

# Zračno lasersko skeniranje zasneženega površja

dr. Mihaela Triglav Čekada\* mag. Vasja Bric\*, Matija Klanjšček\*,  
Blaž Barborič\*, mag. Miha Pavšek\*\*

## Povzetek

V okviru čezmejnega projekta SI-AT: NH-WF smo izvedli prvo analizo uporabnosti zračnega laserskega skeniranja za preučevanje debeline snežne odeje. Podatek o višini snežne odeje nam lahko služi za modeliranje nevarnosti pred snežnimi plazovi, ugotavljanje območjih z napihanim snegom (zameti) ter za preučevanje vodnega ekvivalenta snega. Analiza je bila narejena na treh visokogorskih testnih območjih: Zelenica, Skuta in Triglav. Zaradi zelo majhne višine snežne odeje v zimi 2011/12 se večina ugotovitev nanaša na zadnji dve območji. Ugotovili smo, da lahko v laserskih podatkih ločimo med sabo moker in suh sneg glede na gostoto vrnjenih laserskih točk. Na treh manjših testnih območjih smo določili še podrobno višino snežne odeje.

Ključne besede: Lidar, sneg, višina snežne odeje, digitalni modeli višin (DMV)  
Key words: LiDAR, snow, snow depth, digital elevation model (DEM)

## Uvod

Preučevanje višine snežne odeje in izračun volumna snega je pomemben za preučevanje nastanka in dinamike snežnih plazov ter vpliva snega na hidrološke razmere. Snežni plazovi so sestavni del snežne erozije ter so močno odvisni od lokalnih topografskih in meteoroloških dejavnikov (strmina/naklon, odsotnost in višina vegetacije, reliefne oblike, zglajenost površja, temperatura snega, višina snežne odeje), ki vplivajo na akumulacijo in transport snega na določena območja (Pavšek, 2002). Debelina snega in dinamika njegovega taljenja močno vplivata tudi na količino in dinamiko odtekanja vode, ta pa na dinamiko rasti vegetacije ter količino pitne vode (Grünewald in drugi, 2010). Preučevanje spreminjanja vsakoletnih vzorcev debeline snežne odeje in dinamika taljenja snega v talilni sezoni v visokogorju nam dajo pomembne informacije o teh naravnih zbiralnikih vode.

Za preučevanje dinamike spreminjanja snežne odeje na širših območjih in ne samo točkovno, kot v primeru meteoroloških meritev, moramo uporabiti moderne metode daljinskega zaznavanja. Fotogrametrične metode pri preučevanju zasneženih območij velikokrat naletijo na težavo, saj ima površina snežne odeje ponavadi zelo malo ali nič teksture, ki bi jo lahko uporabili za stereo-zajem podrobnosti na snegu ali avtomatsko slikovno ujemanje. Danes se za manjše snežne plazove uporablja predvsem terestrično lasersko skeniranje, za obsežnejša območja npr. pri preučevanju visokogorskih zbiralnikov vode, pa zračno lasersko skeniranje (ZLS) (Prokop, 2008; Prokop in drugi, 2008; Prokop in Panholzer, 2009; Grünewald in drugi, 2010).

V sestavku predstavljamo prve rezultate izmere višine snežne odeje, ki smo jo opravili v okviru čezmejnega projekta Naravne nesreče brez meja (NH-WF, OP SI-AT 2007–2013) s pomočjo podatkov dveh zračnih laserskih skeniranj (lidar).

