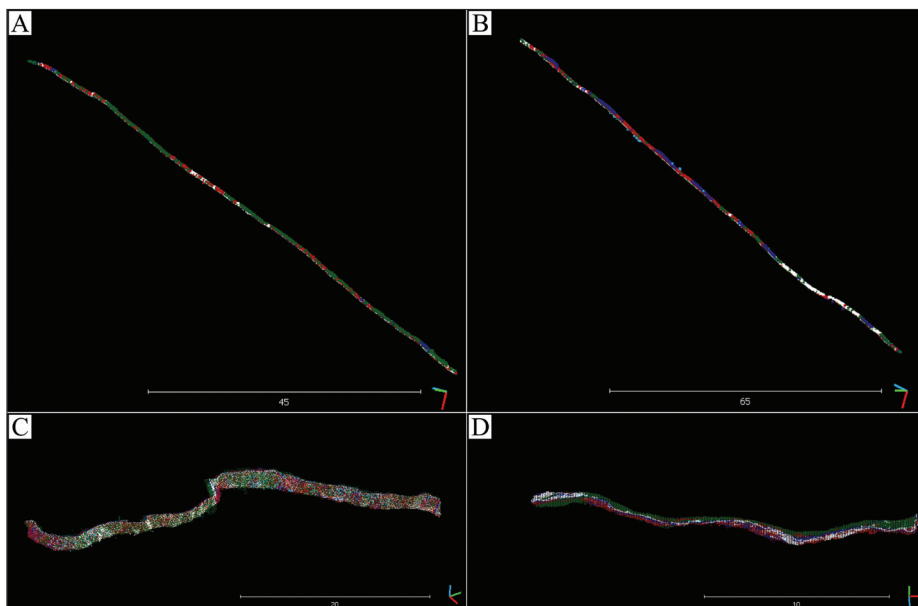
oblakov točk, ki so pri obeh oblakih točk, ki ju primerjamo, enaki. V primerih, ko pa želimo izvesti poravnavo dveh oblakov točk, kjer se posamezni deli območja izrazito razlikujejo, v našem primeru so bila to območja proženja skalnega podora, orodje omogoča uporabo funkcije zavračanja oddaljenih korespondenčnih točk (Enable farthest point removal). Tako so v tem primeru v procesu poravnave točke iz registriranega oblaka, ki so preveč oddaljene od referenčnega oblaka točk, odstranjene iz procesa poravnave. Kot referenčni oblak je bil vedno izbran oblak točk reliefa (OTR), ki je rezultat laserskega skeniranja površja Slovenije leta 2014 (Bric,

2015), ki je vseboval samo točke, ki so bile klasificirane kot tla (GURS, 2014). Registrirani oblaki točk pa so v procesu bili oblaki točk iz različnih obdobj snemanj (3. 7. 2018, 15. 11. 2018, 14. 12. 2018, 18. 10. 2019). Uspešnost registracije oblakov točk je prikazana na sliki 4.

Območja proženja za posamezno misijo smo določili iz vidne primerjave ortofotov (slika 5), sprememb v višini (uporaba digitalnega modela reliefa – DMR) ter senčenega reliefa med misijami, in sicer v programskem orodju ArcGIS Pro 2.3.3 (ArcGIS Pro 2.3.3, 2018), kjer smo na podlagi vizualne interpretacije ustvarili poligone, ki določajo mesta porušitve. Spremembe višine reliefa ter količini porušenega gradiva med posameznimi misijami smo ocenili le znotraj tega poligona, točke zunaj poligona pa smo zanemarili. Tako smo pri izračunih upoštevali le površine, kjer je prišlo do dejanske porušitve, in s tem upoštevali izključno talne točke v fotogrametričnem oblaku točk, saj na območju, kjer je prišlo do porušitve, vegetacije ni bilo več prisotne. V primeru spremljanja spremembe na celotnem posnetem območju, in ne le na mestu



Slika 3 • Lokacije talnih oslonilnih točk za posamezna snemanja na območju skalnega podora Belca.



