





# Gradbeni vestnik • GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE in MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH INŽENIRJEV INŽENIRSKO ZBORNICE SLOVENIJE

UDK-UDC 05 : 625; tiskana izdaja ISSN 0017-2774;  
spletna izdaja ISSN 2536-4332.  
Ljubljana, avgust 2020, letnik 69, str. 205-224

Izdajatelj:

**Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS)**, Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana, telefon 01 52 40 200  
v sodelovanju z **Matično sekcijo gradbenih inženirjev Inženirske zbornice Slovenije (MSG IZS)**, ob podpori **Javne agencije za raziskovalno dejavnost RS, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, Fakultete za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo Univerze v Mariboru in Zavoda za gradbeništvo Slovenije**

Izdajateljski svet:

ZDGITS: **mag. Andrej Kerin**, predsednik  
**Dušan Jukič**  
**prof. dr. Matjaž Mikoš**  
IZS MSG: **Jernej Mazij**  
**mag. Jernej Nučič**  
**mag. Mojca Ravnikar Turk**  
UL FGG: **izr. prof. dr. Sebastjan Bratina**  
UM FGPA: **doc. dr. Milan Kuhta**

Glavni in odgovorni urednik:

**izr. prof. dr. Sebastjan Bratina**

Lektor:

**Jan Grabnar**

Lektorica angleških povzetkov:

**Romana Hudin**

Tajnica:

**Eva Okorn**

Oblikovalska zasnova:

**Mateja Goršič**

Tehnično urejanje, prelom in tisk:

**Kočevski tisk**

Naklada:

**450 tiskanih izvodov**  
**3000 naročnikov elektronske verzije**

Podatki o objavah v reviji so navedeni v bibliografskih bazah COBISS in ICONDA (The Int. Construction Database) ter na

<http://www.zveza-dgits.si>

Letno izide 12 števil. Letna naročnina za individualne naročnike znaša 23,16 EUR; za študente in upokojene 9,27 EUR; za družbe, ustanove in samostojne podjetnike 171,36 EUR za en izvod revije; za naročnike iz tujine 80,00 EUR. V ceni je všteta DDV.

Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana:  
SI56 0201 7001 5398 955

## Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

1. Uredništvo sprejema v objavo znanstvene in strokovne članke s področja gradbeništva in druge prispevke, pomembne in zanimive za gradbeno stroko.
2. Znanstvene in strokovne članke pred objavo pregleda najmanj en anonimen recenzent, ki ga določi glavni in odgovorni urednik.
3. Članki (razen angleških povzetkov) in prispevki morajo biti napisani v slovenščini.
4. Besedilo mora biti zapisano z znaki velikosti 12 točk in z dvojnimi presledki med vrsticami.
5. Prispevki morajo vsebovati naslov, imena in priimke avtorjev z nazivi in naslovi ter besedilo.
6. Članki morajo obvezno vsebovati: naslov članka v slovenščini (velike črke); naslov članka v angleščini (velike črke); znanstveni naziv, imena in priimke avtorjev, strokovni naziv, navadni in elektronski naslov; oznako, ali je članek strokoven ali znanstven; naslov POVZETEK in povzetek v slovenščini; ključne besede v slovenščini; naslov SUMMARY in povzetek v angleščini; ključne besede (key words) v angleščini; naslov UVOD in besedilo uvoda; naslov naslednjega poglavja (velike črke) in besedilo poglavja; naslov razdelka in besedilo razdelka (neobvezno); ... naslov SKLEP in besedilo sklepa; naslov ZAHVALA in besedilo zahvale (neobvezno); naslov LITERATURA in seznam literature; naslov DODATEK in besedilo dodatka (neobvezno). Če je dodatkov več, so ti označeni še z A, B, C itn.
7. Poglavlja in razdelki so lahko oštevilčeni. Poglavlja se oštevilčijo brez končnih pik. Denimo: 1 UVOD; 2 GRADNJA AVTOCESTNEGA ODSEKA; 2.1 Avtocestni odsek ... 3 ...; 3.1 ... itd.
8. Slike (risbe in fotografije s primerno ločljivostjo) in preglednice morajo biti razporejene in omenjene po vrstnem redu v besedilu prispevka, oštevilčene in opremljene s podnapisi, ki pojasnjujejo njihovo vsebino.
9. Enačbe morajo biti na desnem robu označene z zaporedno številko v okroglem oklepaju.
10. Kot decimalno ločilo je treba uporabljati vejico.
11. Uporabljena in citirana dela morajo biti navedena med besedilom prispevka z oznako v obliki oglatih oklepajev: (priimek prvega avtorja ali kratica ustanove, leto objave). V istem letu objavljena dela istega avtorja ali ustanove morajo biti označena še z oznakami a, b, c itn.
12. V poglavju LITERATURA so uporabljena in citirana dela razvrščena po abecednem redu priimkov prvih avtorjev ali kraticah ustanov in opisana z naslednjimi podatki: priimek ali kratica ustanove, začetnica imena prvega avtorja ali naziv ustanove, priimki in začetnice imen drugih avtorjev, naslov dela, način objave, leto objave.
13. Način objave je opisan s podatki: knjige: založba; revije: ime revije, založba, letnik, številka, strani od do; zborniki: naziv sestanka, organizator, kraj in datum sestanka, strani od do; raziskovalna poročila: vrsta poročila, naročnik, oznaka pogodbe; za druge vrste virov: kratek opis, npr. v zasebnem pogovoru.
14. Prispevke je treba poslati v elektronski obliki v formatu MS WORD glavnemu in odgovornemu uredniku na e-naslov: [sebastjan.bratina@fgg.uni-lj.si](mailto:sebastjan.bratina@fgg.uni-lj.si). V sporočilu mora avtor napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren.

Uredništvo

# Vsebina • Contents

## Uvodnik

stran **206**

doc. dr. Andrej Kryžanowski, univ. dipl. inž. grad.  
**PROF. DR. JANEZ DUHOVNIK SE PO 20 LETIH  
POSLAVLJA Z MESTA GLAVNEGA IN DOGOVORNEGA  
UREDNIKA GRADBENEGA VESTNIKA**

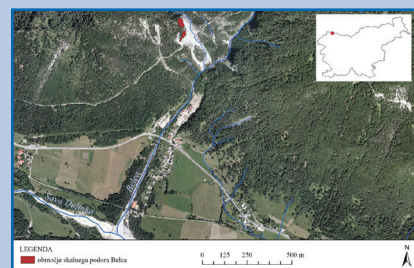
stran **207**

izr. prof. dr. Sebastjan Bratina, univ. dipl. inž. grad.  
**UVODNIK NOVEGA GLAVNEGA IN ODGOVORNEGA UREDNIKA**

## Članki • Papers

stran **208**

doc. dr. Milan Kobal, univ. dipl. inž. gozd.  
Barbara Žabota, mag. geog.  
Tadej Jeršič, univ. dipl. inž. gozd.  
**SPREMLJANJE SKALNEGA PODORA Z UPORABO  
DALJINSKO VODENEGA LETALNIKA**  
SURVEYING OF ROCKFALL AREA USING A REMOTELY  
PILOTED AIRCRAFT SYSTEMS



stran **217**

izr. prof. dr. Samo Lubej, univ. dipl. inž. grad.  
asist. dr. Gregor Kravanja, mag. inž. kem. tehn.  
izr. prof. dr. Andrej Ivanič, univ. dipl. inž. grad.  
**KARAKTERIZACIJA DOTRAJANE MINERALNE VOLNE IZ  
BAZALTNIH VLAKEN**  
CHARACTERIZATION OF DEGRADED MINERAL WOOL  
FROM BASALT FIBERS



## Novi diplomanti

Eva Okorn

## Koledar prireditev

Eva Okorn

Slika na naslovnici: Gradnja hotela A Tower na Bavarskem dvoru v Ljubljani,  
foto Sebastjan Bratina

# PROF. DR. JANEZ DUHOVNIK SE PO 20 LETIH POSLAVLJA Z MESTA GLAVNEGA IN DOGOVORNEGA UREDNIKA GRADBENEGA VESTNIKA

Z mesta glavnega in odgovornega urednika Gradbenega vestnika se po dobrih 20 letih poslavlja prof. dr. Janez Duhovnik, univ. dipl. inž. grad.

Funkcijo urednika revije je prevzel 15. decembra 1999. Gradbeni vestnik je bil takrat uveljavljena strokovna revija z zavidljivim slovesom in tradicijo. Ustanovila sta ga Društvo gradbenih inženirjev in tehnikov LRS ter Svet za gradbene in komunalne zadeve LRS leta 1951 kot naslednika revije Novator in je vsa leta med gradbeniki veljal za pomemben vir strokovnega znanja. Od samega začetka je revija s svojimi strokovnimi članki pomembno prispevala k dvigu kakovosti stroke in kadrov ter aktivno sodelovala pri razvoju gradbeništva. Gradbenike je seznanjala z aktualnimi znanstvenimi dosežki ter z rezultati njihovega uvajanja v prakso, z realizacijami slovenskih gradbišč, novostmi v gradbeni zakonodaji, poročala je o dogajanjih v slovenskih gradbenih kolektivih in društvih, razmišljala o položaju gradbeništva v družbi, o sistemu in razvoju šolstva, pomenu stalnosti izobraževanja in skrbi za uvajanje in dosledno uporabo slovenskega strokovnega izrazoslovja. Pogosto je objavljala povzetke člankov iz tujih revij ter s tem slovenske gradbenike obveščala o aktualnem dogajanju v stroki po svetu. Revija ni bila namenjena le gradbenikom, temveč vsem tistim, ki so bili z gradbeništvom neposredno ali posredno povezani. O pomenu revije tudi v širšem jugoslovanskem prostoru priča dejstvo, da je predsedstvo SFRJ ob 30-letnici izhajanja odlikovalo Gradbeni vestnik z redom zasluga za narod s srebrno zvezdo.

Kljub slovesu, ki ga je Gradbeni vestnik užival, je imenovanje prof. dr. Janeza Duhovnika za glavnega in odgovornega urednika za revijo pomenilo »nov elan in novo vizijo«, kot je poudaril takratni predsednik ZDGITS, doc. dr. Janez Reflak. Zavedal se je namreč, da status revije ni danost, temveč da njegova kontinuiteta zahteva nenehno nadgrajevanje kvalitete. Vrhunska strokovna podkovanost

in raznovrstnost izkušenj prof. dr. Janeza Duhovnika kot tudi njegove osebne lastnosti na čelu z veliko zavzetostjo in predanostjo raziskovalnemu in pedagoškemu delu, načelnostjo, racionalnostjo, pedantnostjo ter nenehnim intelektualnim in delovnim nabojem v prepletu z vedrostjo in življenjskostjo so bile garant za uspešno nadaljnjo pot revije.