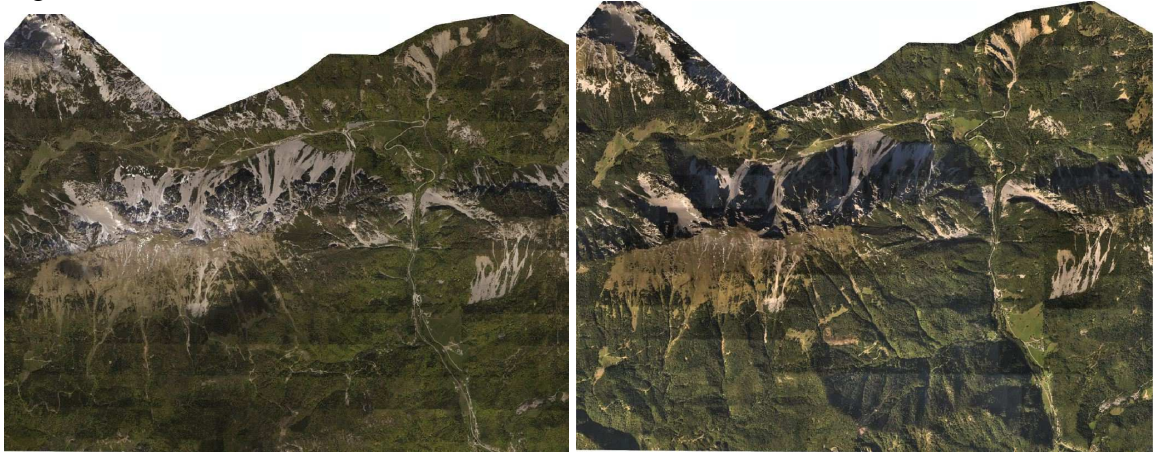
---

\* Geodetski inštitut Slovenije, Jamova 2, 1000 Ljubljana

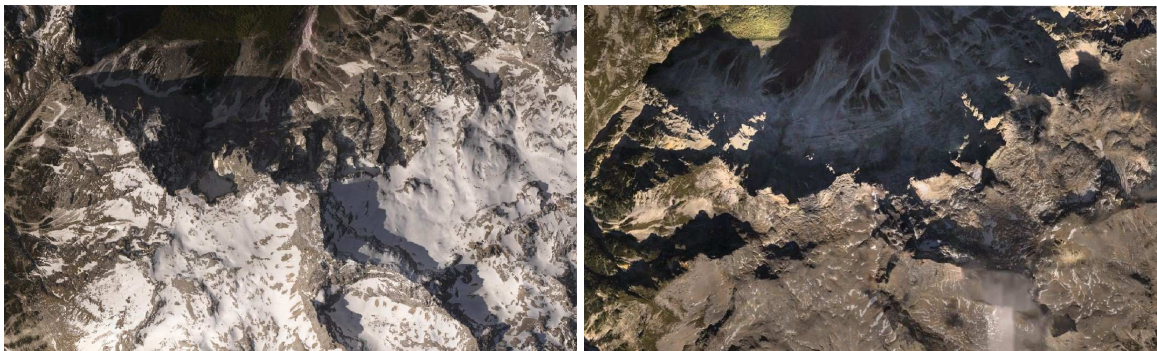
\*\* Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU, Gosposka ulica 13, 1000 Ljubljana

## Testna območja in podatki

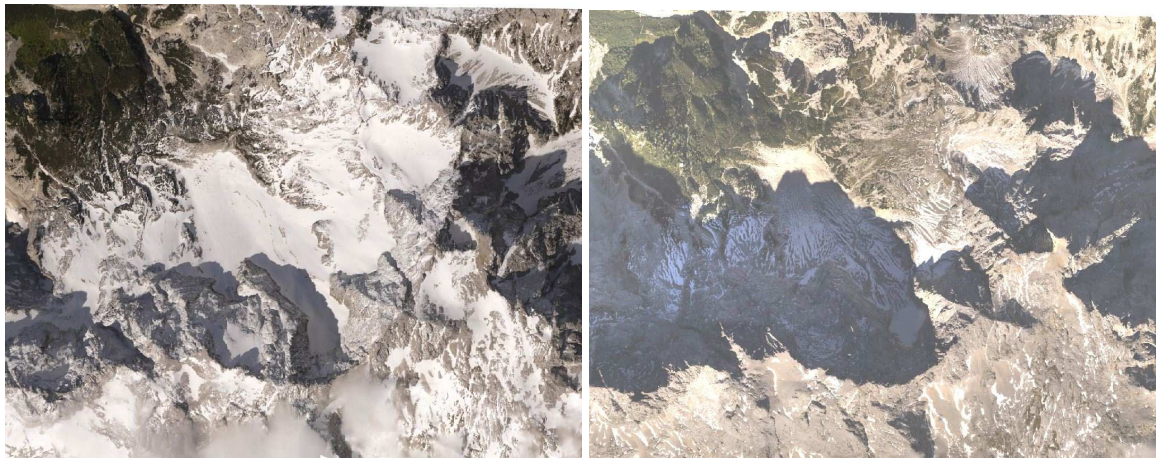
Ker je bila zima 2011/12 zelo sušna in z majhno količino padavin, tudi v visokogorju ni bilo veliko snega. Prvo resnejše sneženje v visokogorju smo dočakali šele v aprilu, ki je sicer znan kot mesec, v katerem lahko pričakujemo največjo višino snežne odeje (Cegnar in Roškar, 2004). Zato smo prvo zračno lasersko skeniranje z aerofotografiranjem (spomladansko snemanje) izvedli šele 15. 5. 2012 na Zelenici in Skuti in 18. 5. 2012 na Triglavu.