Slika 4 • Prikaz dveh prečnih (A- in B-primer) in dveh vzdolžnih prerezov (C- in D-primer) vseh oblakov točk na območjih (laserski oblak točk svetlo modra barva, 3. 7. 2018 rdeča barva, 15. 11. 2018 temno modra barva, 14. 12. 2018 bela barva ter 18. 10. 2019 zelena barva), kjer ni prišlo do sprememb v površju na območju skalnega podora Belca. Merska skala na slikah je v metrih. Uspešnost registracije oblakov točk glede na laserski oblak točk iz leta 2014 je bila naslednja: 3. 7. 2018 – RMSE = 0.12, 15. 11. 2018 – RMSE = 0.12, 14. 12. 2018 – RMSE = 0.12, 18. 10. 2019 – RMSE = 0.13.

porušitve, bi imeli točke v fotogrametričnem oblaku točk predvsem na vrhu vegetacije. To pa predstavlja težavo pri klasifikaciji oblaka

točk in posledično izdelavi DMR, kar bi posledično vodilo v precenjene vrednosti obeh izračunov.

2.3 Izračun sprememb v višini in količine sproženega materiala

Spremembe v višini smo izračunali v programu CloudCompare (CloudCompare, 2018) z uporabo orodja *Cloud/Cloud Distance*. Prostornino sproženega materiala smo ocenili z uporabo metode primerjave oblakov točk v istem programu, ki nam prikaže pozitivne oz. negativne spremembe v površju v obliki spremembe višine; pozitivne vrednosti prikazujejo območja akumulacije materiala, negativne vrednosti prikazujejo območja erozije (Girardeau-Montaut, 2005). Primerjava dveh oblakov točk spada med najbolj natančne metode ocenjevanja razlik v razdaljah med dvema površjema in s tem ocenjevanja erozijskih procesov ((Lague, 2013), (Nourbakhshbeidokhti, 2019)). Prostornino sproženega materiala smo izračunali na podlagi razlik višin v oblakih točk za posamezno območje proženja in za posamezno zaporedno časovno obdobje snemanja ter za daljše časovne preseke. Izračunali smo jo v programu CloudCompare z uporabo orodja Volume calculation, kjer smo v prvem koraku za vsako obdobje snemanja izdelali DMR s prostorsko ločljivostjo 1×1 m in v naslednjem koraku izračunali prostornino porušenega materiala.

3 • REZULTATI

Fotogrametrični oblaki točk (slika 5) prikazujejo dinamiko spreminjanja območja skalnega podora med štirimi misijami snemanja območja.

