

Panta Rhei: Movement Change of Tschadinhorn Rock Glacier (Hohe Tauern Range, Austria), 1954–2017

Viktor KAUFMANN¹, Wolfgang SULZER², Gernot SEIER², Matthias WECHT²

¹ Institute of Geodesy, Graz University of Technology, Steyrergasse 30, 8010 Graz, Austria
viktor.kaufmann@tugraz.at

² Institute of Geography and Regional Science, University of Graz, Heinrichstraße 36, 8010 Graz, Austria
wolfgang.sulzer@uni-graz.at, gernot.seier@uni-graz.at, matthias.wecht@uni-graz.at

Abstract. In this paper we present a reconstruction of the kinematics of the Tschadinhorn rock glacier using multi-temporal conventional (metric) aerial photographs (1954–2015) and additional non-metric aerial photographs (2016, 2017) taken with in-house unmanned aerial vehicles (UAVs). A rotary-wing aircraft (hexacopter twinHEX v.3.0) was used in 2016 and a fixed-wing aircraft (QuestUAV) in 2017. The historical image data was acquired from the Austrian Federal Office of Metrology and Surveying (BEV). Both a digital orthophoto (DOP) and a digital terrain model (DTM) were computed for each given epoch. Precise georeferencing of the image data was carried out in the Austrian Gauss-Krüger M31 coordinate system using available aerotriangulations (ATs) of BEV and additional ground control points (GCPs) measured geodetically during both UAV campaigns. Change detection analysis provided multi-temporal 2D flow velocity fields. Subsequently, these data were collated to produce a simpler velocity graph showing clearly the temporal evolution of the flow velocity of Tschadinhorn rock glacier: A maximum mean annual flow velocity of 3.28 m/year was obtained for 2014–2015, while the lowest annual flow velocity of 0.16 m/year was observed for 1969–1974. The velocity graph also revealed that 1954–2009 was characterized by generally moderate activity (0.16 – 0.79 m/year) and that much higher flow velocities have prevailed since 2009. The present value for 2016–2017 is 1.92 m/year.

Keywords: permafrost, rock glacier, flow velocity, photogrammetry, UAV, environmental change, Tschadinhorn

1 Introduction

Rock glaciers are creep phenomena of mountain permafrost, responsible for extensive mass transport in alpine environments (Barsch 1996). They are composed of rock debris and ice and move downslope by force of gravity due to a combination of plastic deformation of the ice and internal sliding processes. Rock glaciers can be found in all high mountain ranges on the Earth. The movement of (active) rock glaciers is generally not constant over time but changes within different time scales, i.e. seasonally, annually, or even over decades. This depends on

various parameters, such as topography and geographical setting, internal structure and ice content, and environmental factors (air/ ground surface temperature, precipitation). It is believed that mid- to long-term changes in the flow velocity of rock glaciers can be attributed to climate change, i.e. atmospheric warming/cooling (cp. Kellerer-Pirklbauer and Kaufmann, 2012).

The main goal of the work described in this paper was to reconstruct the surface movement (kinematics) of the Tschadinhorn rock glacier for the period 1954 to 2017 on a multi-annual to inter-annual time scale. The results obtained are intended to provide a

Panta Rhei: promjena kretanja kamenog glečera Tschadinhorn (planinski lanac Hohe Tauern, Austrija), 1954–2017

Viktor KAUFMANN¹, Wolfgang SULZER², Gernot SEIER², Matthias WECHT²

¹ Institute of Geodesy, Graz University of Technology, Steyrergasse 30, 8010 Graz, Austrija
viktor.kaufmann@tugraz.at

² Institute of Geography and Regional Science, University of Graz, Heinrichstraße 36, 8010 Graz, Austrija
wolfgang.sulzer@uni-graz.at, gernot.seier@uni-graz.at, matthias.wecht@uni-graz.at

Članak je predan na engleskom jeziku. Na hrvatski ga je preveo V. Lapaine.
[The paper was submitted in English. It was translated into Croatian by V. Lapaine.](#)

Sažetak. U radu se prikazuje rekonstrukcija kinematike kamenog glečera Tschadinhorn upotrebom viševremenskih konvencionalnih (mjernih) fotografija snimljenih iz zraka (1954–2015) i dodatnih nemjernih fotografija snimljenih iz zraka (2016, 2017) bespilotnim letjelicama (*unmanned aerial vehicles* – UAV). Letjelica s rotirajućim krilima (hexacopter twinHEX v.3.0) upotrebljena je 2016. godine, a letjelica s nepokretnim krilima (QuestUAV) upotrebljena je 2017. Povijesni slikovni podaci dobiveni su od Austrijskog federalnog ureda za metrologiju i izmjeru (Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen – BEV). Za svako su razdoblje izračunani digitalni ortofoto (DOP) i digitalni model reljefa (*digital relief model* – DTM). Precizno georeferenciranje slikovnih podataka provedeno je u austrijskom koordinatnom sustavu Gauss- Krüger M31 upotrebom aerotriangulacija (AT) dobivenih od BEV-a i dodatnim kontrolnim točkama na tlu (*ground control point* – GCP) geodetski izmjerenih tijekom obaju izmjera bespilotnim letjelicama. Analiza otkrivanja promjena rezultirala je viševremenskim dvodimenzionalnim poljem brzina kretanja. Nakon toga, podaci su sređeni kako bi se dobio jednostavniji grafički prikaz brzine koji jasno pokazuje razvoj brzine kretanja kamenog glečera. Najveća prosječna godišnja brzina kretanja od 3,28 metra u godini dobivena je u razdoblju 2014–2015, dok je najmanja godišnja brzina od 0,16 metra u godini opažena u razdoblju 1969–1974. Na grafičkom prikazu brzine također se vidi da je razdoblje 1954–2009 bilo karakterizirano uglavnom umjerenom aktivnošću (0,16 – 0,79 metra u godini) te da od 2009. prevladavaju mnogo veće brzine kretanja. Trenutačna vrijednost za 2016–2017 iznosi 1,92 metra u godini.

Ključne riječi: permafrost, kameni glečer, brzina kretanja, fotogrametrija, UAV, promjena okoliša, Tschadinhorn

1. Uvod

Kameni glečeri karakteristični su za planinski permafrost i odgovorni su za velika kretanja u alpsko-me okolišu (Barsch 1996). Sastoje se od krhotina stijena i leda i kreću se nizbrdo zbog gravitacije, plastičnih deformacija leda i unutarnjih procesa klizanja. Kameni glečeri mogu se pronaći na svim visokim planinskim lancima na Zemlji. Kretanje (aktivnih) kamenih glečera načelno nije konstantno, već se mijenja u odnosu na godišnja doba, godine, pa čak i desetljeća. Ono ovisi o različitim parametrima, kao što su topografija i geografske okolnosti, unutarnja struktura i količina

leda te okolinski čimbenici (temperatura zraka i površine tla, oborine). Vjeruje se da srednjoročne i dugoročne promjene u brzini kretanja kamenih glečera možemo pripisati klimatskim promjenama, odnosno atmosferskom zatopljenju/zahladnjenju (usp. Kellerer-Pirklbauer i Kaufmann 2012).

Glavni cilj istraživanja opisanog u ovome radu bio je rekonstruirati površinsko kretanje (kinematiku) kamenog glečera Tschadinhorn u razdoblju od 1954 do 2017 na godišnjoj i međugodišnjoj vremenskoj ljestvici. Dobiveni rezultati namijenjeni su kao temelj za istraživanje klimatskih promjena i opširna morfološka istraživanja.