Območje Zelenica



Območje Triglavski podi



Območje Skute

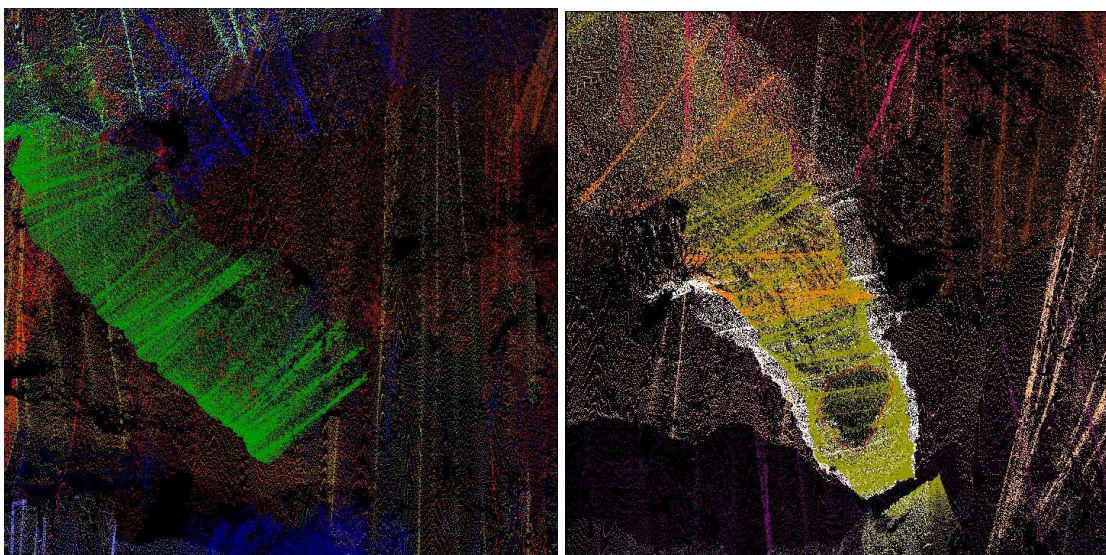
Slika 1 – Ortofotografije testnih območij maj (levo) in september (desno).

Drugo zračno lasersko skeniranje z aerofotografiranjem (jesensko snemanje), ki nam je služilo kot referenčni sloj brez snežne odeje, smo izvedli 18. 9. 2012. Žal nas je nekaj dni pred tem snemanjem že presenetil prvi sneg v visokogorju, ki je na dan snemanja še ostal v osojnih legah na testnih območjih Skute in Triglavskega ledenika (slika 1). V času obeh snemanj smo s terena izvedli tudi terensko fotografiranje detajlov zasneženih področij. Na obeh ledenikih pa smo v času drugega snemanja postavili tudi kontrolne točke v obliki pravokotnikov velikosti 1 m × 0,6 m (slika 2). Na testnem območju Triglavskih podov smo ob drugem snemanju izvedli še kontrolne GNSS-meritve, ki so nam služile za kasnejšo oceno natančnosti georeferenciranja laserskih podatkov.



Slika 2 – Namestitev kontrolnih točk na ledenik pod Skuto, 18. 9. 2012.  
Foto: Blaž Barborič.

Pri obeh snemanjih je bil uporabljen zračni laserski sistem Riegl LM5600 ter srednjeformatni kalibriran fotoaparater Hasselblad H39. Povprečna gostota laserskih točk na enoto površine je bila v obeh primerih 8 točk/m<sup>2</sup>. Samo snemanje je bilo izvedeno v obeh primerih na višini 700 m nad tlemi. Pri drugem snemanju, se je nad samima ledenikoma pod Skuto in Triglavom, izvedlo še en nižji snemalni pas na višini okoli 200 m, ki je nad ledenikoma občutno zgostil gostoto laserskih točk in povečal intenziteto odbitih laserskih točk na snegu (Šolar, 2012a, 2012b) (Slika 3).