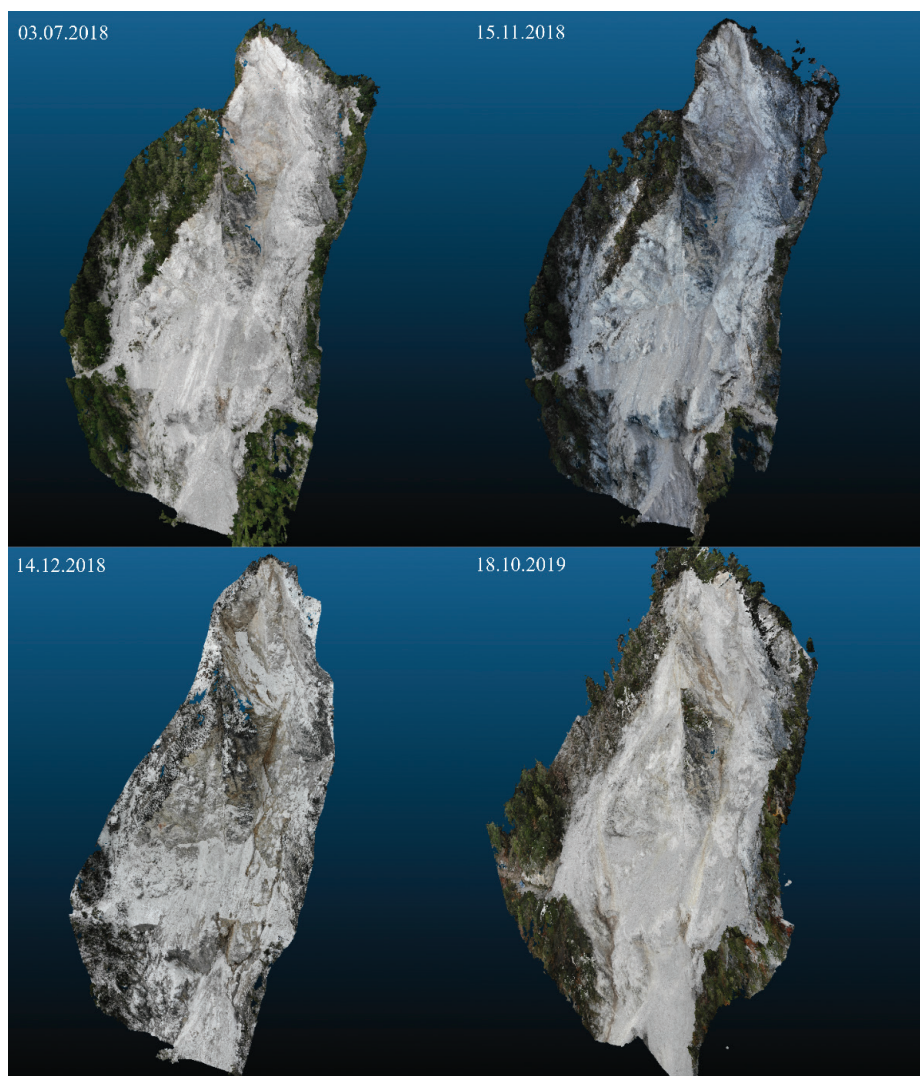
Po površini največje območje proženja je nastalo ob zadnjem miniranju (18. 10. 2019), kjer se je material odlomil na dveh območjih s skupno površino 3147 m^2 . Območje proženja na dveh območjih je nastalo tudi po misiji julija 2018 – površina obeh območij proženja je skupno znašala 1822 m^2 . Samo eno območje proženja je nastalo pri ostalih dveh misijah, in sicer s površino 170 m^2 (misija, november 2018) in 913 m^2 (misija, december 2018).

Slika 6 prikazuje označena območja proženja skal med posameznimi misijami. Na podlagi razlik v površju med letom 2014 in prvo misijo (3. 7. 2018) ugotovimo, da je v tem obdobju (predvsem po 4. 2. 2018) prišlo do porušitve 29.712 m^3 skalnega gradiva, in sicer 20.280 m^3 na prvem odlomnem mestu in 9432 m^3 na drugem. Na območju prvega odlomnega

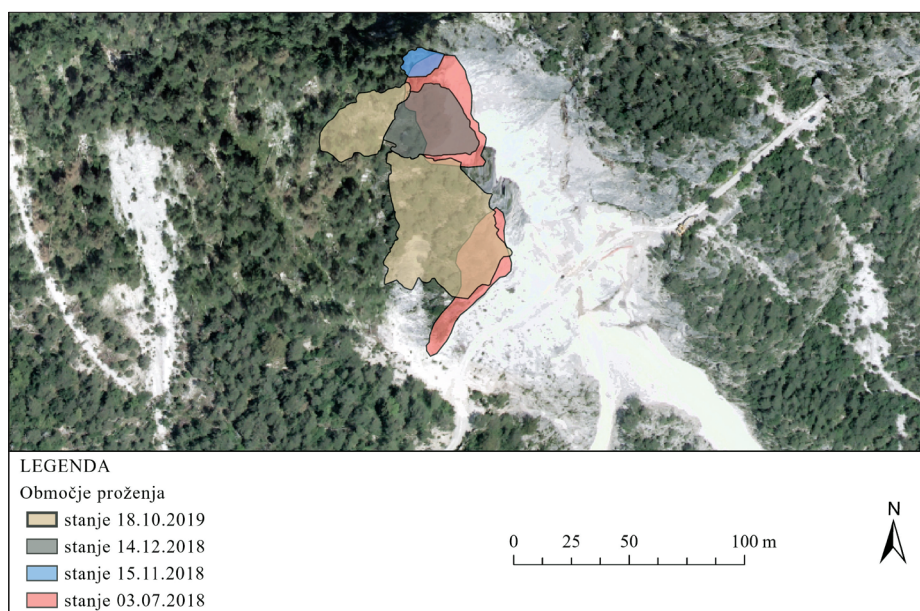
mesta se je v povprečju nadmorska višina znižala za $18,1 \text{ m}$ (največ za $44,1 \text{ m}$), na mestu drugega odloma pa v povprečju za $12,6 \text{ m}$