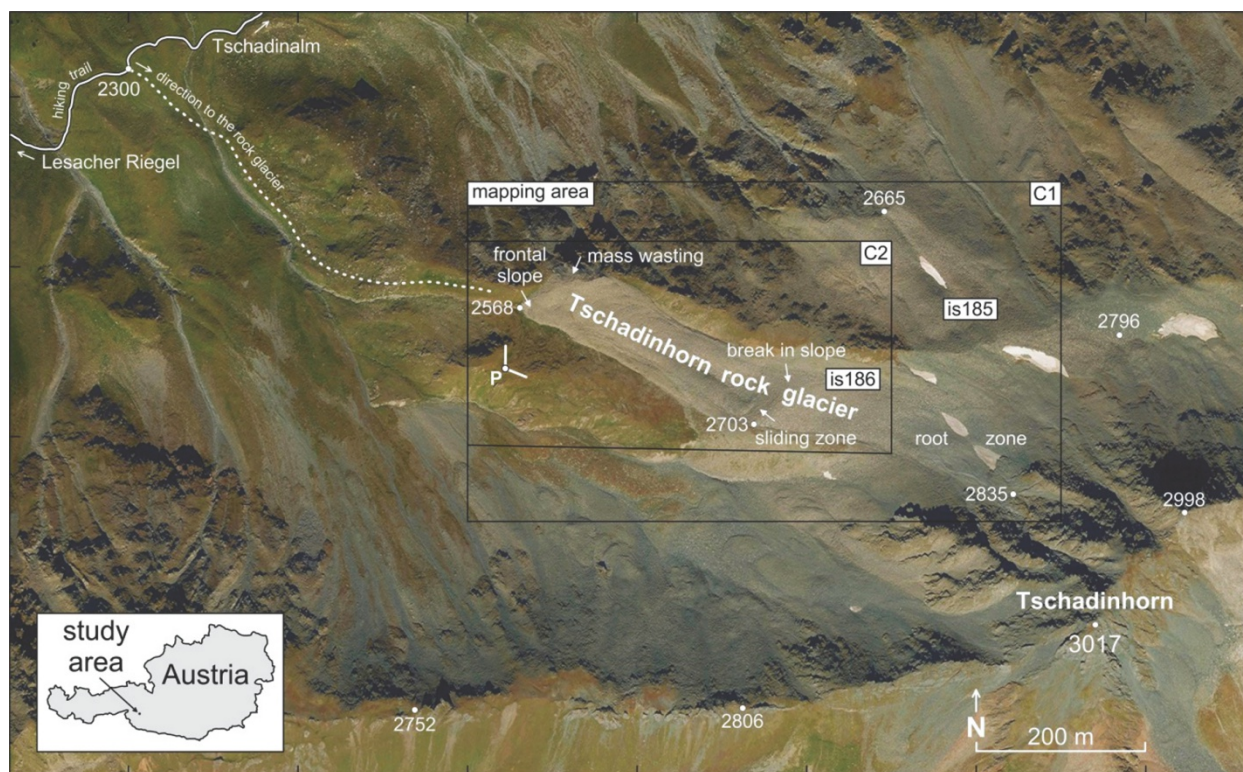


Fig. 1 Location map showing Tschadinhorn rock glacier and the surrounding area. Mapping areas C1 and C2 are outlined by boxes. Orthophoto taken on 28 August 2015. P indicates the position where the panoramic photo of Figure 2 was taken.

Slika 1. Karta koja prikazuje položaj kamenoga glečera Tschadinhorn i okolno područje. Područja kartiranja C1 i C2 uokvirena su. Ortofoto je snimljen 28. kolovoza 2015. P označava položaj s kojega je snimljena panoramska fotografija prikazana na sl. 2.

basis for investigating climate change and more in-depth morphological studies.

The remainder of the paper is structured as follows: Section 2 gives a brief introduction to the study area. This is followed by a summary of previous work carried out in the study area in Section 3. Section 4 presents the data used in the study. The methods applied in georeferencing both metric and non-metric image data and subsequent change detection based on digital orthophotos (DOPs) and digital terrain models (DTMs) are addressed in Section 5. The results obtained are presented in Section 6. The paper concludes with a discussion and an outlook.

2 Study Area

The Tschadinhorn rock glacier ($46^{\circ}59'38''$ N, $12^{\circ}51'47''$ E, see Figures 1 and 2) is located in the Schober Mountains, East Tyrol, Austria, and is also part of the Hohe Tauern National Park. The tongue-shaped, northwest-facing permafrost body extends between approximately 2835 m (upper limit of the

root zone) and 2568 m (lower end of the tongue). The main part of the flow structure covers an area of approximately 5.35 hectares and is 640 m long and between 80 and 100 m wide. Characteristically, this rock glacier covers an area from a less inclined upper zone to a lower-lying valley-confined runout zone, passing an intermediate steep sliding zone. Sequences of superficial furrows and ridges in the runout zone, with recently developed tension cracks in the sliding zone, indicate the rock glacier's high activity. In fact, it acts like a bulldozer, breaking the ground/sod at the glacier's snout (see Figure 2). Marked down-wasting of rock glacier material occurs on the orographic right side close to the frontal slope, where the rock glacier overruns its confining terrain. The detached material seems to get completely dispersed on the steep slopes below the escarpment. Distinct levees on both sides also provide evidence of surface height change and movement. The active flow structure appears to have overridden at least one older, probably relict rock glacier. In a previous pilot study, Kaufmann (2010) was able to verify high annual flow velocities in the order of



Fig. 2 Terrestrial view of Tschadinhorn rock glacier as seen from photo standpoint P (indicated in Figure 1), from north to east. See people in the foreground for scale. Panoramic photo taken on 26 July 2016 by V. Kaufmann.
Slika 2. Terestrički pogled na kameni glečer Tschadinhorn viđen s točke P (označene na sl. 1), sa sjevera prema istoku. Usporedi s veličinom ljudi u prvome planu. Panoramsku fotografiju snimio je V. Kaufmann 26. srpnja 2016.

Ostatak rada strukturiran je na sljedeći način: u drugome dijelu dan je kratki uvod u područje istraživanja. U trećem dijelu slijedi sažetak prethodnih istraživanja u tom području. Podaci upotrebjeni u istraživanju prikazani su u četvrtom dijelu. Metode primijenjene u georeferenciranju mjernih i nemjernih slikovnih podataka te posljedično otkrivanje promjena utemeljeno na digitalnom ortofotu (DOP) i digitalnim modelima reljefa (DTM) opisane su u petom dijelu. Dobiveni rezultati prikazni su u šestom dijelu. Rad završava raspravom i smjernicama za daljnja istraživanja.

2. Područje istraživanja

Kameni glečer Tschadinhorn ($46^{\circ}59'38''$ sjeverne geografske širine, $12^{\circ}51'47''$ istočne geografske dužine, vidi sl. 1 i 2) nalazi se na planini Schober u istočnome Tirolu u Austriji, a dio je Nacionalnoga parka Hohe Tauern. Permafrost u obliku jezika usmjerenog prema sjeverozapadu proteže se od približno 2,835 m (gornja granica korijena) do 2,568 m (donji kraj jezika). Glavni dio strukture tijeka pokriva površinu od približno 5,35 hektara i dugačak je 640 m, a širok između 80 i 100 m. Glečer je karakterističan po tome što pokriva područje od manje nagnutoga gornjeg područja do donjeg-ležećeg područja odstupanja

ograničenog na dolinu, prolazeći kroz srednje strmo klizno područje. Nizovi površinskih brazdi i grebena u području odstupanja, s nedavno razvijenim pukotinama u kliznome području, ukazuju na veliku aktivnost kamenog glečera. Štoviše, djeluje kao buldožer, lomeći tlo i travnjake na kraju glečera (vidi sl. 2). Značajno trošenje kamenoga glečera događa se na orografskoj desnoj strani blizu prednje padine, gdje kameni glečer prelazi preko ograničavajućeg terena. Čini se da je odvojen materijal u potpunosti raspršen na strmim padinama ispod odrona. Izraženi nasipi s obje strane također su dokaz promjene površinske visine i kretanja. Čini se da je aktivna struktura pomicanja oborila barem jedan stariji kameni glečer. U prethodnome pilot-istraživanju, Kaufmann (2010) je utvrdio velike godišnje brzine kretanja kamenog glečera Tschadinhorn, reda veličine od nekoliko metara (za detalje, vidi sljedeći dio).