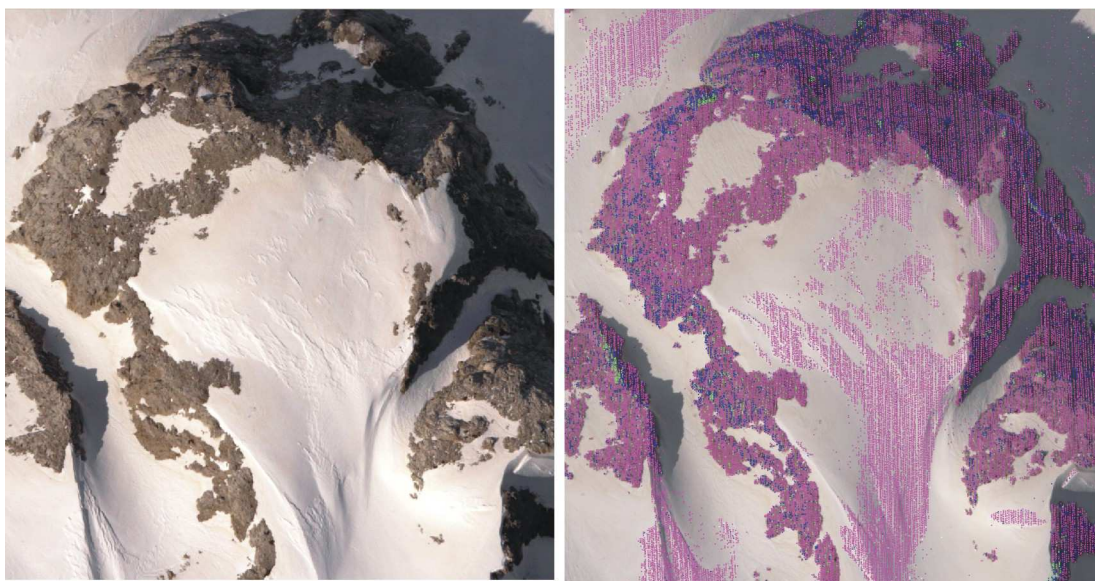
Slika 3 – Pasova z večjo gostoto laserskih točk (zeleno) na Triglavskih podih (levo) in pod Skuto (desno).

Območje Zelenice smo zaradi pomanjkanja snega ob prvem snemanju, izključili iz nadaljnje obravnave določanja debeline snežne odeje. Bomo pa podatke testnega območja Zelenice uporabili za preučevanje premikov prodišč, melišč in skalnih odlomov.

Pri preučevanju debeline snežne odeje smo med seboj primerjali dva digitalna modela višin (DMV), kjer predstavljajo laserske točke, posnete v maju, digitalni model površja (DMP), ki prikazuje sneg in laserske točke, posnete v septembru predstavljajo digitalni model reliefa brez snega (DMR). Georeferenciran oblak točk smo najprej filtrirali in klasificirali v oblak točk terena/snega in iz njega izdelali DMP/DMR z mrežo celic  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ . Na območjih s slabo odbojnostjo, kjer je bilo sorazmerno malo laserskih odbojev, predvsem v podatkih prvega laserskega skeniranja, smo DMP snega interpolirali.

### **Odbojnost laserske svetlobe na različnih tipih snega**

Če podrobno pogledamo ortofotografije in laserske podatke testnih območji na Skuti in Triglavu, v času prvega zasneženega snemanja, hitro ugotovimo, da sta bila v času snemanja prisotna vsaj dva tipa snega: moker in suh sneg. Moker sneg je bil v bistvu novi sneg, ki je zapadel nekaj dni pred snemanjem, suh sneg, pa je bil starejši sneg oz. napihan sneg (slika 4), večinoma v obliki trdih klož.