Misija				
0 4/4/14	A 7/3/18	B 11/15/18	C 12/14/18	D 10/18/19
29.712 m ³ (OA)				
	1.097 m ³ (AB)			
		10.558 m ³ (BC)		
			20.960 m ³ (CD)	
	30.794 m ³ (OB)			
		11.631 m ³ (AC)		
			31.511 m ³ (BD)	
		41.238 m ³ (OC)		
			32.584 m ³ (AD)	
				62.058 m ³ (OD)

Preglednica 2 • Primerjava izračunov prostornine med posameznimi časovnimi obdobji (stanje 0 – lasersko skeniranje površja iz leta 2014, A – 3. 7. 2018, B – 15. 11. 2018, C – 14. 12. 2018, D – 18. 10. 2019).



Slika 5 • Fotogrametrični oblak točk vseh štirih snemanj.



Slika 6 • Območja proženja po posameznih obdobjih snemanja; kartografska podlaga: GURS, 2014.

(največ za 31,4 m). Količina materiala, ki se je sprožila med prvo in drugo misijo (november 2018) je bila manjša in je znašala 1097 m³. Pri tem se je v povprečju nadmorska višina znižala za 9,2 m (največ za 23,2 m). V obdobju med drugo in tretjo misijo (december 2018) je prišlo do porušitve 10.558 m³ materiala, pri čemer se je nadmorska višina površja v povprečju znižala za 12,2 m (največ za 33,6 m). V obdobju med tretjo in četrto misijo (oktober 2019) ocenjena količina sproženega materiala znaša 20.960 m³, in sicer 3540 m³ na območju prvega odlomnega mesta ter 17.770 m³ na območju drugega odlomnega mesta. V povprečju se je na območju prvega odlomnega mesta nadmorska višina znižala za 6,4 m (največ za 22,6 m), na območju drugega odlomnega mesta pa 8,1 m (največ za 19,0 m).

Preglednica 2 prikazuje spremembe v izračunu prostornine med stanjem iz leta 2014 (podatki laserskega skeniranja) ter različnimi časovnimi obdobji snemanja skalnega podora (3. 7. 2018, 15. 11. 2018, 14. 12. 2018 in 18. 10. 2019). Skupno se je od leta 2014 do oktobra 2019 porušilo približno 62.000 m³ materiala.

4 • DISKUSIJA

Uporaba daljinsko vodenih letalnikov na področju proučevanja nevarnosti, tveganja in upravljanja hudourniškega in erozijskega delovanja postaja vedno bolj pogosta (npr. (Al-Rawabdeh, 2017), (Seier, 2017), (Obanawa, 2018), (Giordian, 2020)) predvsem zaradi večje cenovne dostopnosti ter polavtomatiziranega sistema upravljanja in enostavnejše izdelave fotogrametričnih izdelkov, primerne za širše uporabnike ((Giordan, 2015), (Gomez in Purdie, 2016)). V prispevku je predstavljena uporaba daljinsko vodenih letalnikov za spremljanje hudourniškega in erozijskega delovanja na primeru skalnega podora Belca. Prikazali smo, da je z njihovo uporabo preko oblaka točk mogoče določevati območja proženja materiala in količino porušenega skalnega gradiva med posameznimi dogodki porušitve in izračunati spremembe v višini površja na območju proženja skalnih podorov.