Spremembe, ki jih je uvedel, so kmalu obrodile sadove. Najočitnejša tehnična novost je bila uvedba rednega mesečnega izhajanja. Revija je, z izjemo leta 1962, sicer izhajala neprekinjeno, vendar so bile pogoste dvojne številke, datum izida revije pa ni bil vnaprej znan. Redno mesečno izhajanje je pomenilo velik napor pri pridobivanju avtorjev člankov, pri čemer se je prof. dr. Duhovnik zavzemal za uvajanje novih, zlasti mlajših avtorjev. Vsebinsko so revijo zaznamovali usklajevanje teženj in zadoščanje potreb tako avtorjev člankov kot njihovih bralcev s poudarkom na raznovrstnosti besedil tako po vsebini kot po zahtevnosti ter duh interdisciplinarnosti, ki je temelj razvojne perspektive gradbeništva. Poleg objav znanstvenih člankov je Gradbeni vestnik ohranil rubrike, v katerih so bile predstavljene različne zanimivosti z domačih in tujih gradbišč ter novosti in aktualnosti v panogi, intervjuji z gradbeniki, poročila o dejavnosti društev, članov ZDGITS, poročila z dogodkov, ovekovečeni različni jubileji ipd. Mnenja, kritike ter diskusije so dobile svoje mesto v rubriki Odmevi, stalni rubriki sta postali Koledar prireditev in Novi diplomanti. Od leta 2000 so vsi strokovni in znanstveni članki recenzirani pri vsaj enem anonimnem recenzentu.

Ena izmed glavnih nalog Gradbenega vestnika je ostala skrb za razvoj slovenskega znanstvenega in strokovnega izrazoslovja na področju gradbeništva. Za enotno uvajanje novih slovenskih izrazov je prof. dr. Janez Duhovnik skrbel skupaj z avtorji, recenzenti in lektorji.

Prihodnost revije je videl v njeni večji mednarodni razpoznavnosti, zato je, poleg slo-

venskih povzetkov vsebin znanstvenih in strokovnih člankov, uvedel tudi razširjene angleške povzetke, ki naj bi tuje bralce pritegnili k branju celotne vsebine. Dolgoročni cilj je bil uvrstitev revije v eno izmed zbirk mednarodnih bibliografskih baz podatkov, pomembnih zlasti za vrednotenje vplivnosti znanstvenih objav.

Posebno priznanje reviji je bila pridobitev statusa društva, ki deluje v javnem interesu na področju raziskovalne dejavnosti, ki ga je ZDGITS pridobil leta 2006. Pogoje za pridobitev in ohranitev zadevnega statusa ZDGITS izpolnjuje zlasti s svojo publicistično dejavnostjo, torej z izdajanjem Gradbenega vestnika.

Prof. dr. Janez Duhovnik je sodeloval tudi pri oblikovanju in postavitvi domače spletne strani Gradbenega vestnika, kjer je celotna vsebina posamezne številke v elektronski izdaji dostopna vsem takoj po izidu. Bil je pobudnik projekta prenosa arhiva revije od leta 1951 dalje v digitalno verzijo, kar je bilo opravljeno v letu 2016.

Najverjetneje smo pri zapisu uredniškega dela prof. dr. Janeza Duhovnika na marsikaj pozabili, vendar naj na koncu sklenemo takole: dragoceno dolgoletno sodelovanje s prof. dr. Janezom Duhovnikom nam bo ostalo v lepem spominu ne le zaradi njegovih mnogoterih zaslug, temveč prvenstveno zaradi prijateljskih vezi, ki so se med delom stikale in nas bodo povezovala tudi v prihodnje. Za njegov celostni prispevek v našo sredino se mu v imenu članov in vodstva ZDGITS iskreno zahvaljujemo, novemu glavnemu in odgovornemu uredniku revije, izr. prof. dr. Sebastjanu Bratini, pa izrekamo dobrodoščilo in mu želimo veliko delovnega elana ter uspešno uresničevanje vizije prihodnosti Gradbenega vestnika. Srečno!

**Predsednik ZDGITS**  
**doc. dr. Andrej Kryžanowski**

# UVODNIK NOVEGA GLAVNEGA IN ODGOVORNEGA UREDNIKA GRADBENEGA VESTNIKA



Cenjene bralke in bralci Gradbenega vestnika,

z mesecem avgustom od prof. Janeza Duhovnika prevzemam mesto glavnega in odgovornega urednika Gradbenega vestnika. Kot verjetno že veste, je prof. Janez Duhovnik to odgovorno delo opravljal več kot 20 let. Ob tem lahko zatrdim, da v teh, za našo panogo težkih časih več kot uspešno in zelo profesionalno, za kar se mu iskreno zahvaljujem. V čast mi je bilo sodelovati z njim, veselim pa se tudi nadaljnjega sodelovanja. Poleg tega ne smem pozabiti tudi drugih sodelavcev Gradbenega vestnika. Zahvala gre torej tudi njim in verjamem v plodno sodelovanje tudi v prihodnje.

Delo glavnega in odgovornega urednika Gradbenega vestnika, ki mi je bilo zaupano s strani preostalih članov Izdajateljskega sveta in potrjeno s strani članov Izvršnega

odbora ZDGITS, je seveda odgovorno in tudi častno. Revija ima že zelo dolgo tradicijo, prihodnje leto bomo namreč označili že 70-letnico izhajanja. Prizadeval si bom, da bodo tudi v bodoče v reviji našli mesto tako znanstveni prispevki, v katerih bodo avtorji lahko predstavili najnovejša teoretična dognanja z različnih področij gradbene stroke, kakor tudi strokovni prispevki s predstavitvami najnovejših gradbeniških dosežkov na naših tleh. Dobrodošle bodo tudi vse druge objave, ki so prav tako pomembne za našo stroko in jo bogatijo.

Že do sedaj smo lahko v Gradbenem vestniku prebirali znanstvene prispevke z različnih področij. V nekaterih izmed njih so se avtorji ukvarjali s proučevanjem obnašanja konstrukcij v najrazličnejših pogojih, tudi ekstremnih. V nekaterih so avtorji proučevali obnašanje najrazličnejših gradbenih materialov, v reviji pa so mesto našli tudi znanstveni prispevki s področij prometnega inženirstva, okoljskega inženirstva, informacijske tehnologije in drugi. Trudil se bom, da bo pestrost in ustrezna kvaliteta znanstvenih prispevkov zagotovljena tudi v bodoče.

V Gradbenem vestniku pa smo vedno lahko prebirali tudi zanimive in kvalitetne strokovne prispevke. Glede na to, da je gradbena panoga trenutno v precejšnjem porastu, menim, da bodo akterji pri graditvi objektov tudi v prihodnje svoja dognanja predstavljali bralcem revije. Po Sloveniji se namreč gradijo in obnavljajo precej zanimivi objekti. Tako trenutno v Ljubljani poteka gradnja hotela A Tower, ki bo s svojimi 81 m višine ena izmed najvišjih stavb v Sloveniji (slika na naslovnici), gradi se nakupovalni center Ikee, na Brniku raste

nov potniški terminal, prenavlja se tribuna stadiona Ljudski vrt v Mariboru ... Poleg tega pa je na državnem nivoju v pripravi kar nekaj velikih infrastrukturnih projektov, naj omenim le nekatere: drugi tir Divača–Koper, druga cev Karavanškega predora, tretja razvojna os z vsemi pripadajočimi objekti, hidroelektrarne na reki Savi, železniško vozlišče v Ljubljani in še vrsto drugih.

Z namenom, da prispevki iz Gradbenega vestnika postanejo dostopni čim širšemu krogu bralcev, je že nekaj časa celotna vsebina posamezne številke Gradbenega vestnika v digitalni obliki na voljo takoj po izidu, od poletja 2016 pa so v digitalnem arhivu Gradbenega vestnika dosegljive tudi arhivske številke revije. Sočasno skupaj s sodelavci Gradbenega vestnika načrtujemo vključitev revije v mednarodno bibliografsko bazo podatkov Scopus, ki se upošteva pri kategorizaciji znanstvenih publikacij, kar bo vsekakor povečalo zanimanje raziskovalcev za objave v reviji. Sočasno pa poteka tudi posodobitev spletne strani. Za lažjo pripravo prispevkov v skladu s predpisano obliko bomo kot pomoč avtorjem pripravili predloge v okolju Microsoft Word.

Kot vidite, je pred nami cel kup izzivov. Verjamem, da jim bomo z vašo pomočjo tudi kos. Vaša mnenja, komentarji in pripombe bodo vedno dobrodošli. Vabljeni ste, da še naprej prebirate našo revijo in v njej tudi objavljate svoje prispevke. Že vnaprej hvala za sodelovanje, pa srečno!

**Sebastjan Bratina**

# 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 njihov

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).

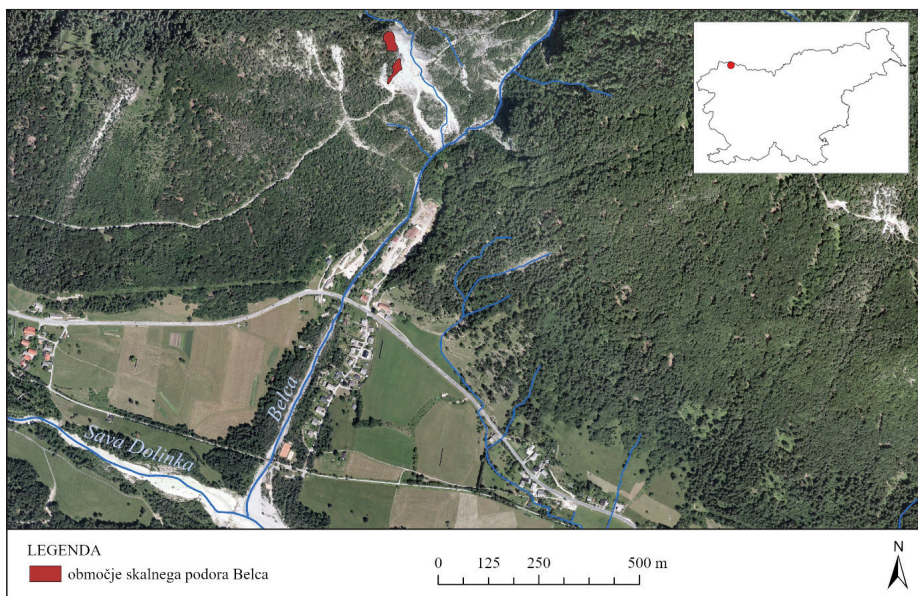
V obdobju zadnjih štirih let sta se zgodila dva večja dogodka, ki sta popolnoma zaprla gozdno cesto: 4. septembra 2014 in 4. februarja 2018. Po dogodku leta 2014 so gozdno cesto očistili in popravili, v letu 2018 pa so v

## 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 izvorno 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).

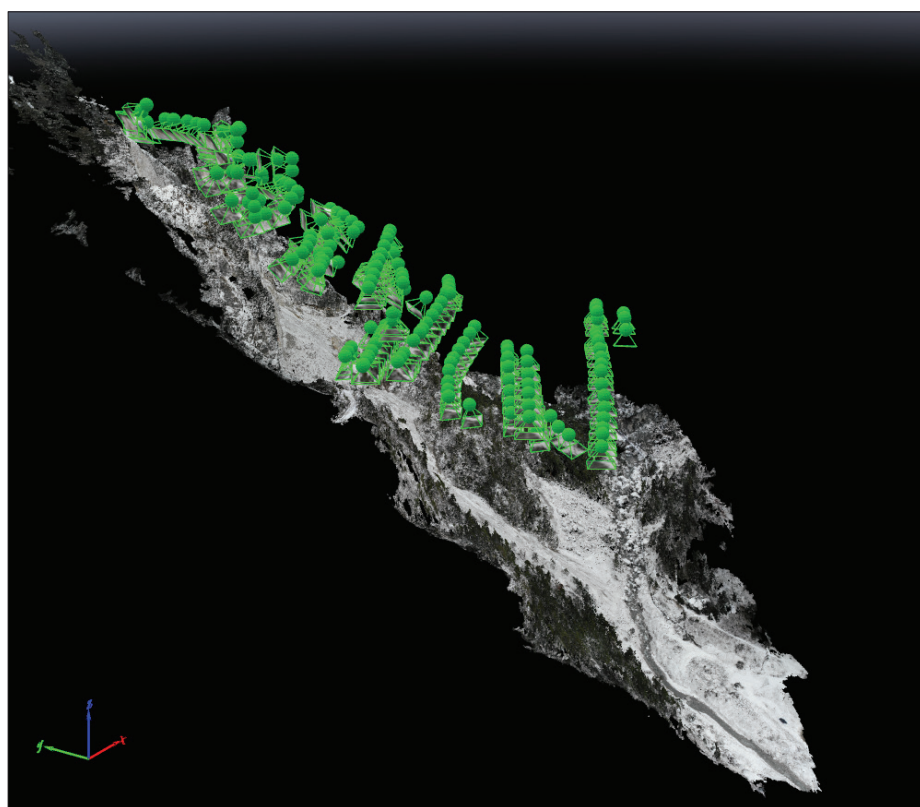
Tovrstni dogodek se na območju naselja Belca ne bi zgodil prvič, saj se je podoben dogodek zgodil že leta 1953, ko je hudournik razdeljal širše območje spodnjega toka, lesni obrat, cestni in železniški most ter preusmeril vlak proti naraslim vodam Save (Pintar, 1977). Nazadnje je do podobnega dogodka 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 širih misijah. RMSE je skupen rezultat natančnosti meritev z GNSS, višine leta ter napak pri procesu dodajanja lokacij fotografijam.