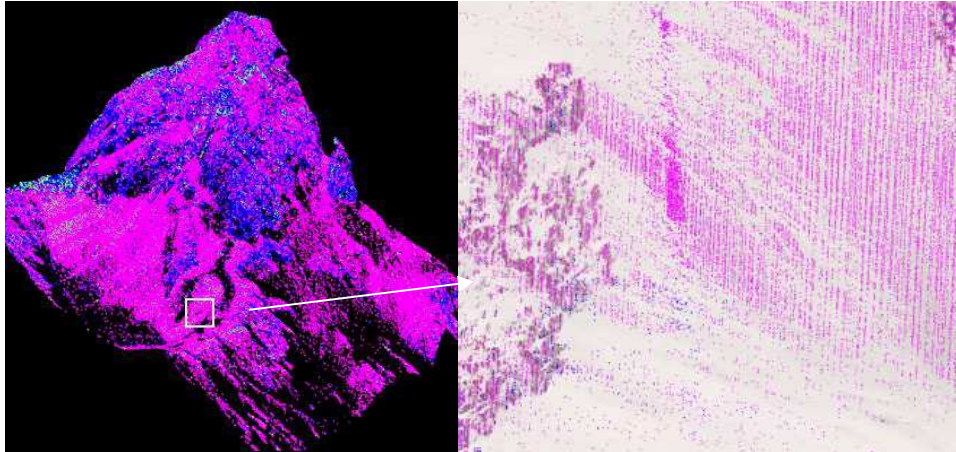


Slika 4 – Primer mokrega/novega in suhega/starega snega na Triglavskih podih: (levo) ortofoto, (desno) ortofoto podložen pod oblak laserskih točk.

Ugotovili smo, da je pri višini snemanja 700 m nad tlemi in v valovni dolžini 1550 nm, delež odboja laserskih točk od snega odvisen od vodnega ekvivalenta snega. Tako se od mokrega snega odbija zelo malo točk, od suhega snega pa več. Tudi, če spustimo višino snemanja na 200 m nad terenom še vedno opazimo zmanjšanje gostote laserskih točk na zasneženih oz. ledeniških površinah. Tako je na desni sliki 3 prikazan ledenik pod Skuto v rdečem zaprtem poligonu, kjer kljub nižji višini in višji gostoti laserskih točk opazimo manjšo gostoto laserskih točk na snegu v primerjavi s točkami odbitimi od skal.

Razlika v deležu vrnjenih odbojev na različnih vrstah snega glede na vsebnost vode nam omogoča tudi samodejno razvrstitev območij pokritih z različnimi vrstami snega. Zelo moker sneg je zelo slab odbojnik, saj se obnaša kot voda, ki ne omogoča sipanja laserske svetlobe nazaj k sprejemniku in je zato s topografskimi laserskimi sistemi ne moremo meriti. Kot voda se je obnašal tudi sneg na testnem območju Zelenice, ki se je v času snemanja ohranil samo v senčnih grapah in ga zato v laserskih podatkih hitro najdemo, saj gre za območja brez odboja.

Kako moker je sneg, je odvisno tudi od vertikalnega temperaturnega gradienta ter osončenosti. Sneg se prej in hitreje tali na nižji nadmorski višini in v prisojajih, zato je tam sneg hitreje in bolj moker kot višje in v osojajih. Tako lahko laserske podatke uporabimo tudi za preučevanje spreminjanja strukture snega zaradi nadmorske višine in osončenosti (slika 5). Na podrobnem prikazu slike 5 vidimo zmanjševanje gostote laserskih točk v navpični smeri, ki je deloma odvisno od zniževanja nadmorske višine (višje temperature ozračja), na desni strani pa tudi na račun večje osončenosti.



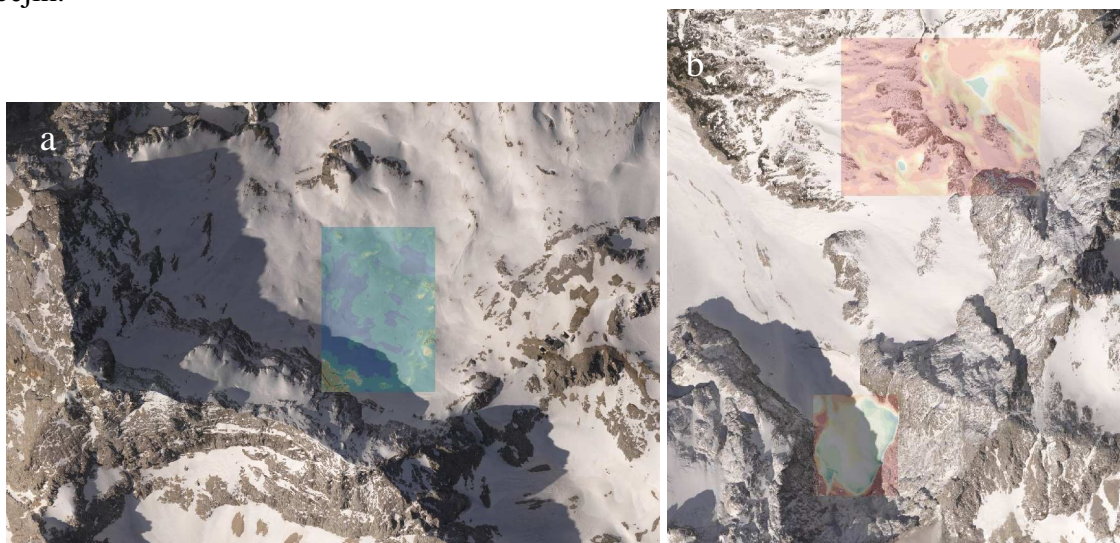
Slika 5 – Spreminjanje vodnatosti snega v odvisnosti od nadmorske višine in osončenosti.