Prostornino sproženega materiala smo izračunali na dva načina, in sicer med posameznimi časovnimi obdobji dogodkov ter med daljšimi časovnimi obdobji brez vmesnih korakov, ter primerjali, kakšne razlike nastanejo pri izračunih. Ugotovili smo, da je količina ocenjenega porušene prostornine materiala med obema načinoma izračuna primerljiva in da so razlike med posameznimi časovnimi obdobji in načini izračuna minimalne (do 2,9%). Do večjih razlik v izračunih bi prišlo v primerih, če pri izračunu spremembe količine materiala med obdobji ne združimo oblakov točk iz zaporednih obdobji snemanj, temveč uporabimo le samostojne oblake točk (ni prikazano v rezultatih). Glavni vzrok je v tem, da zajeta območja snemanja med posameznimi območji niso bila enaka. Do največjih razlik bi prišlo predvsem zaradi zadnjega opazovanega obdobja (18. 10. 2019), saj je v tem primeru prišlo do sprožitve materiala na območjih, ki pri prejšnjih misijah niso bila zajeta v celoti. Posledično nastajajo

večje razlike tudi tam, kjer je oblak točk redkejši oziroma točke manjkajo.

Da bi bila posneta območja med posameznimi obdobji čim bolj primerljiva, bi to lahko dosegli z avtomatiziranim načinom zajema podatkov, kjer bi v vseh obdobjih zajeli podatke na isti površini. Slednje pri naši študiji ni bilo dosledno, saj v začetku snemanja nismo predvideli obsega območja proženja v dosegu, kot je bil v primeru zadnjega miniranja. Posledično je pri vsakem snemanju zajeto različno območje potencialnega območja proženja. Priporočena je še enakomerna in enako številna razporejenost talnih oslonilnih točk, saj lahko te ključno vplivajo na napake ocene prostornine. Pri prvih treh snemanjih so bile točke razporejene samo pod skalno steno, število le-teh pa se je razlikovalo med posameznimi snemanji. V primeru zadnjega snemanja smo točke postavili tudi nad skalno steno, kar izboljša lokacijsko natančnost tega dela oblaka točk. Razporejenost talnih oslonilnih točk je bila največja šibkost naše študije, slabša razporejenost le-teh pa je posledica aktivnosti proženja skalnega podora, zaradi česar je bila postavitve točk neposredno nad in pod območjem proženja nevarna. Šele po zadnjem miniranju, ko so bili najbolj nestabilni skalni bloki odstranjeni, smo talne oslonilne točke postavili tudi nad območje proženja, medtem ko je postavitve pod skalno steno (zasuta gozdna cesta) še zmeraj izredno nevarna.

Verjetno pa največjo omejitev uporabe daljinsko vodenega letalnika tudi pri spremljanju območja proženja skalnega podora predstavlja vegetacija (npr. visoka trava, grmovnice, drevesa) na mestu proženja. Pri fotogrametričnem oblaku točk dobimo le odboje na vrhu rastja, pod vegetacijo pa ne (Triglav Čekada, 2017). Tako je tudi klasifikacija talnih točk fotogrametričnega oblaka točk nesmiselna, saj s tem težave

izdelave DMR ne odpravimo. V Sloveniji imamo to prednost, da imamo podatke aerolaserskega skeniranja na voljo za celotno državo, kjer imamo klasificirane talne točke in imamo tako idealno podlago za spremljanje masnih premikov, predvsem skalnih podorov, saj vegetacije na območju skalnih klifov običajno ni. Pri njih po porušitvi namreč ostane le živa skalna podlaga, in tako ni problemov zaradi zastora tal zaradi vegetacije pri uporabi fotogrametrije. Težavnejša pa je uporaba fotogrametrije za spremljanje preostalih masnih premikov (npr. zemeljski plazovi, drobirski tokovi), kjer pride do premika tako zemljine kot tudi vegetacije tako na mestu izvora kot na mestu odlaganja.