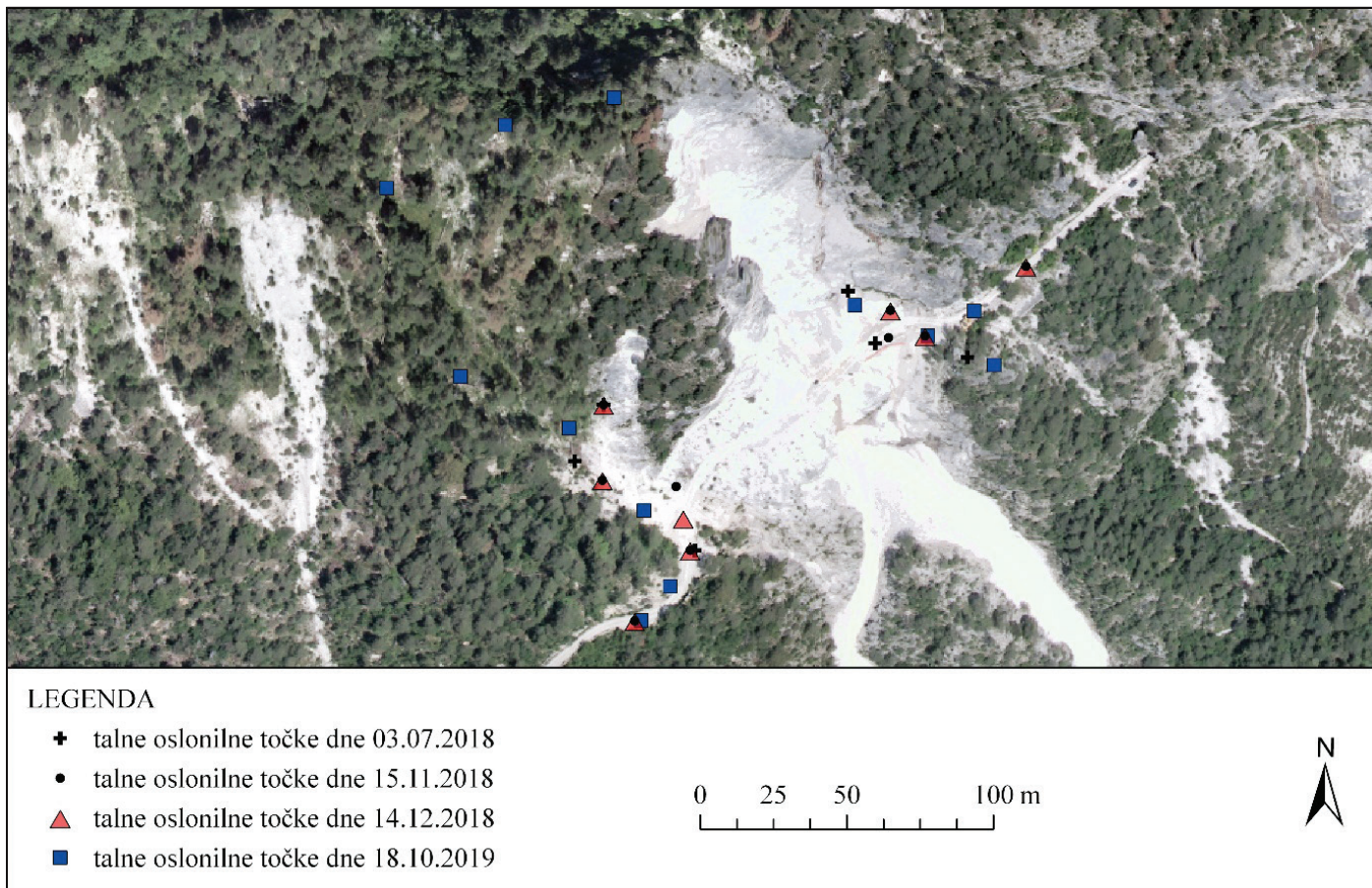
posnetkov izdelali v programu Pix4DMapper (Pix4D Mapper, 2018). Iz posnetkov smo izdelali oblake točk z različnimi gostotami in ortofoto. Natančnost georeferenciranja vseh snemanj je prikazana v preglednici 1.

Čprav 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

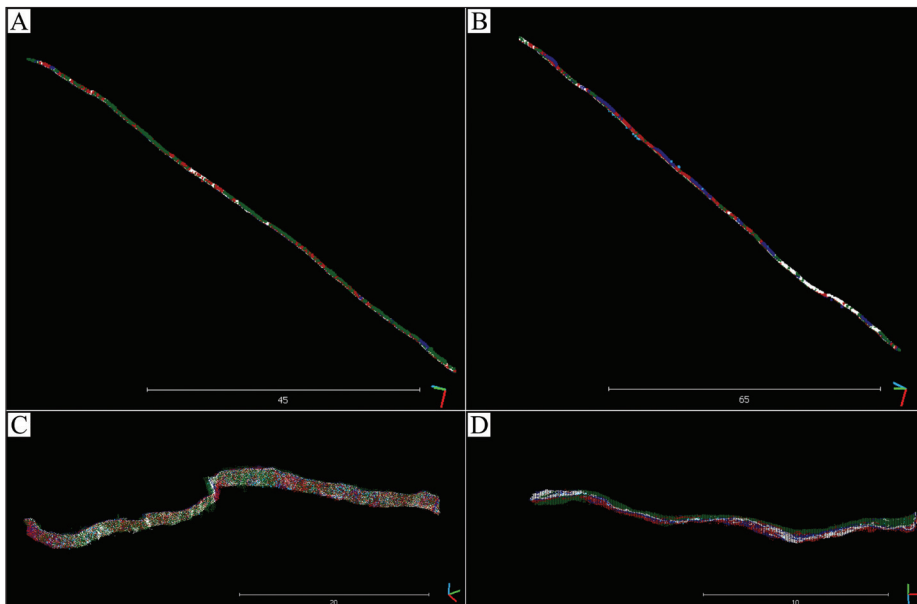
oblakov točk, ki so pri obeh oblakih točk, ki ju primerjamo, enaki. V primerih, ko pa želimo izvesti poravnavo dveh oblakov točk, kjer se posamezni deli območja izrazito razlikujejo, v našem primeru so bila to območja proženja skalnega podora, orodje omogoča uporabo funkcije zavračanja oddaljenih korespondenčnih 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.

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

## 3 • REZULTATI

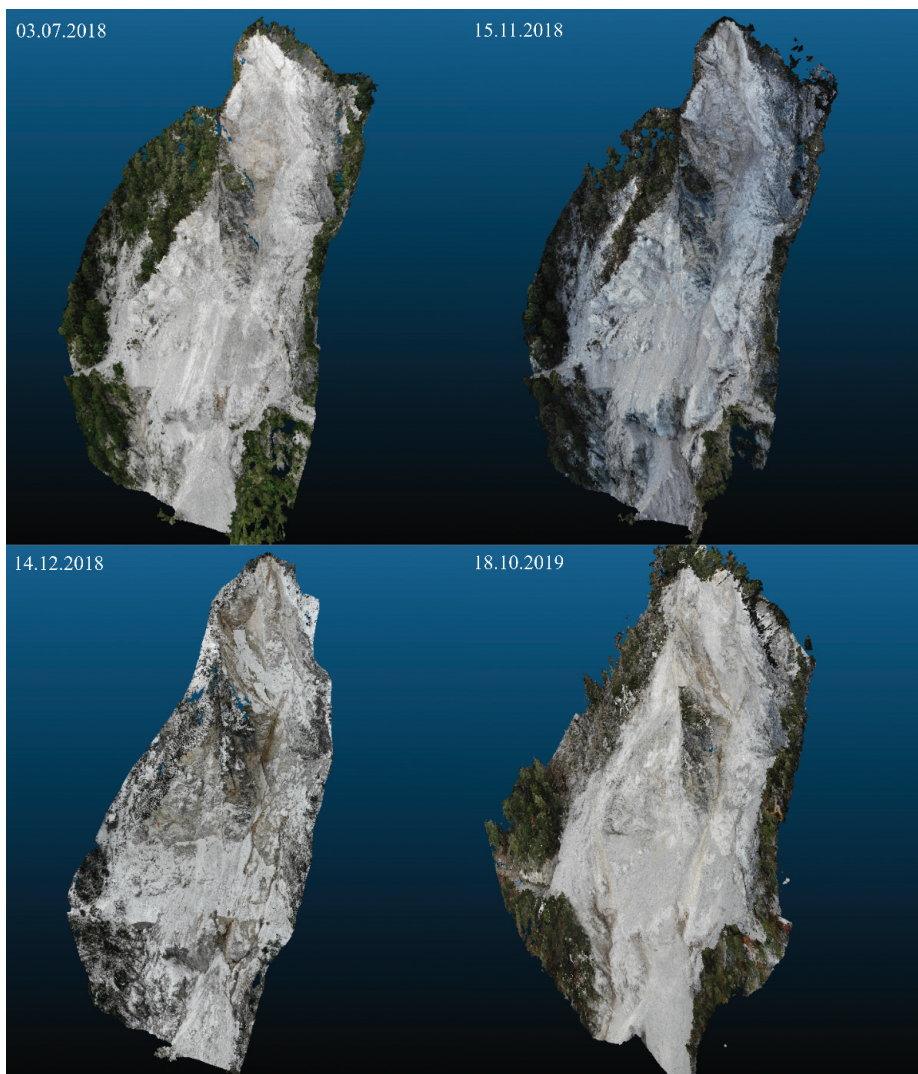
Fotogrametrični oblaki točk (slika 5) prikazujejo dinamiko spreminjanja območja skalnega podora med štirimi misijami snemanja območja.

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<sup>2</sup>. Območje proženja na dveh območjih je nastalo tudi po misiji julija 2018 – površina obeh območij proženja je skupno znašala 1822 m<sup>2</sup>. Samo eno območje proženja je nastalo pri ostalih dveh misijah, in sicer s površino 170 m<sup>2</sup> (misija, november 2018) in 913 m<sup>2</sup> (misija, december 2018).