### Višina snežne odeje

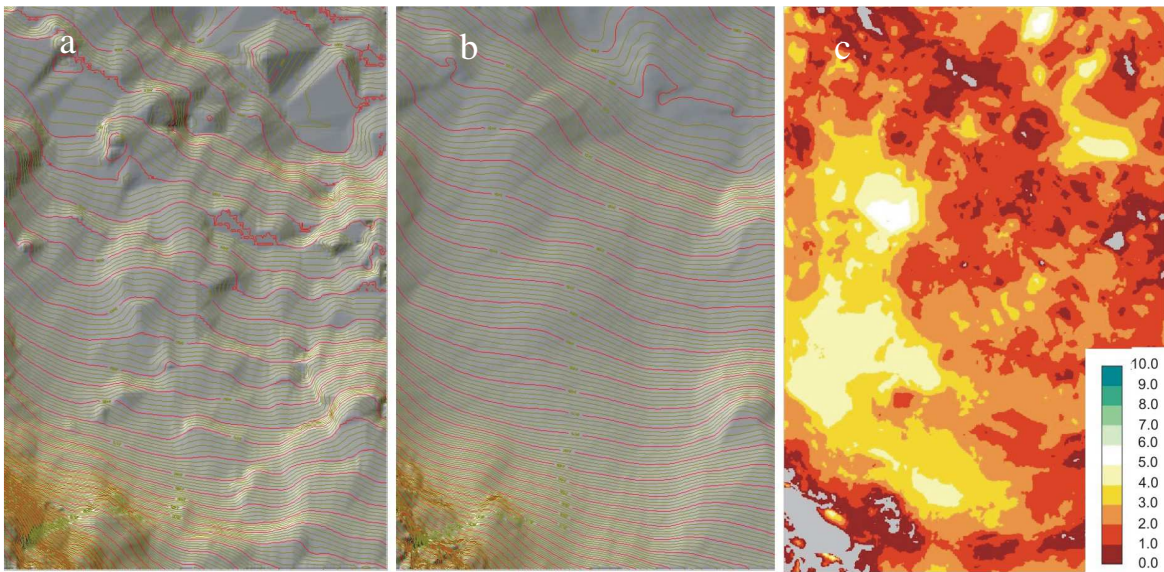
Da bi lahko preučevali samo razlike v višini snežne odeje, smo znotraj območij Triglava in Skute izbrali tri manjša območja, ki so bila v času zimskega snemanja skoraj v celoti pokrita s snegom (slika 6):

- območje Triglav vključuje Triglavski ledenik,
- območje Skuta 1 vključuje ledenik pod Skuto ter
- območje Skuta 2 vključuje snežišče ob markirani planinski poti proti Jezerskemu sedlu.

Na območju Triglava smo naredili dve primerjavi. Najprej smo primerjali spomladanski lidarski DMP snega  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  s fotogrametričnim DMR  $2\text{ m} \times 2\text{ m}$  izdelan na osnovi posebnega fotogrametričnega snemanja izdelanega v letu 2005 za potrebe preučevanja Triglavskega ledenika (Triglav in drugi, 2012). Na širšem območju Triglavskega ledenika prikazanem na sliki 7, je 62 % višinskih razlik med DMP snega in DMR v razredu med 2 in 6 m. Obarvanost višinskih razlik na sliki 6c je razponu od 0 do 10 m enako kot na sliki 8. V razredu od 0 do 8 m višinske razlike je 93 % meritev. Le 8 % višinskih razlik je večjih.



Slika 6 – Izbrana testna območja za določevanje debeline snega:  
a) Triglav, b) Skuta 1 (spodaj) in Skuta 2 (zgoraj).