Ena izmed glavnih prednosti uporabe daljinsko vodenih letalnikov pri spremljanju tovrstnih pojavov je ta, da nam omogočajo višjo časovno ločljivost podatkov o spremembah v površju (npr. (Esposito, 2017), (Rossi, 2018)), s tem pa posledično bolj natančno spremljanje intenzitete hudourniškega in erozijskega delovanja. Tako lahko pravočasno izvedemo ukrepe, ki bodo zmanjšali verjetnost za nastanek večjega dogodka, in lahko preprečimo večjo materialno škodo, ki ga pojav lahko povzroči. V primeru izrednih dogodkov jih lahko uporabimo za ocenitev škode, za načrtovanje reševanja ter sanacije povzročene škode in ocenitve nadaljnje aktivnosti pojava (npr. (Sotier, 2015), (Gomez, 2016)).

Še zmeraj pa se na terenu spoprijemamo s številnimi izzivi, ki otežujejo postopek zbiranja podatkov. Za najbolj zahtevni del spremljanja skalnih podorov z daljinsko vodenim letalniki sta se izkazali postavitve in izmera talnih oslonilnih točk. Gre za časovno zahteven postopek postavljanja točk in iskanja primernih lokacij, še posebej na večjih podorih, kot je npr. Belca. Na območju ozkih dolin ali odmaknjenih območjih se pogosto spoprijemamo s težavo slabega GNSS-signala, omejenostjo z letenjem v vidni liniji ter določanjem primernih območij za pristajanje oz. vzletanje daljinsko vodenega letalnika.

5 • ZAHVALA

Raziskava je bila opravljena v okviru financiranja projektov Interreg območja Alp, in sicer ROCKtheALPS (ASP 462) in GreenRisk4ALPS (ASP 635).