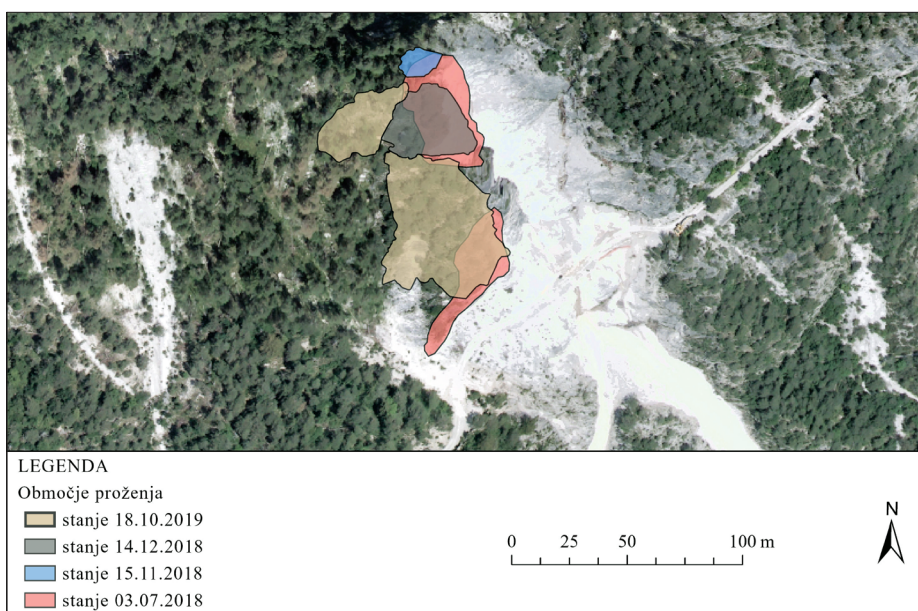
Slika 6 prikazuje označena območja proženja skal med posameznimi misijami. Na podlagi razlik v površju med letom 2014 in prvo misijo (3. 7. 2018) ugotovimo, da je v tem obdobju (predvsem po 4. 2. 2018) prišlo do porušitve 29.712 m<sup>3</sup> skalnega gradiva, in sicer 20.280 m<sup>3</sup> na prvem odlomnem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

| Misija                     |                            |                            |                            |                            |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 0<br>4/4/14                | A<br>7/3/18                | B<br>11/15/18              | C<br>12/14/18              | D<br>10/18/19              |
| 29.712 m <sup>3</sup> (OA) |                            |                            |                            |                            |
|                            | 1.097 m <sup>3</sup> (AB)  |                            |                            |                            |
|                            |                            | 10.558 m <sup>3</sup> (BC) |                            |                            |
|                            |                            |                            | 20.960 m <sup>3</sup> (CD) |                            |
|                            | 30.794 m <sup>3</sup> (OB) |                            |                            |                            |
|                            |                            | 11.631 m <sup>3</sup> (AC) |                            |                            |
|                            |                            |                            | 31.511 m <sup>3</sup> (BD) |                            |
|                            |                            | 41.238 m <sup>3</sup> (OC) |                            |                            |
|                            |                            |                            | 32.584 m <sup>3</sup> (AD) |                            |
|                            |                            |                            |                            | 62.058 m <sup>3</sup> (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 m<sup>3</sup>. 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup>, in sicer 3540 m<sup>3</sup> na območju prvega odlomnega mesta ter 17.770 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> 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 letalnikom 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, WMESS 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](http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas_voda_Lidar@Arso), 2014.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M. -H., Løye, 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 Starościeńskie 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.

# KARAKTERIZACIJA DOTRAJANE MINERALNE VOLNE IZ BAZALTNIH VLAKEN

## CHARACTERIZATION OF DEGRADED MINERAL WOOL FROM BASAL FIBERS

izr. prof. dr. Samo Lubej, univ. dipl. inž. grad.

samo.lubej@um.si

asist. dr. Gregor Kravanja, mag. inž. kem. tehn.

gregor.kravanja@um.si

izr. prof. dr. Andrej Ivanič, univ. dipl. inž. grad.

andrej.ivanic@um.si

Univerza v Mariboru,

Smetanova 17, 2000 Maribor

Znanstveni članek

UDK 677.522

**Povzetek** | Vpliv kemičnega staranja zaradi visoke vlažnosti in prisotnosti vode, ki so mu izpostavljena bazaltna vlakna kamene volne, smo proučevali z uporabo vrstične elektronske mikroskopije (SEM) in energijsko disperzivne spektrometrije ter površinske kemične mikroanalize (EDS in XRM). Rezultati teh raziskav potrjujejo, da vpliv visoke vlažnosti okolice ter povišane temperature lahko povzročijo kemične spremembe, ki zelo spremenijo morfologijo površine bazaltnih vlaken, kar posledično pomeni tudi slabše mehanske lastnosti.

Ključne besede: bazaltna vlakna, mineralna volna, degradacija, vrstična elektronska mikroskopija (SEM), energijsko disperzivna spektrometrija (EDS), površinsko kemična mikroanaliza (XRM)

**Summary** | The impact of chemical aging in high humidity and water, to which basalt glass fibers of stone wool are exposed, has been studied using scanning electron microscopy (SEM) and electron dispersive spectrometry (EDS), as well as X-ray mapping (XRM). The results show that the interaction between the fibers and the surrounding media (high humidity and temperature) leads to chemical changes strongly affecting the surface morphology. This is the reason for the deterioration of mechanical properties.

Key words: basalt fibers, mineral wool, degradation, scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), X-ray mapping (XRM)

### 1 • UVOD

Za zagotavljanje boljše energetske učinkovitosti se v zadnjih desetletjih pogosto v obodno konstrukcijske zgradbe vgrajujejo polistiren (EPS), ekstrudirani polistiren (XPS) in mineralna volna iz bazaltnih vlaken (Ivanič, 2020). Slednje uvrščamo med vlaknaste kompozitne materiale, saj jo sestavljata utrjevalna faza (vlakna) in povezovalna faza (vezivo). Bazaltna vlakna se proizvajajo s postopkom razvlaknenja bazaltne taline pri temperaturi približno

1450 °C. Vlakna se nadalje impregnirajo z vezivom, s katerimi se dosežeta vodoodbojnost in trdnost. Hidrofobna impregnirana vlakna se nato z utrjevanjem veziva združujejo in oblikujejo v kompozit.

Iz gradbene prakse je poznano, da se kljub deklarirani obstojnosti številnim toplotnoizolacijskim materialom – vlaknastim kompozitom, ki so dalj časa izpostavljeni vplivu difundirajoče vodne pare, poslabšajo mehanske

lastnosti (Alessandro, 2018). Za preprečitev poslabšanja toplotnih in hidrometričnih lastnosti izolacije je zelo pomembno, da je kemijsko obstojna, kar je odvisno od tipa veziva. Kamena volna za izolacijo ravnih streh ima večjo gostoto kot izolacijski materiali te vrste za druge namene, zaradi tega je tveganje za elucijo veziva večje (Vrána, 2007).

Voda lahko obstaja v treh agregatnih stanjih, v trdnem (led), tekočem (voda) in plinastem (para). V naravnih pogojih, ki so jim gradbeni objekti navadno izpostavljeni, lahko nastopijo vsi trije naštetih primeri. Vse tri faze so za gradbene materiale lahko nevarne, če v času

izgradnje objekta ne izberemo ustrezne tehnologije, ki onemogoči vstop vode v material (Hagentoft, 2001).

Transport vode v poroznih materialih, kar kamena volna je, je možen z:

- difuzijo,
- kapilarnostjo in
- kot kombinacija difuzije in kapilarnosti.

Zelo pomembno je tudi, da je gradbena konstrukcija gradbeno-fizikalno zasnovana tako, da zaradi difuzije vodne pare v njej ne nastaja škodljivi kondenz in da zaradi izvedbenih

napak ni možno zamakanje. Najpomembnejša lastnost, ki določa dolgotrajno energijsko učinkovitost izolacijskih materialov, je sposobnost, da se onemogoči vdor vlage v porozno strukturo materiala. Vlaga lahko v porozne izolacijske materiale prodira skozi življenjski cikel, če pa se v material uspe absorbirati, se zelo poveča toplotna prevodnost (Fabian, 2004). V suhem okolju znaša toplotna prevodnost mineralne volne približno 0,035 W/mK, pri 90% relativni vlažnosti pa lahko naraste do 0,9 W/mK, kar znatno zmanjša energetska učinkovitost stavb (Jerman, 2012).

Dolga prisotnost vlage v kameni volni lahko vpliva na oslabeitev vezi med vlakni in vezivom, kar lahko povzroči bistveno zmanjšanje tlačne in natezne trdnosti (Chadiarakou, 2007). Izolacijski materiali, kot je na primer kamena volna, ki je vgrajena v gradbene objekte, se v svojem življenjskem ciklu starajo. Staranje pod vplivom zračne vlage in vode ter ob prisotnosti temperature, ki na površini ravne strehe lahko doseže tudi več kot 70 °C, privede do kemičnih sprememb v materialu, predvsem pa se spremeni morfologija površine vlaken (Lund, 2008).

## 2 • VZORČENJE MATERIALA IN KARAKTERIZACIJSKE METODE

### 2.1 Vzorčenje mineralne volne

Za ugotovitev vzrokov sprememb trdnostnih lastnosti toplotne izolacije smo opravili vzorčenje zgornje plasti mineralne kamene volne Termotervol DDP (Knauf Insulation) iz neprezračevanih ravnih streh (slika 1a). V praksi se mineralna volna vgrajuje v dveh slojih različnih gostot in trdnosti. Predmet naših raziskav je bila samo kvaliteta zgornje plasti, ki je DDP. V obeh primerih je vzdrževalec oziroma upravljavec objektov na strehah opazil izrazito zmanjšanje trdnostnih lastnosti – zmečanje vgrajene toplotne izolacije. Preučevani strešni kritini sta bili v sestavi: na zgornji strani 1,2 mm debela hidroizolacijska membrana iz mehkega polivinil klorida (PVC-P), pod njo 200 mm debela toplotna izolacija mineralne

volne, položena v dveh slojih z zamaknjenimi stiki, ki ji sledita 0,3 mm debela parna zapora z lepljenimi stiki in strešna trapezna pločevina 165/250 debeline 1,25 mm, sidrana v AB- in jeklene nosilce ostrešja. Iz dokumentacije o gradnji smo ugotovili, da so bile vgrajene izolacijske plošče z gostoto, večjo od 150 kg/m<sup>3</sup>. Na 4200 m<sup>2</sup> strehe deset let starega trgovsko-poslovnega objekta smo opazili več poškodb hidroizolacije, ki so nastale zaradi vgradnje neustreznih pritrdil (vijakov) hidroizolacije. Na teh mestih je v streho dalj časa tudi zamakalo. Za kontrolo kvalitete izolacijskih materialov smo opravili na prvem objektu tri sondažna odpiranja v velikosti 1000 x 500 mm, v medsebojni oddaljenosti minimalno 30 m. Vzorec iz prvega merilnega mesta je

bil vzorčen na mestu z velikim številom gub in izpuljenim vijakom ob strešni atiki. Vzorec mineralne volne, odvzet z drugega merilnega mesta, je bil vzorčen na omehčanem mestu. Vzročili smo tudi vzorec iz tretjega merilnega mesta, ki ni kazal izrazitih sprememb mehanskih lastnosti. Drugi objekt je industrijska hala s površino strehe 7600 m<sup>2</sup>, ki je razdeljena v dva dela: višji del, ki je orientiran proti zahodni strani, in nižji del, ki je orientiran proti vzhodni strani. Na tej strehi je bilo že po sedmih letih opazno izrazito poslabšanje lastnosti kritine – hidroizolacije, ki je bila lokalno razpokana in stanjšana. Tudi ta streha je na več mestih zamakala. Na višjem delu smo opravili dve vzorčeni ob robnem pasu montažne stene, kjer so koncentrirano nameščena postrojenja klimatov oziroma prezračevalnih sistemov. Na tem mestu smo predhodno ugotovili izrazito zmečana mesta toplotne izolacije ter izpuljenje sider PVC-hidroizolacije. Na nižjem delu



Slika 1 • Vzorec mineralne volne iz ravnih neprezračevanih streh (a) in testiranje trdnostnih lastnosti z uporabo univerzalnega preskusnega stroja Zwick/Roell 2010 (b).



smo opravili vzorčenje v območju strešnega preboja prezračevalnega izpuha. Na tem mestu ni bilo opaznega izrazitega zmanjšanja trdnosti toplotne izolacije. Tudi v tem primeru je bila površina sodažnih mest cca 1000 x 500 mm. Vzorce mineralne volne, ki so bili odvzeti iz obeh objektov, smo takoj po vzorčenju zapakirali v polietilenske vreče ter jih odpeljali v laboratorij za nadaljnjo analizo. Novi t. i. etalonski vzorci, vzorci, ki niso bili vgrajeni, so bili primerjani s starani vzorci iz strehe objektov.