Istraživanje opisano u ovom radu obuhvatilo je dva pravokutna područja kartiranja, C1 s umetkom C2, prikazane na sl. 1. Područje kartiranja C1 zapravo se sastoji od dvaju kamenih glečera, Tschadinhorna i još jednoga, koji se nalazi sjeveroistočno od njega. Ta su dva kamena glečera označena kao “is186” i “is185” u popisu kamenih glečera istočnih europskih Alpi koji su sastavili Kellerer-Pirklbauer, Lieb i Kleinfertner (2012). Taj popis također sadrži poligone koji

Table 1 Aerial surveys 1954–2015.
Tablica 1. Izmjere iz zraka 1954–2015.

| Date/ Datum | Mean flying height above ground (m)/ Prosječna visina leta iznad tla (m) | Camera type/ Tip kamere | Scale/ GSD* (cm)/ Mjerilo / GSD* (cm) | Remarks/ Napomene |
|----------------|---|----------------------------|--|---|
| 24. 9. 1954 | 3250 | Analogue/ Analogna | 1:15,450 / 23 | B&w, fresh snow cover/ C/b, svjež snježni pokrov |
| 29. 9. 1969 | 4345 | Analogue/ Analogna | 1:28,460 / 43 | B&w/ C/b |
| 6. 9. 1974 | 2080 | Analogue/ Analogna | 1:12,830 / 12 | B&w C/b |
| 9. 10. 1981 | 4660 | Analogue/ Analogna | 1:30,400 / 46 | B&w C/b |
| 18. 9. 1992 | 3000 | Analogue/ Analogna | 1:13,970 / 21 | False colour IR/ Lažna boja IR |
| 18. 9. 2002 | 4050 | Analogue/ Analogna | 1:13,280 / 20 | Colour/ U boji |
| 21. 9. 2006 | 4630 | Analogue/ Analogna | 1:15,250 / 23 | Colour/ U boji |
| 8. 9. 2009 | 4880 | Analogue/ Analogna | 1:15,970 / 24 | Colour/ U boji |
| 28. 8. 2012 | 2070 | Digital/ Digitalna | (1:22,450) / 13 | R, G, B, NIR/ Crvena, zelena, crna, NIR |
| 28. 8. 2015 | 3060 | Digital/ Digitalna | (1:30,560) / 16 | R, G, B, NIR Crvena, zelena, crna, NIR |

*... ground sampling distance/ *... udaljenost uzorkovanja tla (ground sampling distance)

magnitude of several metres at Tschadinhorn rock glacier (for details, see next section).

The research presented in this paper covers two rectangular mapping areas, C1 with inset C2, as shown in Figure 1. Mapping area C1 actually comprises two active rock glaciers, Tschadinhorn, and another, located to its northeast. The two rock glaciers are indexed as “is186” and “is185”, respectively, in the rock glacier inventory of the eastern European Alps compiled by Kellerer-Pirklbauer, Lieb and Kleinfelchner (2012). This inventory also includes confining polygons describing the limits of both rock glaciers. Later in this paper (Section 6) we use these polygons to mask the flow velocities obtained, fully aware that the polygons do not exactly match the present extent of the rock glaciers.

3 Previous Work

The Tschadinhorn rock glacier was first studied by Buchenauer (1990). The author measured the temperature of its springs and carried out sledge-

hammer seismic refraction field measurements on two profiles. From these measurements he concluded that permafrost must be present. He also realized the rock glacier was highly active through analysing the peculiarities of its surface topography. Kaufmann (2010) used digital backdrop orthophotos of digital globes, *Google Maps* and *Microsoft Bing Maps*, to visually screen for fast-moving rock glaciers in the Schober Mountains. The Tschadinhorn rock glacier was identified as highly active (due to large image parallaxes), and subsequent image-based measurements revealed maximum flow velocities of up to 1.24 m/year for the period 2002–2006. In a follow-up study, Kaufmann and Kellerer-Pirklbauer (2015) used governmental GIS data (digital orthophotos from 2002, 2006, and 2012) to retrieve flow velocity fields with higher spatial resolution and better accuracy. The results obtained were improved in two additional studies (Filwarny and Wisiol, 2012; Mikl, 2015) carried out by students who worked with the original aerial photographs (the methodological details are discussed in Section 5). A preliminary evaluation of the

označuju granice obaju kamenih glečera. Kasnije u radu (u šestome dijelu) rabimo te poligone kako bismo maskirali dobivene brzine kretanja, u potpunosti svijesni da ti poligoni ne odgovaraju u potpunosti trenutačnome stanju tih ledenih glečera.

3. Prethodna istraživanja

Kameni glečer Tschadinhorn prvi je istraživao Buchenauer (1990). Mjerio je temperaturu njegovih izvora i odredio seizmička refrakcijskih polja na dva profila upotrebom teških čekića. Zaključio je da se na tom mjestu mora nalaziti permafrost. Također je na temelju neobičnosti u površinskoj topografiji shvatio da je kameni glečer vrlo aktivan. Kaufmann (2010) je upotrijebio digitalni pozadinski ortofoto digitalnih globusa, *Google Maps* i *Microsoft Bing Maps*, kako bi vizualnim putem utvrdio kamene glečere brzoga kretanja na planini Schober. Kameni glečer Tschadinhorn okarakteriziran je kao vrlo aktivan (zbog velikih paralaksi slika), a naknadna mjerenja na slikama otkrila su najveće brzine tijekom do 1,24 metra u godini u razdoblju 2002–2006. U natavku istraživanja, Kaufmann i Kellerer-Pirklbauer (2015) upotrijebili su vladine podatke GIS-a (digitalni ortofoto iz 2002., 2006. i 2012.) kako bi dobili polja brzine tijekom više različitosti i točnosti. Dobiveni podaci poboljšani su u dva dodatna istraživanja (Filwarny i Wisiol 2012, Mikl 2015) koja su proveli studenti koji su radili s originalnim fotografijama snimljenim iz zraka (o metodološkim detaljima raspravlja se u petom dijelu). Preliminarna evaluacija istraživanja iz zraka bespilotnim letjelicama provedenoga 2016. godine opisana je u članku Kaufmanna i dr. (2017).

4. Podaci

Naše se istraživanje u velikoj mjeri temelji na evaluaciji povijesnih/arhivskih fotografija dobivenih od BEV-a i Ureda Tirolske Regionalne Vlade (*Tiroler Rauminformationssystem – TIRIS*). Novije fotografije snimljene iz zraka dobivene su vlastitim bespilotnim letjelicama koje su snimale podatke tijekom više godina. Geodetska mjerenja i digitalni model površine (*digital surface model – DSM*) utemeljen na laserskom snimanju iz zraka (*airborne laser scanning – ALS*) također su uzeti u obzir.

4.1. Mjerne fotografije snimljene iz zraka

U BEV-u se čuva se velika arhiva povijesnih fotografija snimljenih iz zraka, od kojih najstariji primjerci

datiraju s početka 1950-ih godina. Novije izmjere iz zraka uglavnom su provedene u bliskoj suradnji s uredima regionalnih vlada. Od 2010. godine BEV svake tri godine fotografijama snimljenima iz zraka pokriva cijeli teritorij (BEV 2018). U našem istraživanju upotrijebili fotografije snimljene iz zraka u 10 različitih epoha (tablica 1). Kako bi se podržalo kartiranje upotrijebljeni su protokoli kalibracije kamera. Analogne fotografije skenirane su u različitosti od 15 μ m fotogrametrijskim skenerom firme Carl Zeiss.