6 • SEZNAM LITERATURE

- Abbruzzese, J. M., Sauthier, C., Labiouse, V., Considerations on Swiss methodologies for rock hazard mapping based on trajectory modelling, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9: 1095–1109, 2009.
- Al-Rawabdeh, A., Moussa, A., Foroutan, M., El-Sheimy, N., Habib, A., Time Series UAV Image-Based Point Clouds Landslide Progression Evaluation Applications. *Sensors*, 17 (2378): 1–22, 2017.
- ArcGIS Pro 2.3.3, Esri Inc., <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/resources>, 2018.
- ARSO, Vremenski podatki avtomatskih postaj v Sloveniji, <https://www.si-vreme.com/si/slovenija/vreme/avtomatske-postaje>, 2018.
- Besl, P. J., McKay, N. D., A method for registration of 3-d shapes, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 14 (2): 239–589, 1992.
- Bric, V., Berk, S., Oven, K., Triglav Čekada, M., Aerofotografiranje in aerolasersko skeniranje Slovenije, Ljubljana, Geodetski inštitut Slovenije: 71 str., 2015.
- Brodu, N., Lague, D., 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 68: 121–134, 2012.
- Buil, F., Nú ez-Andrés, M. A., Lantada, N., Prades, A., Comparison of Photogrammetric Techniques for Rockfalls Monitoring, *World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium, WMES 2016, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 44 (042023): 1–7, 2016.
- Car, M., Jurić Kačunić, D., Linrić, L., Volume measurements of rockfalls using Unmanned Aerial Vehicles, *CETRA 2016, 4th International Conference on Road and Rail Infrastructure*, 9 str., 2016.
- CloudCompare, 3D point cloud and mesh processing software, <https://www.danielgm.net/cc/>, 2018.
- Dorren, L., Berger, F., Jonsson, M., Krautblatter, M., Mölk, M., Stoffel, M., Wehrli, A., State of the art in rockfall – forest interactions, *Schweiz Z Forstwes*, 6: 128–141, 2007.
- Esposito, G., Mastorocco G., Salvini, R., Oliveti, M., Starita, P., Application of UAV photogrammetry for multi-temporal estimation of surface extent volumetric excavation in the Sa Pugada Bianca open-pit mine, Sardinia, Italy, *Environmental Earth Sciences* 76 (103): 1–16, 2017.
- Fink, U., Spremljanje hudourniških in erozijskih procesov v prostoru in času – primer Belega potoka v Trenti, Diplomsko delo, Ljubljana, Biotehnična fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 43 str., 2018.
- GeoTrias, družba za geološki inženiring, d. o. o., Apus, d. o. o., 240- TB/2018, Inženirskogeološke razmere na območju predvidene gozdne ceste GC 020360 Belca – Jepca, občina Kranjska Gora, z oceno erodibilnosti terena, določitvijo omilitvenih ukrepov in oceno vpliva na vodni vir, Geološko poročilo k projektu PZI Odprava škod po neurju na gozdni cesti Belca – Jepca. Ljubljana, oktober 2018: 17 str., 2018.
- Giordan, D., Adams, M. S., Aicardi, I., Alicandro, M., Allasia, P., Baldo, M., De Berardinis, P., Dominici, D., Godone, D., Hobbs, P., Lechner, V., Niedzielski, T., Piras, M., Rotillio, M., Salvini, R., Sefor, V., Sotier, B., Troilo, F., The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for engineering geology applications, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 45 str., 2020.
- Giordan, D., Manconi, A., Facello, A., Baldo, M., dell'Anese, F., Allasia, P., Dutto, F., Brief Communication: The use of an unmanned aerial vehicle in a rockfall emergency scenario, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15, 163–169, 2015.
- Girardeau-Montaut, D., Roux, M., Marc, R., Thibault, G., Change detection on point clouds data acquired with a ground laser scanner. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36: W19, 2005.
- Gomez, C., Purdie, H., UAV-based Photogrammetry and Geocomputing for Hazards and Disaster Risk Monitoring – A Review, *Geoenvironmental Disasters*, 3 (23): 1–11, 2016.
- GURS, Geodetska uprava Republike Slovenije, Lidar podatki po listih v projekciji D96TM, http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas_voda_Lidar@Arso, 2014.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M. -H., Loye, A., Metzger, R., Pedrazzini, A., Use of LIDAR in landslide investigations: a review, *Natural Hazards*, 61: 5–28, 2012.
- James, M. R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S., Niethammer, U., Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment, *Geomorphology*, 280: 51–66, 2017a.
- James, M. R., Robson, S., Smith, M. W., 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys, *Earth Surface Processes and Landforms*, 42: 1769–1788, 2017b.
- Kasprzak, M., Jancewicz, K., Michniewicz, A., UAV and SfM in Detailed Geomorphological Mapping of Granite Tors: An Example of Starościńskie Skały (Sudetes, SW Poland), *Pure and Applied Geophysics*, 175: 3193–3207, 2018.
- Kobal, M., Analiza hudourniških in erozijskih procesov z uporabo posnetkov brezpilotnih letalnikov, *Gozdarski vestnik*, 1(77): 21–33, 2019.
- Kobal, M., Rockfall monitoring by the combination of LiDAR and Unmanned Aerial Vehicle technology. EUFORIA, European Forest Research and Innovation Area, The final EUFORINNO conference 31st August – 4th September 2015, Rogla, Slovenia, Programme and Book of Abstracts: 63, 2015.