## 2.2 Laboratorijske metode

Na odvzetih vzorcih mineralne kamene volne smo z gravimetrično metodo izmerili količino vsebovane vode, predpisano s standardom

UNI EN ISO 12570. Vsebnost vode ( $w$ ) smo izračunali s pomočjo enačbe (1):

$$w = m_w - m_0 / m_0 \times 100, \quad (1)$$

kjer je  $m_w$  masa odvzetega vzorca iz zmešanega strešnega območja in  $m_0$  masa istega vzorca, ki je bil osušen v ventilacijski komori pri 105 °C do konstantne mase. Mehanske lastnosti – tlačno trdnost pri 10% deformaciji – smo določili po metodi, predpisani s standardom SIST EN 826, z uporabo univerzalnega preskusnega stroja Zwick/Roell Z010 (slika 1b). Za vsako mesto vzorčenja smo izdelali pet vzorcev dimenzij 100 x 100 mm, na katerih smo najprej opravili standardni tlačni preizkus. Iz sredine

teh vzorcev smo odvzeli kosme vlaken ter jih pregledali z vrstičnim elektronskim mikroskopom Quanta 3D in Sirion 400 NC. Rezultati pregleda z elektronskima mikroskopoma so SEM-SEI-posnetki (Scanning Electron Microscopy – Secondary Electron Imaging) in mikrokemijska analiza vsebovanih kemijskih elementov EDS (Energy Dispersive Spectrometry) oziroma XRM (X-Ray Mapping), ki podaja razporeditev kemijskih elementov po površini. Površinsko EDS-analizo preiskovanih vzorcev, ki smo jih predhodno očistili v 95% alkoholu ter osušene neparili z zlatom, smo opravili z elektronskim mikroskopom Sirion 400 NC.

vlakna mineralne volne (Yu, 2018). Preostala voda, ki poleti ni izhlapela iz strešnih objektov, je povzročila delno razgradnjo formaldehidne smole z reakcijo depolimerizacije (slika 2). Bazaltna vlakna so v splošnem zelo odporna proti vplivu alkalnih raztopin, odpornost v kislinskih raztopinah pa je razmeroma majhna (Militky, 2010).

Rezultati izmerjenih vlažnosti ( $w$ ) in tlačnih trdnosti ( $\sigma$ ) iz objektov 1 in 2 so podani v preglednici 1. Deklarirana tlačna trdnost po standardu SIST EN 826 pri 10% deformaciji ( $\sigma_{10,dek}$ ) je bila 70 kPa.

Prisotnost vlage v izolacijskem materialu sčasoma močno vpliva na poslabšanje mehanskih lastnosti. Če bazaltna vlakna potopimo v vodo brez zaščite s smolo, se poslabšajo njihove natezne lastnosti (Li, 2012). Iz rezultatov preizkušanja, ki so zbrani v preglednici 1, je razvidno, da se je » $\sigma_{10,sred}$ « v povprečju zmanjšala od » $\sigma_{10,dek}$ « na prvem referenčnem objektu za 64% oz. 67% na drugem referenčnem objektu. Mehanska trdnost vlaken je tesno povezana z morfologijo površine, ki ne sme biti heterogena, ne sme vsebovati strukturnih napak in nečistoč. Z namenom preučiti morfologijo površine vlaken smo opravili nadaljnjo podrobno mikroanalizo z uporabo elektronskega mikroskopa.

## 3.2 Pregled vzorcev mineralne volne z elektronskim mikroskopom

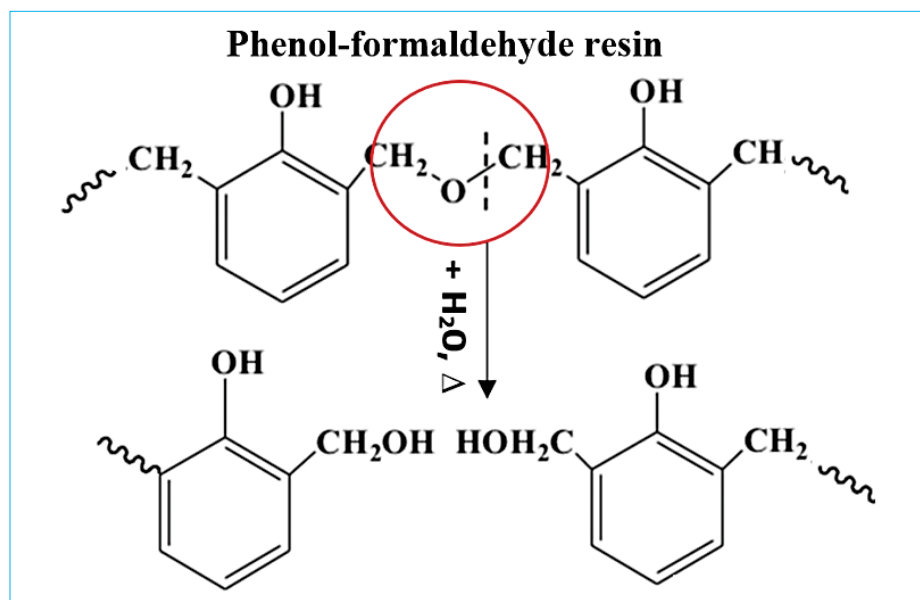
Mikroskopski pregled vzorcev kamene volne je pokazal, da je na vseh staranih vzorcih prišlo do sprememb na površini vlaken. Oblika izboklin in razjed ni nujno sferične oblike, njihova površina je zelo različna. Kamena volna, ki smo jo preiskovali, je sestavljena iz kratkih bazaltnih vlaken, ki so naključno orientirana in medsebojno povezana z vezivom. Slika

## 3 • REZULTATI IN DISKUSIJA

### 3.1 Vsebnost vlage in mehanske lastnosti vzorcev kamene volne

Vsebnost vlage v vzorcih kamene volne s strešnih kritin je zanašala od 0,48 mas.% do 4,13 mas.%. Vsebnost vlage smo izmerili na petih vzorcih mineralne volne za vsako mesto vzorčenja. V novih, etalonskih vzorcih

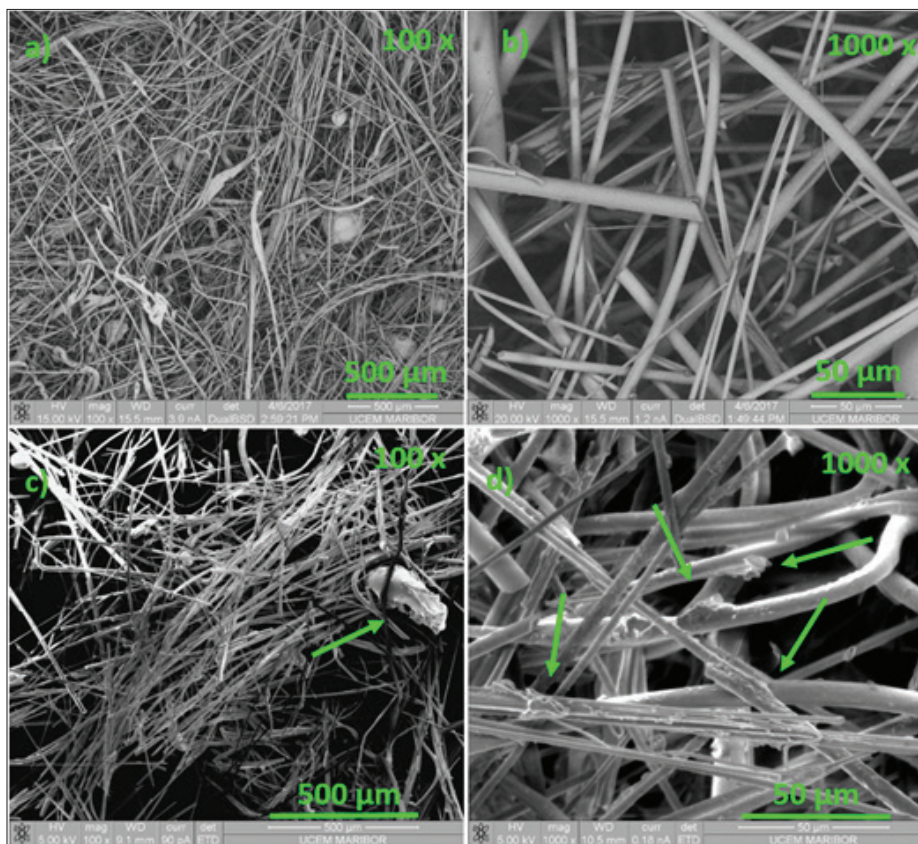
je bila v laboratoriju izmerjena nižja vlaga pri 90% relativni vlažnosti (manj kot 0,4 mas.%) zaradi prisotnosti nedegradirane smole in drugih hidrofobnih dodatkov. Prisotnost višje količine vlage v odvzetih strešnih vzorcih je tako lahko vzrok za delno razgradnjo veziva iz fenol-formaldehidne smole, ki ščiti in povezuje



Slika 2 • Delna razgradnja fenol-formaldehidne smole z reakcijo depolimerizacije kot posledica prisotnosti vode in povišane temperature, ki lahko poleti na strešnih objektih preseže 70 °C.

| VZOREC   | $w_{min}$<br>(uf. %) | $w_{sred}$<br>(uf. %) | $w_{max}$<br>(uf. %) | $\sigma_{10,min}$<br>(kPa) | $\sigma_{10,sred}$<br>(kPa) | $\sigma_{10,max}$<br>(kPa) | $\sigma_{10,dek}$<br>(kPa) |
|----------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| objekt 1 | 0,71                 | 0,83                  | 0,97                 | 11                         | 25                          | 38                         | 70                         |
| objekt 2 | 0,48                 | 1,71                  | 4,13                 | 9                          | 23                          | 57                         | 70                         |

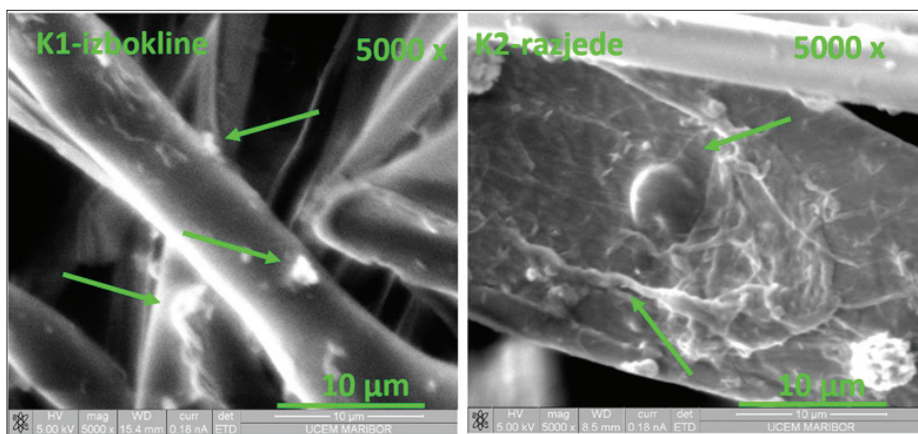
Preglednica 1 • Rezultati izmerjenih mehanskofizikalnih lastnosti.