4.2. Nemjerne fotografije snimljene iz zraka

Dvije izmjere iz zraka provedene su u ljeto 2016. i 2017. vlastitim bespilotnim letjelicama kako bi se popunila praznina od posljednje (2015) do sljedeće planirane izmjere BEV-a. Letjelica s rotirajućim krilima (hexacopter twinHEX v.3.0) upotrijebljena je 2016. godine. Za usporedbu, u približno isto vrijeme 2017. puštene su četiri različite bespilotne letjelice. Međutim, u našem istraživanju analizirali smo podatke samo jedne letjelice s nepokretnim krilima, QuestUAV. Obje su letjelice nosile (nekalibrirane) pristupačne digitalne kamere koje snimaju nemjerne slikovne podatke (tablica 2). Izmjera iz zraka provedena 2016. godine ometana je (još uvijek nepoznatim) tehničkim poteškoćama u točnom letenju prema prethodno izračunanim točkama. Stoga područje kartiranja nije potpuno i sastoji se od dvaju međusobno nepovezanih dijelova. Povrh toga, mnoge su fotografije isključene iz obrade jer su bile vrlo mutne.

4.3. Geodetska mjerenja

Godine 2014. uspostavljena je geodetska mreža od 14 točaka na aktivnom dijelu kamenog glečera i 4 stabilne referentne točke u okolnom području. Od tada se svake godine krajem kolovoza provode geodetska mjerenja. Ta godišnja mjerenja pomažu pri bilježenju kinematičkog stanja kamenog glečera, primjerice s pomoću prosječnih godišnjih brzina kretanja. Precizno (± 2 –3 cm) određivanje položaja točaka temelji se na tehnici RTK-GNSS (Leica GNSS prijamnik GS15) uz upotrebu virtualne bazne stanice (usluga APOS BEV-a). Tijekom mjerenja bespilotnim letjelicama provedena su dodatna mjerenja, a sastojala su se od (i) svih točaka u postojećoj mreži i (ii) dodatnim točkama smještenim na kamenom glečeru i izvan njega, privremeno označenim ciljevima izrađenim od plastične folije. Slika 3 pokazuje spomenute točke za 2017. te odgovarajuće vektore kretanja

Table 2 2016 and 2017 aerial surveys using unmanned aerial systems (YouTube, 2018).**Tablica 2.** Izmjere iz zraka provedene bespilotnim letjelicima 2016. i 2017. godine (YouTube 2018).

| Date/ Datum | UAS/UAV | Type/ Tip | Number of photographs*/ Broj fotografija* | Digital camera/ Digitalna kamera | GSD* (cm) |
|----------------|-----------------------------|---------------------------------------|--|---|----------------------------|
| 26. 7. 2016 | hexacopter twinHEX v.3.0 | Rotary-wing/ s rotirajućim krilima | 13 (western part)/ 13 (zapadni dio) 4 (eastern part)/ 4 (istočni dio) | Ricoh GXR A12 | 4.5 / 4,5 4.4 / 4,4 |
| 22. 8. 2017 | QuestUAV | Fixed-wing/ s nepokretnim krilima | 68 | Sony ILCE-6000 | 5.1 / 5,1 |

+... used in the photogrammetric mapping/ +... upotrebljen pri fotogrametrijskom kartiranju

* ... ground sampling distance/ * ... udaljenost uzorkovanja tla

Table 3 Overview of 2016 and 2017 geodetic measurements.**Tablica 3.** Pregled geodetskih mjerenja provedenih 2016. i 2017. godine.

| Date/ Datum | Number of points in the geodetic network/ Broj točaka u geodetskoj mreži | | Number of additional points/ Broj dodatnih točaka | |
|----------------|---|--|--|--|
| | On the rock glacier/ Na kamenom glečeru | Outside the rock glacier/ Izvan kamenog glečera | On the rock glacier/ Na kamenom glečeru | Outside the rock glacier/ Izvan kamenog glečera |
| 27. 7. 2016 | 14 | 1 | 3 | 12 |
| 25. 8. 2016 | 14 | 4 | – | – |
| 28. 8. 2017 | 14 | 3 | 6 | 18 |

2016 UAV-based aerial survey can be found in Kaufmann et al. (2017).

4 Data

The present study is based to a great extent on the evaluation of historical/archived aerial photographs provided by the Austrian Federal Office of Metrology and Surveying (BEV, Vienna) and the Office of the Tyrolean Regional Government (TIRIS). More recent aerial photographs were acquired in-house using our own unmanned aerial systems (UASs) providing interannual image data. Geodetic measurements and a digital surface model (DSM) based on airborne laser scanning (ALS) were also considered in the evaluation process.

4.1 Metric aerial photographs

The BEV holds a large archive of historical aerial photographs dating back to the early 1950s. More

recent aerial surveys have been typically carried out in close cooperation with regional government offices. Since 2010, the BEV has covered the whole territory of Austria with aerial photographs every three years (BEV, 2018). In our study, we used aerial photographs from 10 different epochs (Table 1). Camera calibration protocols were also provided to sustain metric mapping. The analogue photographs were scanned at 15 μm resolution using a Carl Zeiss photogrammetric scanner.

4.2 Non-metric aerial photographs

Two dedicated aerial surveys were carried out in the summers of 2016 and 2017 using different in-house unmanned aerial systems (UASs) to fill the data gap from the last (2015) to the next scheduled BEV aerial survey (2018). In 2016, a rotary-wing aircraft (hexacopter twinHEX v.3.0) was used. For reasons of comparison, four different unmanned aerial

dobivene iz godišnjih geodetskih mjerenja (25. 8. 2016. – 22. 8. 2017.). U 2016. godini, izmjera bespilotnim letjelicama nije se poklapala s predviđenim godišnjim geodetskim mjerenjima (usp. tablicu 3) koja su provedena krajem srpnja, dan nakon leta bespilotnih letjelica.

4.4. Podaci laserskog skeniranja iz zraka

Podatke laserskog skeniranja iz zraka (*airborne laser scanning* – ALS) iz 2009. godine ustupio nam je TIRIS u dvama formatima, (1) kao digitalni model površine (*digital surface model* – DSM) koji prikazuje općenitu površinu Zemlje, uključujući vegetaciju i umjetne objekte, te (2) kao digitalni model terena (*digital terrain model* – DTM) koji prikazuje golu površinu. Oba su modela rasterska, s rezolucijom od 1 metra. U našem istraživanju šrafiranje reljefa digitalnog modela terena izgleda glađe nego ono temeljeno na digitalnom modelu površine. Očito je da su ulazni podaci (digitalni reljef površine) do neke mjere filtrirani, što je neizbježno, unatoč nedostatku visoke vegetacije ili umjetnih objekata. U našem smo istraživanju upotrijebili digitalni model terena iz 2009. godine kao polaznu točku visine (visinski datum) svih fotogrametrijskih proizvoda, odnosno izračunanih digitalnih modela terena. Međutim, digitalnom modelu površine dana je prednost pri računanju brzina kretanja iz viševremenskih visinskih polja.

5. Metode

Sažet prikaz različitih metoda za utvrđivanje i analiziranje deformacija na tlu permafrosta dan je u članku Arensona i dr. (2016). Novija istraživanja sve se više temelje na upotrebi laserskih skenera i pristupačnih digitalnih kamera u mjerenjima na tlu ili iz zraka. Informacije o površinskim deformacijama, na primjer horizontalnim pomacima i promjenama visine, dobivaju se ponovljenim izmjerama iz zraka i obradom viševremenog digitalnog ortofota i/ili digitalnih modela terena. U međuvremenu je mjerenje bespilotnim letjelicama postalo dostupno većini geoznanstvenika, a moćni softver omogućuje gotovo automatsku obradu podataka i dobivanje smislenih geoinformacija. Čitatelje također upućujemo na druge radove, na primjer Bodin i dr. (2018), Buchli i dr. (2018), Dall'Asta (2018), Fugazza i dr. (2018), Kummer i dr. (2018) te Seier i dr. (2017).