- Kostevc, M., Ocena ogroženosti naselja Belca pred drobirskim tokom, Diplomsko delo, Ljubljana, Biotehnična fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 62 str., 2018.
- Lague, D., Brodu, N., Leroux J., Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner, Application to the Rangitikei canyon (NZ), ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 82: 10–26, 2013.
- Michoud, C., Carrea, D., Costa, S., Derron, M. -H., Jaboyedoff, M., Delacourt, C., Maquaire, O., Letortu, P., Davidson, R., Landslide detection and monitoring capability of boat-based mobile laser scanning along Dieppe coastal cliffs, Normandy, Landslides, 12: 403–418, 2014.
- Nourbakhshbeidokhti, S., Kinoshita, A. M., Chin, A., Florsheim, J. L., A Workflow to Estimate Topographic and Volumetric Changes and Errors in Channel Sedimentation after Disturbance, Remote Sensing, 11 (586): 1–18, 2019.
- Obanawa, H., Hayakawa, Y. S., Variations in volumetric erosion rates of bedrock cliffs in a small inaccessible coastal island determined using measurements by an unmanned aerial vehicle with structure-to-motion and terrestrial laser scanning, Progress in Earth and Planetary Science 5 (33): 1–10, 2018.
- Passalacqua, P., Belmont, P., Stanley, D. M., Simley, J. D., Arrowsmith, J. R., Bode, C. A., Crosby, C., DeLong, S. B., Glenn, N. F., Kelly, S. A., Analyzing high resolution topography for advancing the understanding of mass and energy transfer through landscapes, A review, Earth-Sci. Rev., 148: 174–193, 2015.
- Peternel, T., Kumelj, S., Oštir, K., Komac, M., Monitoring the Potoška planina landslide (NW Slovenia) using UAV photogrammetry and tachymetric measurements, Landslides 14: 395–406, 2017.
- Petje, U., Mikoš, M., Majes, B., Modeliranje gibanja skalnih podorov – pregled = Modelling of rockfall motion – a review, Acta hydrotechnica, 23/38: 19–38, 2005a.
- Petje, U., Mikoš, M., Majes, B., Motion of rock masses on slopes, Geologija, 49/2: 393–408, 2006.
- Petje, U., Mikoš, M., Ribičič, M., Hazard assessment due to falling stones on a reach of the regional road in the Trenta valley, Slovenia, Geologija, 48 (2): 341–354, 2005b.
- Petje, U., Ribičič, M., Mikoš, M.: Computer simulation of stone falls and rockfalls = Računalniško simuliranje skalnih odlomov in podorov, Acta geographica Slovenica, 45-2: 93–100, 2005c.
- Pintar, J., Metodološka zasnova analize povirij voda s primerjalno presojo primernosti površin za smučišča v povirju Pišnice. Ljubljana, Podjetje za urejanje hudournikov Liz inženiring: 94 str., 1977.
- Pix4D Mapper, Professional photogrammetry and drone-mapping, <https://www.pix4d.com>, 2018.
- Rossi, G., Tanteri, L., Tofani, V., Vannocci, P., Moretti, S., Casagli, N., Multitemporal UAC survey for landslide mapping and characterization, Landslides 15, 1045–1052, 2018.
- Seier, G., Stangl, J., Schöttl, S., Sulzer, W., Sass, O., UAV and TLS for monitoring a creek in an alpine environment, Styria, Austria, International Journal of Remote Sensing 38 (8): 1–18, 2017.
- Sotier, B., Adams, M., Lechner, V., UAV-based Natural Hazard Management in High-Alpine Terrain – Case Studies from Austria, Geophysical Research Abstracts, 17: EGU2015-13611-4, 2015.
- Triglav Čekada M., Fotogrametrični in lidarski oblaki točk, Geografski vestnik, 89, 1: 115–129, 2017.
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger F., Bourrier, F., Dorren, L. K. A., Jaboyedoff, M., Rockfall characterization and structural protection – a review, Natural Hazards and Earth System Sciences, 11: 2617–2651, 2011.
- Zhang, Z., Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces, International Journal of Computer Vision 13 (2): 119–152, 1994.
- Žabota, B., Jeršič, T., Kobal, M., Analiza skalnega podora Belca z uporabo brezpilotnega letalnika. V: Zbornik referatov. 29. Mišičev vodarski dan 2018, Maribor, 06. december, Vodnogospodarski biro, 95–100, 2018.