Slika 3 • SEM-, SEI-posnetek novih (a, b) in postaranih (c, d) bazaltnih vlaken pri 100- in 1000-kratni povečavi.

3a-b predstavlja mikrostrukturo nove kamene volne, ki prikazuje vlakna z gladkimi površinami. Slika 3d-f pa prikazuje starane vzorce

difuzije vodne pare. Pri 100-kratni povečavi je viden degradiran skupek formaldehidne smole (PF), ki se uporabila kot utrjevalna



Slika 4 • SEM-, SEI-posnetek bazaltnih vlaken – vzorca mineralne volne, ki je bil očiščen v 95% alkoholu pri 5000-kratni povečavi s karakterističnima spremembama – K1-izboklinami in K2-razjedo.

pri 100- in 1000-kratni povečavi, odvzete z omehčanega strešnega območja, katerih površine so obdane s slojem nečistoč, ki so nastale zaradi stalnega zamakanja in kondenzacije vode na poroznih mestih kot posledica

faza pri proizvodnji kamene volne (slika 3d). Lokalno prisotne vložke PF je mogoče razložiti z neenakomerno porazdelitvijo veziva že med proizvodnim postopkom. Za izboljšanje koherentnosti med vlakni in formaldehidnim

vezivom se v zaključni fazi vlakna pogosto poškrbijo še s silanom ( $\text{SiH}_4$ ) (Moseguard, 2005). Dobra medsebojno povezanost veziva in bazaltnih vlaken je tesno povezana z mehanskimi lastnostmi (Lund, 2008).

Nadalje smo starani vzorec kamene volne očistili v 95% alkoholu. Tako očiščene vzorce vlaken smo pregledali z elektronskim mikroskopom pri 5000-kratni povečavi. Na površini vlaken smo opazili dve karakteristični obliki sprememb: izbokline (K1-izbokline) in razjede (K2-razjede) (slika 4). Isti tip poškodb se pojavlja na vseh vzorcih, ki smo jih pridobili iz obeh objektov.

Vzrokov, ki so razlog za nastanek takšnih sprememb površine bazaltnih vlaken, je več:

- raztezek bazaltnih vlaken in otrdele fenol-formaldehidne smole, ki obdaja površino bazaltnih vlaken, je zelo različen (Ducman, 1998) ( $\alpha_{\text{bazalt.vlakna}} = 8 \times 10^{-6}/\text{K}^{-1}$  in  $\alpha_{\text{PF.smola}} = 30 - 45 \times 10^{-6}/\text{K}^{-1}$ ), kar pri cikličnih temperaturnih obremenitvah, ki na strehah predstavljajo interval od  $-10^\circ\text{C}$  do  $70^\circ\text{C}$  privede do tega, da film iz PF-smole na mestih s slabo adhezijo nabrekne.
- PF-smole so krhke in odporne proti vodi; izbokline in razjede na vlaknih predstavljajo mesta slabe adhezije med vezivom in vlakni, temperaturno delovanje in vpliv vlage na teh mestih povzročita poškodbe vlaken, ki brez hidrofobne zaščite niso več odporna proti vplivu vlage.

### 3.3 Mikrokemijske lastnosti vzorcev kamene volne

Za določanje relativnih količin kemijskih elementov na površini novih in dotrajanih vzorcev kamene volne smo uporabili SEM-EDS-tehniko, za ugotavljanje elementarne porazdelitve pa XRM-analizo.

#### 3.3.1 Mikrokemijska EDS-analiza vzorcev

Mikrokemijska analiza vzorcev je bila narejena z energijsko disperzijskim spektrometrom (EDS). Analizirali smo dva vzorca s karakterističnimi poškodbami. Preučili smo etalonski vzorec (slika 5) in vzorec z oznako K1, kjer prevladujejo spremembe v obliki izboklin (slika 6a), na vzorcu z oznako K2 pa prevladujejo spremembe v obliki razjed (slika 6b). EDS-penetracija elektronskih žarkov je omejena na detekcijo  $1 \mu\text{m}$  v globino, kar zajema večinski zgornji sloj vlaken, ki je okopana s plastjo veziva formaldehidne smole. V primeru poškodovanih (razjed, izboklin) vzorcev lahko pričakujemo drugačen zajem elementov kot v primeru novih. Razjede in izbokline omogočajo drugačno penetracijo elektronskih žarkov,

| Spojina | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO     | MgO     | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O |
|---------|------------------|--------------------------------|---------|---------|-------------------|------------------|------------------|
| ut. %   | 51,6-57,5        | 16,9-18,2                      | 1,3-3,7 | 5,2-7,8 | 2,5-6,4           | 0,8-4,5          | 4,0-9,5          |

Preglednica 2 • Kemična sestava mineralne volne iz bazaltnih vlaken (9).

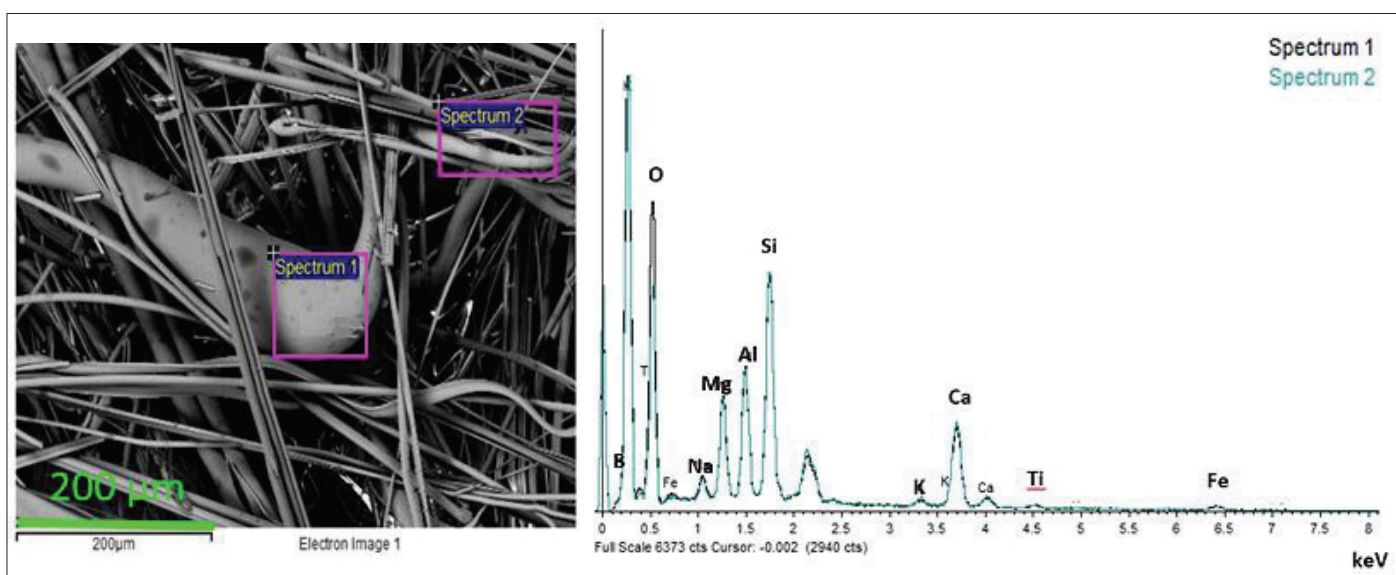
|                     | C     | O     | Na   | Mg   | Al   | Si    | K    | Ca    | Ti   | Fe   |
|---------------------|-------|-------|------|------|------|-------|------|-------|------|------|
| <b>Etalon (nov)</b> | 26.35 | 39.40 | 0.71 | 3.16 | 4.22 | 9.71  | 0.11 | 6.44  | 0.36 | 2.41 |
| <b>K1-izboklina</b> | 35.93 | 31.55 | 0.82 | 3.53 | 4.74 | 9.52  | 0.62 | 10.09 | 0.69 | 1.90 |
| <b>K2-razjeda</b>   | 17.98 | 34.38 | 1.22 | 4.50 | 5.98 | 12.37 | 0.88 | 13.57 | 0.91 | 3.04 |

Preglednica 3 • Rezultati povprečne vrednosti EDS-analiz po površini vzorca.

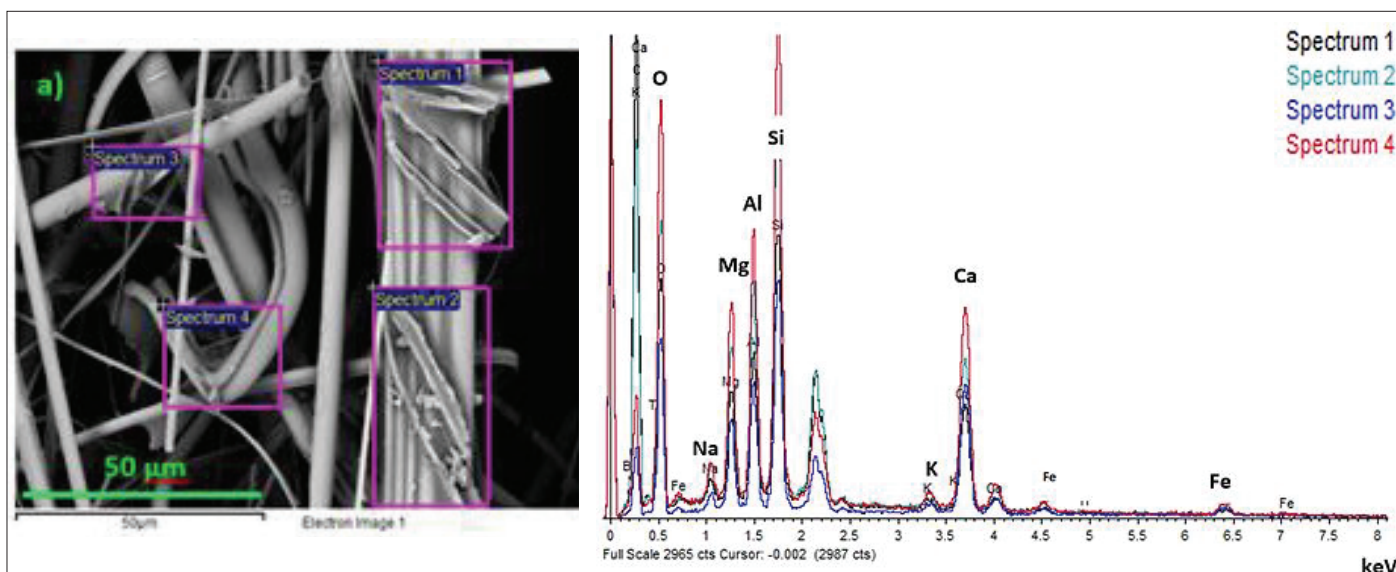
saj lokalno na površini bazaltnih vlaken primanjkuje sloj veziva, ki je degradiral zaradi vpliva visoke vlage in toplotnih nihanj. V preglednici

2 podajamo splošne kemične lastnosti bazaltnih vlaken, ki so jih podali raziskovalci K. Van de Velde et al. (Van de Velde, 2003).