Analiza deformacija u našem projektu temeljila se na viševremenskom digitalnom ortofotu (*digital orthophotos* – DOP) i digitalnim modelima terena

(DTM). Precizno georeferencirane fotografije snimljene iz zraka preduvjet su za primjenu te metode.

5.1. Georeferenciranje i kartiranje

5.1.1 Mjerne fotografije snimljene iz zraka (arhivski podaci)

Radna stanica Intergraph primijenjena je za fotogrametrijsko orijentiranje mjernih fotografija. Podaci dostupnih zračnih triangulacija izabranih razdoblja (2002, 2012 i 2015) pomogli su pri prikladnom georeferenciranju svih drugih razdoblja koja još nisu georeferencirana upotrebom stabilnih prirodnih orijentira. Najmanje točnosti georeferenciranja dobivene su za analogne slikovne podatke u sitnom mjerilu iz 1969. i 1981. i iznosile su $\pm 0,4$ – $0,6$ m u planimetriji (X, Y) te $\pm 0,4$ – $0,5$ m u visini (Z). Načelno govoreći, dobivene pozicijske (X, Y, Z) točnosti bile su reda veličine ± 1 – $1,5$ udaljenosti uzorkovanja tla (od oka, vidi tablicu 1). Za svako je razdoblje izračunan digitalni ortofoto upotrebom istodobnog digitalnog modela terena. Model laserskog skenera iz 2009. godine poslužio je kao suvremeni model terena za 2009. Svaki ortofoto izračunan je u dvjema uobičajenim razlučivostima, 10 i 20 cm, kako bi se olakšala obrada. Međutim, ortofoti dobiveni bespilotnim letjelicama prvo su uzorkovani na 5 cm udaljenosti uzorkovanja tla, da bi se očuvala inherentna razlučivost slikovnih podataka.

5.1.2. Nemjerne fotografije snimljene iz zraka (podaci dobiveni bespilotnim letjelicama)

Slikovni podaci dobiveni bespilotnim letjelicama obrađeni su komercijalnim softverom Agisoft PhotoScan (Agisoft, 2018). Softver se temelji na načelima strukture-iz-kretanja (*structure-from-motion* – SfM). Glavni koraci obrade bili su (1) odabir prikladnih, oštrih fotografija, (2) računanje oblaka rijetkih točaka, (3) interaktivno mjerenje kontrolnih točaka na tlu (*ground control points* – GCP), (4) naknadno prilagođavanje paketa s kalibracijom kamere (F, Cx, Cy, B1, B2, K1-3, P1, P2), (5) kontrola kvalitete kontrolnim točkama, (6) računanje oblaka gustih točaka, (7) dvodimenzionalno povezivanje oblaka gustih točaka (s opcijom polje visine – *height field*), (8) računanje rasterskog digitalnog modela terena s razmakom pravilne mreže od 10 cm, te (9) proizvodnja ortofota s udaljenosti uzorkovanja tla od 5 cm, kao što je već spomenuto. Procjena točnosti temeljila se na (i) statističkim podacima prilagodbe paketa (upotrebom kontrolnih točaka na tlu i nezavisnih kontrolnih

vehicles (UAVs) were flown at about the same time in 2017. In the present study, however, we used only the image data from one particular aircraft, the fixed-wing QuestUAV. Both UAVs carried (un-calibrated) digital consumer-grade cameras providing non-metric image data (Table 2). The 2016 aerial survey was hampered by (still unknown) technical problems in correctly flying the pre-computed waypoints. Thus, the coverage of the mapping area is not complete and comprises two non-interconnected parts. Moreover, many photographs had to be discarded because of severe image blurring.

4.3 Geodetic measurements

In 2014, a geodetic network was set up consisting of 14 observation points marked on the active part of the rock glacier and 4 stable reference points located in the surrounding area. Since then, geodetic measurements have been carried out every year at the end of August. These annual measurements help to document the kinematic state of the rock glacier, providing mean annual flow velocities, for example. Precise point positioning ($\pm 2\text{--}3$ cm) is based on the RTK-GNSS technique (Leica GNSS receiver GS15) using a virtual base station (APOS service of BEV). During the UAV campaigns, additional measurements were carried out, comprising (i) all points in the already existing network and (ii) additional points located on and outside the rock glacier, temporarily marked with targets made of plastic foil. Figure 3 shows the points mentioned for 2017 and the respective flow vectors derived from the annual geodetic measurements (25. 8. 2016–22. 8. 2017). In 2016, the UAV-based aerial survey did not coincide with the scheduled annual geodetic measurements (cp. Table 3), which were carried out at the end of July, one day after the UAV flight.

4.4 Airborne Laser Scanning Data

Airborne laser scanning (ALS) data from 2009 was provided by TIRIS in two formats, (1) as a digital surface model (DSM) representing the Earth's surface in general, including vegetation and possible man-made objects, and (2) as a digital terrain model (DTM) representing the bare surface. Both models are raster-based with a grid spacing of 1m. In the present study, the relief shade of the DTM looks somewhat smoother than the DSM-based one. Obviously, the input data (DSM) was filtered to a certain extent, which is inevitable in the general processing

scheme, despite the lack of high vegetation or man-made objects. In the present study, we used the 2009 DTM as a height reference (height datum) for all photogrammetric products, that is, computed DTMs. However, the DSM was preferred when computing flow velocities from multi-temporal height fields.

5 Methods

A concise review of the different methods in detecting and analysing ground deformation in permafrost environments has been given by Arenson et al. (2016). Recent publications focus increasingly on the use of laser scanners and consumer-grade digital cameras in ground-based or airborne applications. Information about surface deformation, for example, horizontal movement and surface height change, is retrieved from repeat aerial surveys analysing multi-temporal digital orthophotos and/or digital terrain models. In the meantime, data acquisition using an unmanned aerial vehicle has become an option for most geoscientists, and powerful software helps process the data almost automatically to obtain meaningful geoinformation. Readers are referred to other publications, for example, Bodin et al. (2018), Buchli et al. (2018), Dall'Asta (2018), Fugazza et al. (2018), Kummert et al. (2018), and Seier et al. (2017).

The deformation analysis carried out in this project was based on multi-temporal digital orthophotos (DOPs) and digital terrain models (DTMs). Precisely georeferenced aerial photographs are a prerequisite of this image-based method.

5.1. Georeferencing and Mapping

5.1.1 Metric aerial photographs (archive data)

Photogrammetric orientation of the metric photographs was carried out on an Intergraph workstation. Data from available aerial triangulations of the selected epochs (2002, 2012, and 2015) helped to georeference conveniently all other epochs not yet georeferenced utilizing stable natural landmarks. The lowest accuracies in georeferencing were obtained for analogue small-scale image data from 1969 and 1981 and amounted to $\pm 0.4\text{--}0.6$ m in planimetry (X, Y) and $\pm 0.4\text{--}0.5$ m in height (Z). In general, positional (X, Y, Z) accuracies obtained were in the order of $\pm 1\text{--}1.5$ GSD (rule-of-thumb, see Table 1). For each epoch, a digital orthophoto was computed using the contemporaneous DTM. The 2009 laser scanner model served as the contemporary terrain model for the 2009 stage. All