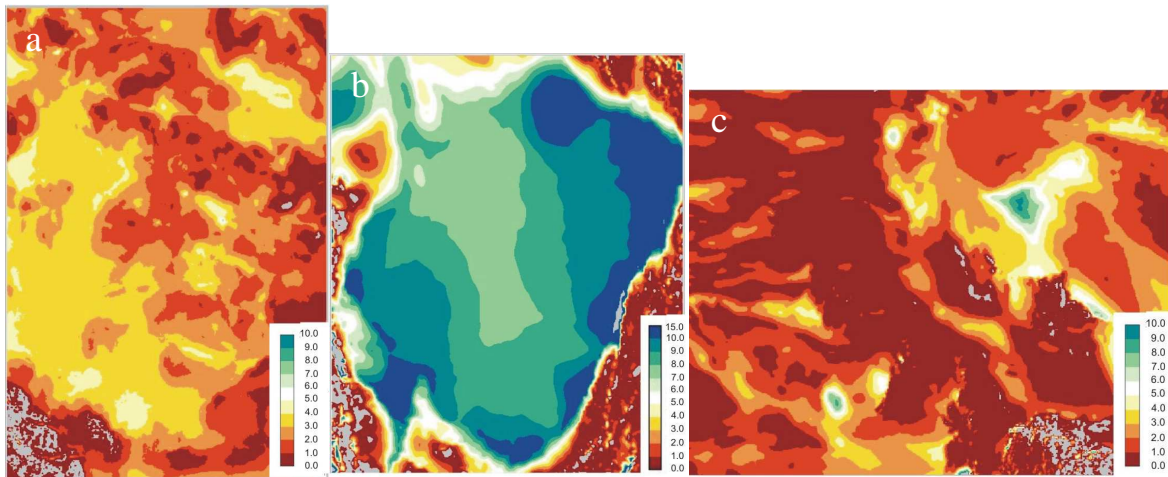
Slika 7 – Višinska ekvidistanca 1 m: a) fotogrametrični DMR 2 m×2 m 2005, b) lidarski DMP snega 1 m×1 m 2012, c) višinska razlika med lidarskim DMP in fotogrametričnim DMR.

Drugo primerjavo smo izvedli skupaj za vsa tri manjša testna območja med spomladanskim in jesenskim lidarskim snemanjem 2012, ugotavljali smo razliko med DMP snega 1 m ×1 m in DMR 1 m×1 m. Višinska razlika se je določala na vsaki celici DMR. Statistična primerjava med lidarskima DMP snega in DMR je prikazana v preglednici 1.

Preglednica 1 – Statistični podatki razlike med lidarskim DMP in DMR

| območja         | maks. in min. viš. razlika | povprečna vrednost | interval večine viš. razlik in delež točk v njem | št. točk preseka DMR |
|-----------------|----------------------------|--------------------|--|----------------------|
| Triglavski podi | 10,3 m -8,6 m              | 2,3 m              | 0 - 6 m 98,2 %                                   | 78200                |
| Skuta 1         | 41,7 m -8,3 m              | 6,8 m              | 0 – 12 m 95,0 %                                  | 27000                |
| Skuta 2         | 14,8 m -8,6 m              | 1,5 m              | 0 – 6 m 96,7 %                                   | 98000                |

Največje vrednosti, tako v pozitivne kot negativne, kažejo na postopek izdelave DMP in DMR in so nastale na strmih stenah, ki niso bila izločena iz območja testiranja. Vrednost vsake celice DMP/DMR oz. njena višina se izračunana na osnovi več laserskih točk, ki se nahajajo v celici. Povprečna vrednost kaže na povprečno višino snežne odeje, medtem, ko so razporeditve prikazane na sliki 8.



Slika 8 – Del območja Triglav a) in območji pod Skuto 1 b) in 2 c).

Obarvanost višinskih razlik na Triglavskih podih in na območju Skuta 2 je v razponu od 0 do 10 m, na območju Skuta 1 pa od 0 do 15 m. Sivo so obarvana območja, kjer so vrednosti negativne ali presegajo maksimalne višinske razlike, ki so običajno posledica napak na zelo strmih območjih, kjer že rahel zamik lokacije točk DMP pomeni grobo napako.

Na Triglavskih podih prevladuje sprememba višine snežne odeje od 1 do 4 m, na območju Skuta 1 od 7 do 15 m in na območju Skuta 2 od 0 do 2 m. Večje višine snežne odeje se, kot je pričakovano, pojavljajo po kotanjah in ob zelo strmih pobočjih ter v zatrepu krnic, kar je še posebej lepo vidno na območju Skuta 2, kjer leži ledenik pod Skuto. Tik ob stenah krnice ledenika pod Skuto smo izmerili višino snežne odeje kar od 10 do 15 m.