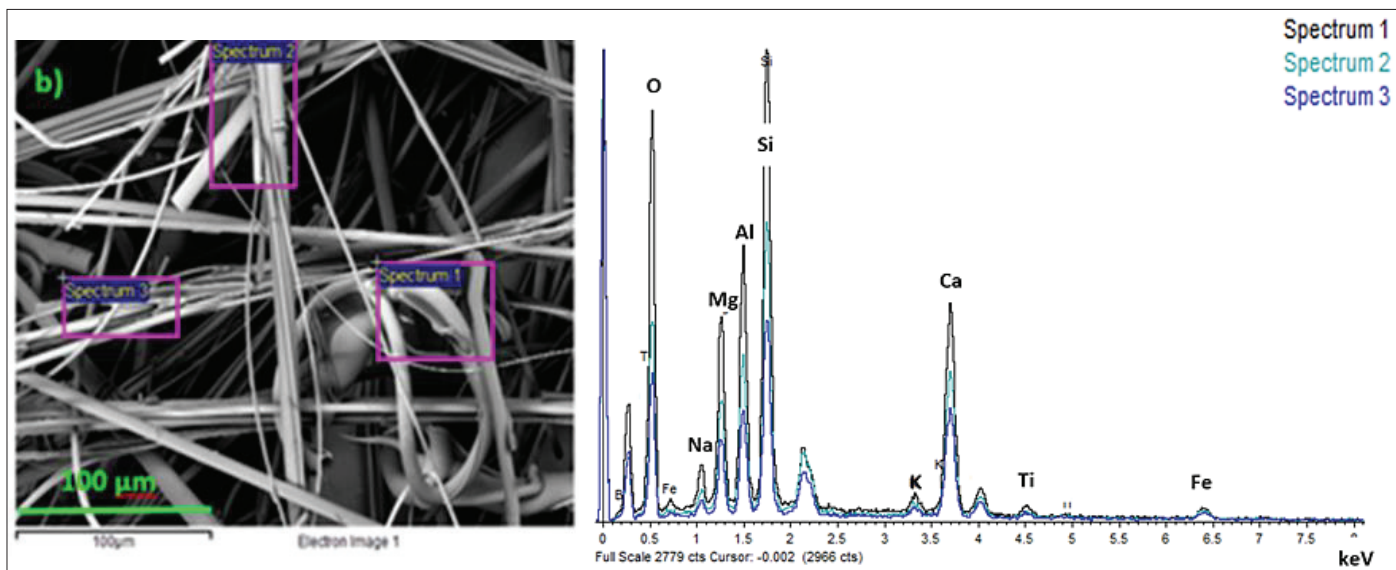
Dominantna oksida sta SiO<sub>2</sub> in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, vsi ostali naštetih oksidi se vedno pojavljajo v vrednostih, ki so manjše od 10 ut. %.



Slika 5 • Področji EDS-analize na novem vzorcu in rezultati EDS-spektrov.



Slika 6a • Področja EDS-analize na vzorcih s steh s karakteristično spremembo površine: K1-izboklina in rezultati EDS-spektrov.



Slika 6b • Področje EDS-analize na vzorcih s streh s karakteristično spremembo površine: K2-razjeda (b) in rezultati EDS-spektrov.

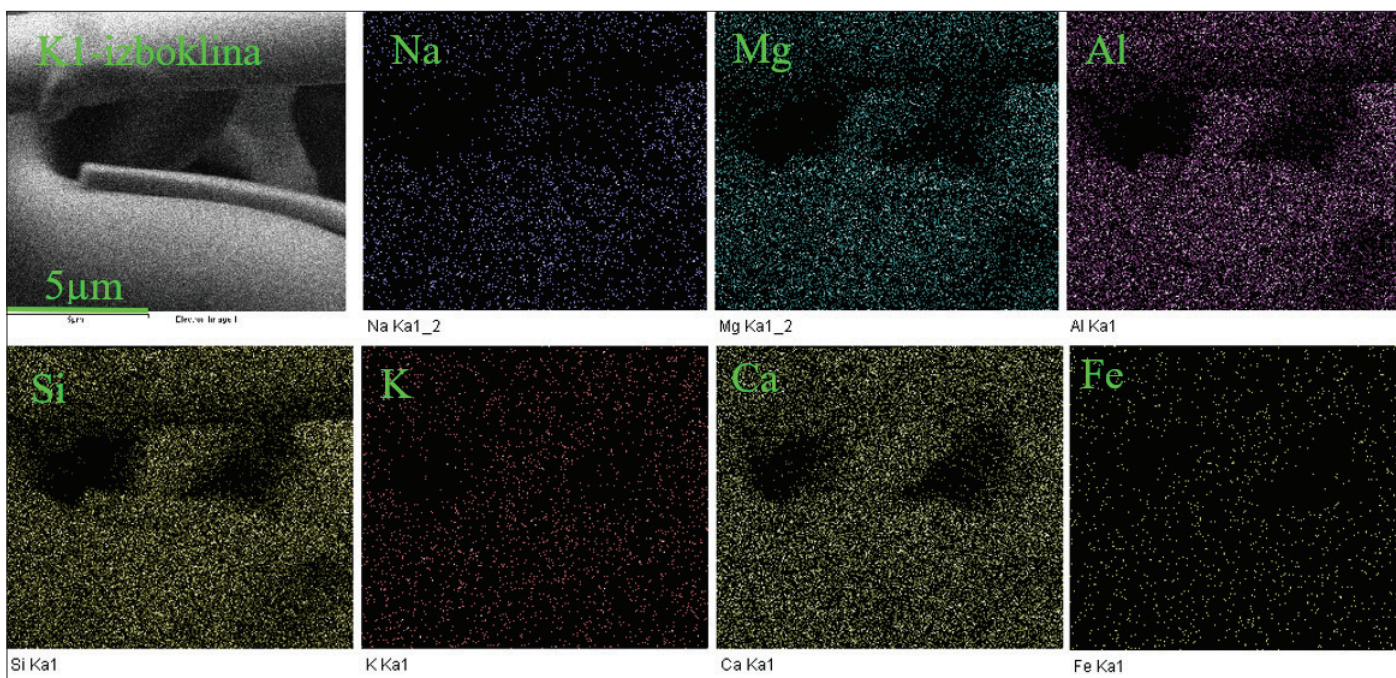
|                     | C    | O    | Na   | Mg   | Al   | Si   | K    | Ca   | Ti   | Fe   |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>Etalon (nov)</b> | 2.72 | 4.06 | 0.07 | 0.33 | 0.43 | 1.00 | 0.01 | 0.66 | 0.04 | 0.25 |
| <b>K1-izboklina</b> | 2.71 | 3.10 | 0.09 | 0.37 | 0.50 | 1.00 | 0.07 | 1.11 | 0.08 | 0.22 |
| <b>K2-razjeda</b>   | 2.34 | 2.77 | 0.10 | 0.36 | 0.48 | 1.00 | 0.07 | 1.09 | 0.07 | 0.24 |

Preglednica 4 • Rezultati relativnih količin elementov Na, Mg, Al in K v primerjavi s Si.

Rezultati EDS-analize, s katero smo ugotavljali prisotnost kemijskih elementov, ki tvorijo okside, podane v preglednici 2, so prikazani v preglednici 3. Razvidno je, da je element Si manj prisoten v novem vzorcu, ki je pre-

vlečen s smolo, v primerjavi z degradiranim, kjer razjede omogočijo globljo penetracijo elektronskih žarkov do bazaltne površine, bogate s SiO<sub>2</sub> oksidom. Prav tako so se v vzorcem na mestih razjed na površni pov-

ečale relativne količine elementov Na, Mg, Al, Ca K in Ti v primerjavi s Si (preglednica 4). Do podobnih ugotovitev sta prišla Lund in Yue, ki sta preučevala površino bazaltnih vlaken, ki je bila več tednov potopljena v



Slika 7 • Razporeditev kemijskih elementov za vzorec s karakteristično poškodbo K1-izboklina.

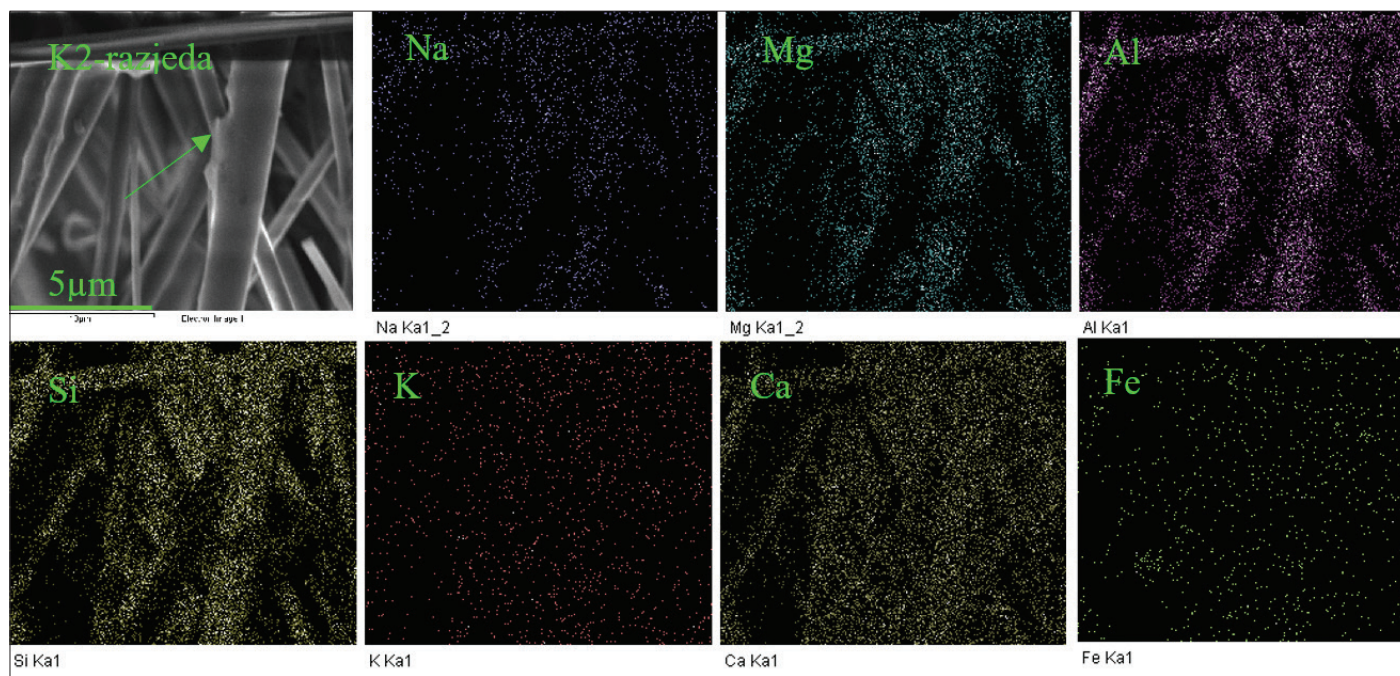
deionizirano vodo pri 70 °C (Lund, 2008). Ker je vzorčenje dotrajanih strešnih vzorcev pokazalo sorazmerno povečanje elementov Al in Ca, lahko domnevamo, da so se na površini oblikovale usedline Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in CaO. Višja raven CaO v starih vzorcih kaže na to, da je prišlo do bazaltne korozije (Lehuede, 1994). Predvidevamo, da je pod vplivom vlage in vode prišlo do kemijskih reakcij med površino bazaltnih vlaken in vlažnim okoljem (Lund, 2008).