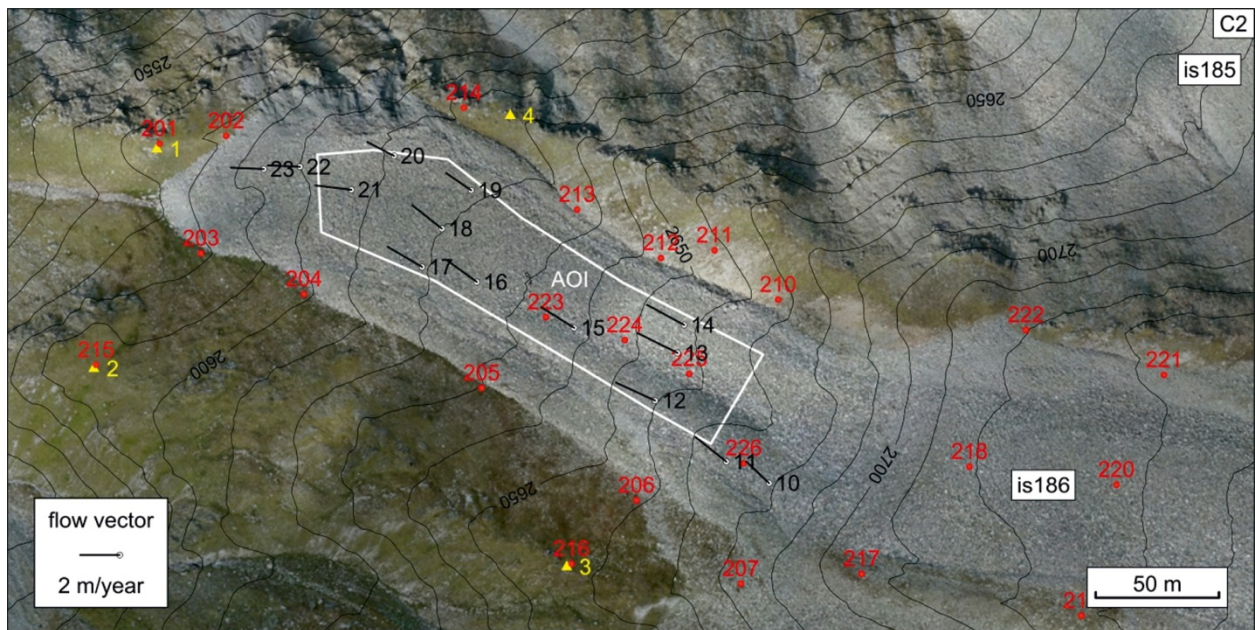


Fig. 3 Mean annual horizontal flow vectors for 2016–2017. Geodetic network comprising stable points (yellow) and observation points (white). Points in red are temporarily marked ground control/check points of the UAV campaign of 28. 8. 2017. The orthophoto shown dates from this campaign. The white polygon delineates the area of interest (AOI) considered for computing the mean annual flow velocity as needed in the velocity graph (see Section 6).

Slika 3. Prosječni godišnji horizontalni vektori kretanja u razdoblju 2016–2017. Geodetska mreža sastoji se od stabilnih točaka (žuta) i stajališta (bijela). Crvene točke predstavljaju privremeno označene kontrolne točke na tlu izmjere bespilotnim letjelicama provedene 28. kolovoza 2017. Datumi izmjere prikazani su na ortofotu.

Bijeli poligon ocrta područje interesa (*area of interest* – AOI) razmatrano za računanje prosječne godišnje brzine tijekom potrebnih za grafikon brzina (vidi šesti dio).

točaka) te na (ii) usporedbi s ortofotom i modelima terena iz drugih razdoblja koja analiziraju stabilne slojeve površine tla. Pozicijske točnosti dobivene prilagodbom paketa za oba skupa podataka (2016, 2017) bile su statistički u rasponu manjem od piksela, odnosno manji od 1 udaljenosti uzorkovanja tla (vidi tablicu 2).

5.2. Kvantifikacija horizontalnog kretanja

Određivanje površinskih promjena podijeljeno je geometrijski u dva nezavisna koraka, tj. u obradu horizontalnih/planimetrijskih (2D) i vertikalnih (1D) komponenti. Međutim, ovdje ćemo raspravljati samo o planimetriji, odnosno o obradi i kvantifikaciji horizontalnog kretanja. Horizontalno kretanje može se utvrditi ili uz pomoć viševremenskih (1) digitalnih ortofota ili (2) digitalnih modela terena. S matematičkog gledišta, nema razlike u računanju dvodimenzionalnih vektora pomaka osim činjenice da su ulazni podaci za (1) sive vrijednosti (cijeli brojevi), a za (2) vrijednosti visina (realni brojevi). O promjeni površinske visine bit će riječi u drugome radu.

5.2.1. Mjerenje utemeljeno na ortofotu

Dvodimenzionalna polja vektorskih pomaka izračunana su uz pomoć vlastitog programa u Matlabu (Kaufmann i Kellerer-Pirklbauer 2015). Sparivanje bilo kojih dvaju digitalnih fotografija snimljenih iz zraka temelji se na koeficijentu normalizirane kroskorelacije (*normalized cross-correlation* – NCC) kao mjere sličnosti. Ako su poznati datumi snimanja skupa podataka iz dvaju razdoblja, moguće je utvrditi godišnje dvodimenzionalne vektore pomaka i stoga prosječne godišnje brzine kretanja. Pomaci izmjereni na stabilnoj površini tla u području oko kamenog glečera upotrebljeni su za provjeru sustavnih odstupanja i kvantifikaciju dobivene preciznosti. Softver automatski utvrđuje i uklanja velike pogreške. Konačna provjera kvalitete vrši se vizualnom inspekcijom. Mjerenja se provode na unaprijed određenim točkama mreže. Budući da vektori pomaka nisu pravilno raspoređeni, potrebna je prikladna interpolacija (npr. triangulacija linearnom interpolacijom) kako bi se dobili podaci o brzini s pokrivenošću ravnine. Takvi se podaci o brzini mogu vizualizirati

orthophotos were computed at two common resolutions, 10 and 20 cm, to facilitate processing. The UAV-based orthophotos, however, were initially sampled at 5 cm GSD, preserving image data inherent resolution.

5.1.2 Non-metric aerial photographs (UAV data)

The UAV-based image data were processed using the commercial software Agisoft PhotoScan (Agisoft, 2018). The software is based on structure-from-motion (SfM) principles. The main processing steps were (1) selection of suitable, sharp photographs, (2) computation of the *sparse point cloud*, (3) interactive measurement of ground control points (GCPs), (4) follow-on bundle adjustment with camera calibration (F, Cx, Cy, B1, B2, K1-3, P1, P2), (5) quality control using check points, (6) computation of the *dense point cloud*, (7) 2D meshing of the dense point cloud (with option *height field*), (8) computation of a raster-based DTM at 10 cm grid spacing, and (9) orthophoto production at 5 cm GSD as already mentioned above. Accuracy assessment was based on (i) statistical data of the bundle adjustment (using ground control points and independent check points) and (ii) intercomparison with orthophotos and terrain models of other epochs analysing stable ground surface patches. Positional accuracies obtained from bundle adjustment for both data sets (2016, 2017) were statistically in the sub-pixel range, thus smaller than 1 GSD (see Table 2).

5.2 Quantification of Horizontal Movement

Surface change detection was split geometrically into two independent steps, i.e., analysis of the horizontal/planimetric (2D) and vertical (1D) components. Here, however, we will only deal with planimetry, or the detection and quantification of horizontal movement. Horizontal movement can be detected using either multi-temporal (1) digital orthophotos or (2) digital terrain models. From a mathematical point of view, there is no difference in the final computation of the 2D displacement vectors, except the fact that the input data for (1) are grey values (integer numbers) and for (2) height values (real numbers). Surface height change will be treated in a separate paper.

5.2.1 Orthophoto-based measurement

2D displacement vector fields were computed using an in-house developed Matlab program (Kaufmann and Kellerer-Pirklbauer 2015). Image matching of any two DOPs is based on the normalized

cross-correlation (NCC) coefficient as a measure of similarity. If the acquisition dates of the bi-temporal data sets are known, it is possible to deduce annual 2D displacement vectors and thus to derive mean annual flow velocities. Displacements measured at stable surface ground in the area surrounding the rock glacier were used to check for systematic offsets and numerically quantify the precision obtained. The software automatically detects and eliminates gross errors. A final quality check is done by visual inspection. Measurements are carried out at pre-defined grid points. Since not every grid point holds a valid displacement vector, appropriate interpolation (preferably triangulation with linear interpolation) is necessary to derive velocity data with areal coverage, for example. Such velocity data can be visualized using isotachs. The amount of smoothing of the final result is controlled by the size of the correlation window and the GSD of input data. An accuracy assessment was carried out only for the UAV-based data sets by comparing the results obtained with contemporary geodetic measurements. One quality measure is the root mean square error (RMSE) of the flow velocities computed. The method described fails in cases of weak and/or non-persistent image textures.