### Razprava in zaključki

Kot že omenjeno, nam lahko podatek o višini snežne odeje služi posredno tudi za ocenjevanje nevarnosti za proženje snežnih plazov kot tudi za vodnatost snežne odeje ob njenem spomladanskem taljenju in postopnem izginevanju. Če ta podatek dopolnimo še z informacijami o zgradbi in vodnatosti snežne odeje ter o geomorfoloških in vegetacijskih značilnostih površja na širšem območju (naklon snežišča, geološka zgradba in poraščenost podlage, zbirno območje posameznega snežnega plazov ali plazovitega območja – stene, krnice, kotanje, grape, žlebovi...), potem na temelju enkratnega zajema z eno tehnologijo razpolagamo z že dokaj kakovostnimi vhodnimi podatki, ki omogočajo natančnejše modeliranje nevarnosti proženja snežnih plazov. Čeprav so snežni plazovi pojav, ki se pojavlja v snežni sezoni v goratem svetu redno (seveda v odvisnosti od snežnih padavin in vremenskih vplivov ipd.) in so največkrat vezani predvsem na znana plazovita območja, pa ta pojav še vedno spremljata velika časovna in prostorska nepredvidljivost. Ta pa neposredno ali posredno pomeni tudi ogrožanje človeških življenj (zimske športne aktivnosti v gorskem svetu) in infrastrukturnih objektov (planinska, turistična dejavnost, visokogorske prometnice...). Vsak kamenček v mozaiku preprečevanja in boljšega poznavanja tovrstnih masnih oz. erozijskih pojavov je zato dobrodošel in opisana tehnika izmere višine snežne odeje z zračnim laserskim skeniranjem je pri tem lahko zelo koristno in uporabno dopolnilo v preventivnih dejavnostih. Slednje bomo lahko preverili že v



naslednjih snežnih sezonah v okviru priprave poskusnega lavinskega biltena za območje Srednjih Karavank.

V prihodnosti lahko pričakujemo prodor metode zračnega laserskega skeniranja tudi na področje kurative, torej njeno uporabo v obliki brezpilotnih zračnih plovil, ki bodo uporabljena v času velike ogroženosti pred snežnimi plazovi. V času velike ogroženosti pred snežnimi plazovi v tujini že sedaj uporabljajo za oceno ogroženosti helikopterske ogleda, ki jih opravijo člani lavinskih komisij.

### **Zahvala**

Analiza je bila narejena v okviru čezmejnega projekta Slovenija-Avstrija: Naravne nesreče brez meja (NH-WF). Za izvedbo laserskega skeniranja v oteženih vremenskih razmerah v visokogorju se zahvaljujemo izvajalcu snemanja Flycom d.o.o.

### **Literatura**

- Cegnar, T., Roškar, J. 2004. Meteorološka postaja Kredarica 1954-2004, Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana.
- Grünwald, T., Schirmer, M., Mott, R., Lehning, M. 2010. Spatial and temporal variability of snow depth and ablation rates in small mountain catchment, *The Cryosphere*, 4.
- Pavšek, M. 2002. Snežni plazovi v Sloveniji (geografske značilnosti in preventiva), Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU, Ljubljana.
- Prokop, A. 2008. Assessing the applicability of terrestrial laser scanning for spatial snow depth measurements, *Cold Region science and Technology*, doi: 10.1016/j.coldregions.2008.07.002.
- Prokop, A., Schirmer, M., Rub, M., Lehning, M., Stocker, M. 2008. A comparison of measurement methods: terrestrial laser scanning, tachymetry and snow probing for the determination of the spatial snow-depth distribution on slopes, *Annals of Glaciology*, 49.
- Prokop, A., Panholzer, H. 2009. Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9.
- Šolar, L. 2012a. Lidarski georeferenciran oblak točk in aerofotografije, Tehnično poročilo, FlyCom d.o.o., 20. 7. 2012.
- Šolar, L. 2012b. Lidarski georeferenciran oblak točk in aerofotografije, Tehnično poročilo, FlyCom d.o.o., 26. 11. 2012.
- Triglav Čekada, M., Zorn, M., Kaufmann, V., Lieb, G.K., 2012. Merjenje malih alpskih ledenikov: primeri iz Slovenije in Avstrije, *Geodetski vestnik*, 56:3.