Slika 6a: Področja EDS-analize na vzorcih s streh s karakteristično spremembo površine: K1-izboklina in rezultati EDS-spektrov

### 3.3.2 Površinsko kemična mikroanaliza (XRM)

XRM-analizo (X – Ray Mapping) smo uporabili za ugotavljanje elementarne porazdelitve kemijskih elementov na področjih K1 – izboklina in K2 – razjeda. Razporeditev kemijskih elementov Na, Mg, Al, Si, K, Ca in

Fe je za vsak dotrajani vzorec s karakterističnimi napakama K1-izboklina in K2-razjeda podan na slikah 7 in 8. Kot dejstvo, ki je razvidno iz opravljene XRM-analize, pa lahko navedemo, da degradacije površine nimajo vzroka v nečistočah materiala, saj je razporeditev kemijskih elementov – reaktantov, predvsem Fe, tudi na teh mestih enakomerna.



Slika 8 • Razporeditev kemijskih elementov za vzorec s karakteristično poškodbo K2-razjeda.

## 4 • ZAKLJUČEK

Na osnovi opravljenih raziskav menimo, da je vzrok poslabšanja mehanskih lastnosti plošč iz mineralne volne – vlaknastega

kompozita iz bazaltnih vlaken in veziva iz fenol-formaldehidne smole – degradacija strukture. Zaradi prisotne vode in povišane

temperature se površina bazaltnih vlaken morfološko spremeni. Morfološke spremembe na površini vlaken so vzrok za poslabšanje mehanskih lastnosti. Te spremembe pa so posledica kemičnega staranja zaradi prisotne vode.

## 5 • LITERATURA

Chadiarakou, S., Papadopoulos, A. M., Karamanos, A., Aravantinos, D., The impact of moisture on the thermal conductivity value of stone wool based insulating materials, Proc. of 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, 27–29, 2007.

D'Alessandro, F., Baldinelli, G., Bianchi, F., Sambuco, S., Rufini, A., Experimental assessment of the water content influence on thermo-acoustic performance of building insulation materials, Construction and Building Materials 158, 264–274, 2018.

De Rosa, I. M., Marra, F., Pulci, G., Santulli, C., Sarasini, F., Tirillò, J., Valente, M., Post-impact mechanical characterisation of E-glass/basalt woven fabric interply hybrid laminates, Express Polymer Letters 5(5), 2011.

- Ducman, V., Apih, V., Kovačević, M., Sever-Škapin, A., Vpliv pospešenega staranja na mehanske lastnosti plošč iz mineralnih vlaken, *Kovine, zlitine tehnologije*, 32(3–4), 1998.
- Fabian, B. A., Herrenbruck, S., Hoffee, A., The Environmental and Societal Value of Extruded Polystyrene Foam Insulation, *Earth Tech Forum* 200; April 15, 2004.
- Hagentoft, C. E., *Introduction to Building Physics*, Lund: Studentlitteratur, 87–149, 2001.
- Ivanič, A., Kravanja, G., Kidess, W., Rudolf, R., Lubej, S., The Influences of Moisture on the Mechanical, Morphological and Thermogravimetric Properties of Mineral Wool Made from Basalt Glass Fibers, *Materials*, 13, 2392, 2020.
- Jerman, M., Cerný, R., Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials, *Energy Build.*, 53, 39–46, 2012.
- Li, H., Xian, G., Ma, M., Wu, J., Durability and fatigue performances of basalt fiber/epoxy reinforcing bars, *Proc., 6th Int. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2012)*, Univ. of Rome La Sapienza, Rome, 2012.
- Lehuede, P., De Meringo, A., SEM-EDS analysis of glass fibers corroded in physiological solutions by dynamic tests with variable flow rates, *Environ. Health Perspect.* 102, 73–75, 1994.
- Lund, M. D., Yue, Y. -Z., Influences of chemical aging on the surface morphology and crystallization behavior of basaltic glass fibers, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354, 1151–1154, 2008.
- Militký, J., Zeisbergerová, J., Kovačič, V., Chemical degradation of basalt fibers, *Textile industry technology* (3 ), 317, 2009.
- Mosegaard, M., Pedersen, H., Investigation of the Crystallization Process occurring in Stone Wool Fibres during High Temperature treatments, *Project Paper*, Aalborg University, Denmark, 2005.
- Steponaitis, L., Vėjelis, S., Vaitkus, S., Analysis of structure and deformation mechanisms of mineral wool slabs under compression, *Materials Science* 18(2), 192–196, 2012.
- Van de Velde, K., Kiekens, P., Van Langenhove, L., Basalt fibres as reinforcement for composites, *Proceedings of 10th international conference on composites/nano engineering*, University of New Orleans, New Orleans, LA, USA, Citeseer, 2003.
- Vrána, T., Impact of moisture on long term performance of insulating products based on stone wool, *KTH*, 2007.
- Yu, Y., Xu, P., Chang, M., Chang, J., Aging Properties of Phenol-Formaldehyde Resin Modified by Bio-Oil Using UV Weathering, *Polymers*, 10, 1183, 2018.

# NOVI DIPLOMANTI

## UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

### II. STOPNJA - MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

**Ehab Attia**, Postopki avtomatizirane izdelave 4D in 5D BIM modelov, mentor doc. dr. Aleksander Srdić; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=117982&lang=slv>

**Arlind Dervishaj**, Pristop BIM za metode trajnostnega načrtovanja: od bioklimatskega do regenerativnega načrtovanja, mentor doc. dr. Tomo Cerovšek, somentorica Branka Trebušak; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=117983&lang=slv>

**Vítor Ferronato De Lira**, Kibernetska varnost skupnih podatkovnih okolj občutljivih nepremičnin, mentor prof. dr. Žiga Turk; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=117886&lang=slv>

**Mewail Gidey**, Priložnosti platformskih poslovnih modelov v gradbeništvu, mentor prof. dr. Žiga Turk; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=117887&lang=slv>

**Greta Rossi**, Vloga računsko podprtega načrtovanja BIM, mentor doc. dr. Matevž Dolenc; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=117984&lang=slv>

**Muammer Semih Sonkor**, Sodelovalna okolja BIM: Blaženje kibernetskih varnostnih groženj v fazi načrtovanja, mentor prof. dr. Žiga Turk, somentor asist. dr. Robert Klinc; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=117985&lang=slv>

**João Vieira**, Podatkovni center za poslovno inteligenco v gradbeništvu, mentor doc. dr. Tomo Cerovšek; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=117986&lang=slv>

## UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO, PROMETNO INŽENIRSTVO IN ARHITEKTURO

### I. STOPNJA - UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Študij so z diplomskim izpitom zaključili:

**Josef Sabbagh**

**Gregor Šebök**

**Gašper Vogrin**

### II. STOPNJA - MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVA

**Kristina Tomiek**, Uporaba sodobnih metod zajema in obdelave podatkov za umeščanje virtualnih objektov v prostor, mentor doc. dr. Rok Kamnik (Republika Hrvaška), somentor viš. pred. Matjaž Nekrep Perc; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=76728&lang=slv>

**Rok Varga**, Reševanje problematike voziščnih konstrukcij z nevezano nosilno plastjo s pomočjo tehnologije chip seald, mentor izr. prof. dr. Bojan Žlender, somentorja doc. dr. Primož Jelušič in izr. prof. dr. Cahit Güreer; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=76635&lang=slv>

## UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO, PROMETNO INŽENIRSTVO IN ARHITEKTURO - EKONOMSKO POSLOVNA FAKULTETA

INTERDISCIPLINARNI ŠTUDIJSKI PROGRAM  
GOSPODARSKEGA INŽENIRSTVA – SMER GRADBENIŠTVO

### I. STOPNJA - UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM - SMER GRADBENIŠTVO

Študij je z diplomskim izpitom zaključil:

**Lovro Žveglič**

Rubriko ureja • Eva Okorn, [gradb.zveza@siol.net](mailto:gradb.zveza@siol.net)

# KOLEDAR PRIREDITEV

**18.-20.10.2020**

**ICSECT'20 - 5th International conference on Structural Engineering and Concrete Technology**

spletna konferenca  
<https://icsect.com/>

**12.-14.11.2020**

**ICCSTE'20 - 5th International Conference on Civil, Structural and Transportation Engineering**

Niagarski slapovi, Kanada  
<https://iccste.com/>

**19.-20.11.2020**

**CRRB — 22nd International Conference on Rehabilitation and Reconstruction of Buildings**

Brno, Češka  
<http://crrb.wta.cz>

**18.-20.1.2021**

**NGM2021 — 18th NGM Nordic Geotechnical Meeting**

Helsinki, Finska  
[www.ril.fi/en/events/ngm-2020.html](http://www.ril.fi/en/events/ngm-2020.html)

**6.-8.4.2021**

**BMCT Dubai 2021 - International Conference and Exhibition on Building Materials and Construction Technologies**

Dubaj, Združeni arabski Emirati  
<https://bmctdubai.org/>

**20.-22.4.2021**

**"Structural Faults + Repair-2020" & "European Bridge Conference-2020"**

Edinburg, Škotska  
[www.structuralfaultsandrepair.com/](http://www.structuralfaultsandrepair.com/)

**7.-9.6.2021**

**Mediterranean Symposium on Landslides**

Neapelj, Italija  
<https://medsymplandslides.wixsite.com/msl2021>

**17.-19.6.2021**

**EGRWSE-2020 — 3rd International Conference on Environmental Geotechnology, Recycled Waste Materials and Sustainable Engineering**

Izmir, Turčija  
<https://egrwse2021.com/>

**21.-25.6.2021**

**ICOSSAR 2021-13th International Conference on Structural Safety & Reliability**

Šanghaj, Kitajska  
[www.icossar2021.org/](http://www.icossar2021.org/)

**27.-30.6.2021**

**ICSGE'21 — 1st International Conference on Sustainability in Geotechnical Engineering – Geodiversity & Resilience**

Lizbona, Portugalska  
<http://icsge.lnec.pt/>

**4.-7.7.2021**

**11th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar**

Valletta, Malta  
[www.iwagpr2021.eu/](http://www.iwagpr2021.eu/)

**5.-8.7.2021**

**DFI Deep Mixing Conference 2021**

Gdansk, Poljska  
[www.dfi.org/dfieventlp.asp?13330](http://www.dfi.org/dfieventlp.asp?13330)

**2.-6.11.2021**

**5th World Landslide Forum**

Kjoto, Japonska  
<http://wlf5.iplhq.org/>

Rubriko ureja • **Eva Okorn**, ki sprejema predloge za objavo na e-naslov: [gradb.zveza@siol.net](mailto:gradb.zveza@siol.net)