In order to describe more simply the temporal change of the kinematic state of the rock glacier, we computed the area average of the flow velocity. The area of interest (AOI) remained the same in all epochs. Appropriate scaling must be carried out when working with sparse or point data. Furthermore, we suggest selecting a particular epoch as a reference for computing relative change. The final result describing the movement change was the *velocity graph* showing the temporal change of the averaged mean annual flow velocity, in both absolute and relative modes.

5.2.2 DTM-based measurement

Pixel-based measurement of 2D displacement vectors can also be carried out with multi-temporal high-resolution DSMs (Bollmann et al. 2015). This method requires (i) the presence of many-faceted surface topography with sufficient curvature, (ii) a DSM grid-spacing which allows sufficiently resolution of the 3D surface elements present, and (iii) overall small surface changes to maintain high similarity. In general, the micro-topography of rock glaciers consisting of boulders and rocks is suited to this method, whereas furrows and ridges are landforms which should be tracked in a smaller scale. Nonetheless, 2D

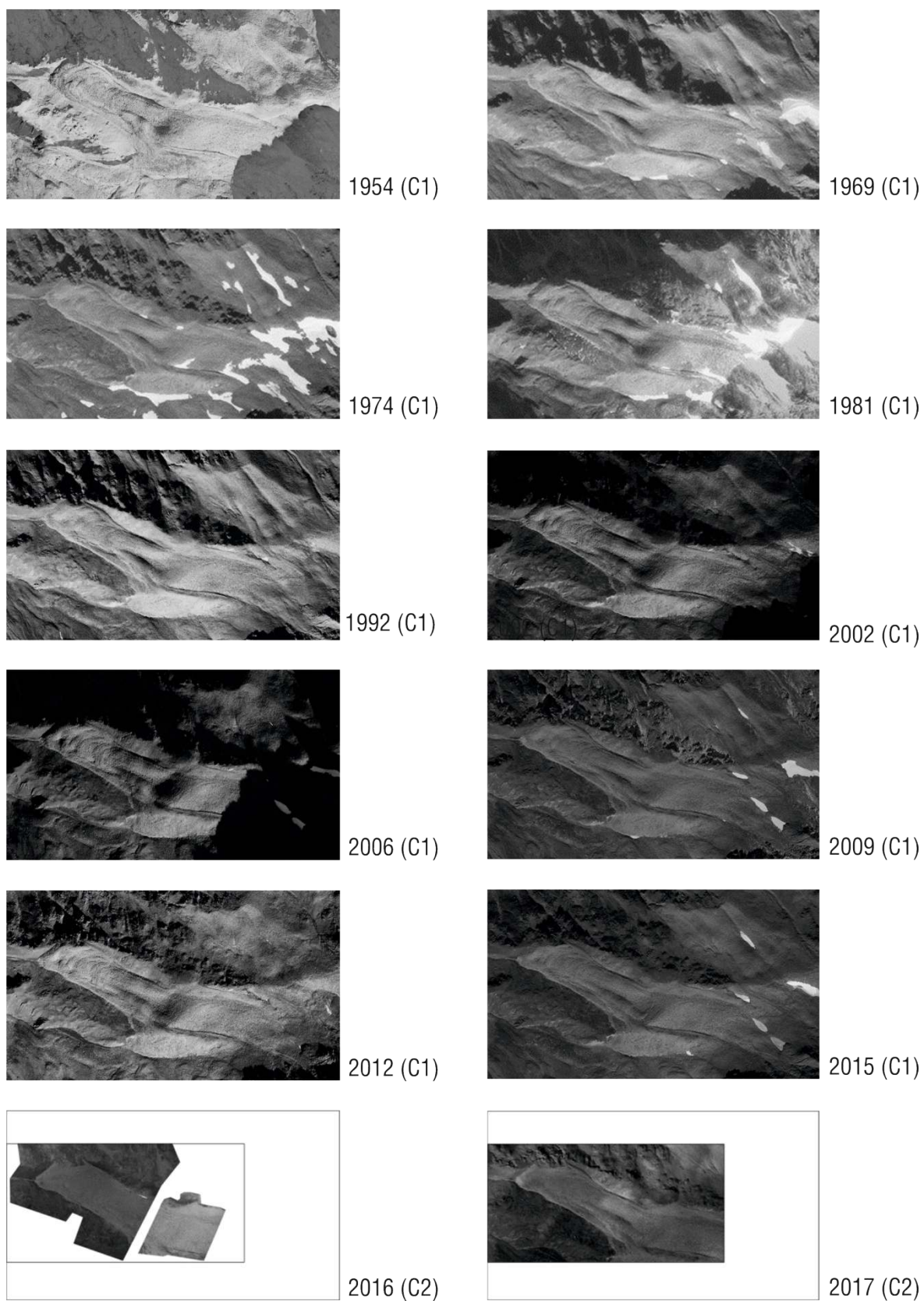


Fig. 4 Multi-temporal digital orthophotos (DOPs) showing mapping areas C1 and C2.

Grayscale data was used for image matching.

Slika 4. Viševremenske digitalne fotografije snimljene iz zraka koje prikazuju područja kartiranja C1 i C2. Crno-bijeli podaci upotrebljeni su za sparivanje slika.

Table 4 List of available digital terrain models (DTMs) and digital orthophotos (DOPs) 1954–2017.**Tablica 4.** Popis dostupnih digitalnih modela terena i fotografija snimljenih iz zraka za razdoblje 1954–2017.

| Date/ Datum | Grid spacing (m) of DTM/ Razmak u pravilnoj mreži (m) digitalnog modela terena | GSD (cm) of DOP/ Udaljenost uzorkovanja tla (cm) digitalnog ortofota | Radiometry/ Radiometrija | Mapping area (coverage)/ Područje kartiranja (pokrivenost) |
|----------------|---|---|--|--|
| 24. 9. 1954 | 2 | 10*, 20* | B&w/ Crno-bijelo | C1, C2 |
| 29. 9. 1969 | 3 (2*) | 10*, 20* | B&w/ Crno-bijelo | C1, C2 |
| 6. 9. 1974 | 2 | 10*, 20 | B&w/ Crno-bijelo | C1, C2 |
| 9. 10. 1981 | 3 (2*) | 10*, 20* | B&w/ Crno-bijelo | C1, C2 |
| 18. 9. 1992 | 2 | 10*, 20 | False colour IR, b&w/ Lažna boja IR, crno-bijelo | C1, C2 |
| 18. 9. 2002 | 2.5 (2*) / 2,5 (2*) | 10*, 20*, 25 | Colour, b&w U boji, crno-bijelo | C1, C2 |
| 21. 9. 2006 | 2.5 (2*) / 2,5 (2*) | 10*, 20*, 25 | Colour, b&w U boji, crno-bijelo | C1, C2 |
| 8. 9. 2009 | 1 (ALS data), 2 1 (podaci laserskog snimanja iz zraka), 2 | 10*, 20*, 25 | Colour, b&w U boji, crno-bijelo | C1, C2 |
| 28. 8. 2012 | 2.5 (2*) / 2,5 (2*) | 10*, 20, | Colour, b&w U boji, crno-bijelo | C1, C2 |
| 28. 8. 2015 | 2 (1*) | 10*, 20 | Colour, false colour IR, b&w U boji, false colour IR, crno-bijelo | C1, C2 |
| 26. 7. 2016 | 0.10, 1, 2 / 0,10, 1, 2 | 5, 10, 20 | Colour, b&w U boji, crno-bijelo | C2 (partial)/ C2 (djelomično) |
| 22. 8. 2017 | 0.10, 1, 2 / 0,10, 1, 2 | 5, 10, 20 | Colour, b&w U boji, crno-bijelo | C2 |

+ ... interpolated value for easier intercomparison of multi-temporal data

+ ... interpolirana vrijednost za lakšu usporedbu viševremenskih podataka

Table 5 Height accuracies of selected multi-temporal DTMs.**Tablica 5.** Točnosti visina izabranih viševremenskih digitalnih modela terena.

| Date/ Datum | Height accuracy* (m) of DTM / Točnost visine* (m) digitalnog modela terena |
|----------------|---|
| 24. 9. 1954 | ±0.42 / ±0,42 |
| 6. 9. 1974 | ±0.17 / ±0,17 |
| 18. 9. 1992 | ±0.16 / ±0,16 |
| 8. 9. 2009 | Height reference (ALS data) / Referentne visine (podaci laserskog snimanja iz zraka) |
| 28. 8. 2015 | ±0.12 / ±0,12 |
| 26. 7. 2016 | ±0.09/±0.09* (30 points) / ±0,09/±0,09* (30 točaka) |
| 22. 8. 2017 | ±0.07/±0.06* (42 points) / ±0,07/±0,06* (42 točke) |

+ ... standard deviation (1 σ) / + ... standardna devijacija (1 σ)

* ... value derived from known geodetic heights/ * ... vrijednost dobivena iz poznatih geodetskih visina

upotrebom izotahijama. Količinu izgladivanja konačnog rezultata određuje veličina korelacijskog prozora i udaljenost uzorkovanja tla ulaznih podataka. Procjena točnosti provedena je samo za podatke dobivene bespilotnim letjelicama, usporedbom s rezultatima dobivenim suvremenim geodetskim mjerenjima. Jedna mjera kvalitete jest srednja pogreška (*root mean square error* – RMSE) izračunanih brzina kretanja. Opisana metoda nije primjerena za slabe slikovne teksture i/ili one koje nisu čvrste.

Kako bismo na jednostavniji način opisali vremenske promjene kinematičkog stanja kamenog glečera, izračunali smo područje prosjeka brzine kretanja. Područje interesa (*area of interest* – AOI) ostalo je isto u svim razdobljima. Kad se radi s rijetkim podacima ili podacima točaka, potrebno je provesti prikladno skaliranje. Nadalje, predlažemo izbor određenog razdoblja kao polaznog za računanje relativne promjene. Konačan rezultat koji opisuje promjenu kretanja bio je *graf brzina*, koji prikazuje vremenske promjene prosječne godišnje brzine kretanja u apsolutnom i relativnom načinu.

5.2.2. Mjerenje utemeljeno na digitalnom modelu terena

Mjerenje dvodimenzionalnih vektora pomaka temeljeno na pikselima također je moguće provesti pomoću viševremenskih digitalnih modela površine visoke razlučivosti (Bollmann i dr. 2015). Ta metoda zahtijeva (i) prisutnost površinske topografije s mnogo ploha i dovoljnom zakrivljenošću, (ii) razmak pravilne mreže digitalnog modela površine koji omogućuje dovoljnu razlučivost prisutnih trodimenzionalnih površinskih elemenata te (iii) male površinske promjene kako bi se zadržala velika sličnost. Općenito govoreći, mikrotopografija kamenih glečera koji se sastoje od kamenja i stijena prikladna je za tu metodu, dok su brazde i grebeni oblici reljefa koje je potrebno snimiti u manjem mjerilu. Usprkos tome, dvodimenzionalni vektori pomaka izračunani su na način identičan onome opisanome u prethodnom dijelu, osim činjenice da je sive vrijednosti bilo potrebno zamijeniti vrijednostima visina.

6. Rezultati

Izračunali smo reprezentativne digitalne modele terena i digitalni ortofoto za svako razdoblje (vidi tablicu 4). Fotografije snimljene iz zraka u boji također su pretvorene u 8-bitne crno-bijele podatke kako bi bilo moguće sparivanje slika i vizualizacija. Crno-

bijele viševremenske fotografije snimljene iz zraka prikazane su na slici 4.

Neki su digitalni modeli terena izabrani za daljnju analizu promjena i stoga precizno registrirani u vertikalni datum podataka laserskog snimanja iz zraka iz 2009. godine kako bi se kompenziralo sustavna vertikalna odstupanja. Dobivene točnosti visina navedene su u tablici 5. Uz to, digitalni modeli terena utemeljeni na podacima dobivenim bespilotnim letjelicama provjereni su suvremenim geodetskim mjerenjima (Goetz i dr. 2018).

6.1. Horizontalno kretanje

Podaci brzine kretanja izračunani su za izabrana razdoblja s pomoću digitalnog ortofota i digitalnih modela terena (tablica 6). Izabrana polja brzine kretanja utemeljena na digitalnom ortofotu prikazani su na sl. 5–8.

Točnost podataka o brzini dobivenih bespilotnim letjelicama provjerena je geodetskim mjerenjima (tablica 7).

Naknadno smo skupili kinematičke podatke kako bismo dobili pojedine brojčane vrijednosti koje opisuju kinematičko stanje kamenog glečera za svako razdoblje. Naša je reprezentativna vrijednost prosječna vrijednost skupljenih podataka za određeno područje (označeno s AOI na sl. 8). Nepotpuna pokrivenost prostora uzrokovana rijetkim podacima zahtijevala je prikladnu korelacijsku analizu kako bismo procijenili točnu prosječnu vrijednost. Za svako razdoblje dane su dvije vrijednosti, prosjek područja (u metrima u godini) te relativna vrijednost (%) u odnosu na razdoblje 2014–2015, kad su izmjerene najveće brzine. Brojčane vrijednosti navedene su u tablici 8. Slika 9 prikazuje (*graf brzina*) podatke. Za usporedbu, na toj se slici nalaze još dva grafa, koji predstavljaju kinematičko stanje susjednih kamenih glečera koji se brzo kreću. Korekcija za različite datume mjerenja nije primijenjena u ovome istraživanju. Korekcijske modele poznate iz glaciologije (npr. Lambrecht i Kuhn 2007) teško je primijeniti s obzirom na to da se još ne zna mnogo o ovisnosti brzine kretanja o temperaturi (površine tla). U načelu, odgovor je vrlo inertan i reakcije su pomaknute u vremenu.

6.3. Računalne animacije

Animirani GIF-ovi koji se sastoje od fotografija snimljenih iz zraka i koji prikazuju prolazak vremena te računalno-osjenčani digitalni modeli terena

Table 6 Velocity data derived from intercomparison of multi-temporal digital orthophotos (DOPs) and terrain models (DTMs) 1954–2017.**Tablica 6.** Podaci o brzinama dobiveni usporedbom s viševremenskim digitalnim ortofotografijama snimljenim iz zraka i modelima terena za razdoblje 1954–2017.

| Time interval/ Razdoblje | Number of years/ Broj godina | Precision* of velocity data (cm/year)/ Preciznost* podataka o brzini (cm u godini) | Maximum flow velocity (cm/year)/ Najveća brzina tijekom (cm u godini) | Mapping area/ Područje kartiranja | Remark/ Napomena |
|-----------------------------|---------------------------------|---|--|--------------------------------------|--|
| 1954–1969 | 15.014 / 15,014 | ±1.9/ ±1,9 | 59.5 / 59,5 | C1 | Few points/ Mali broj točaka |
| 1969–1974 | 4.936 / 4,936 | ±4.5/ ±4,5 | 38.0 / 38,0 | C1 | |
| 1954–1974 | 19.950 / 19,950 | ±1.5/ ±1,5 | 49.7 / 49,7 | C1 | Few points/ Mali broj točaka |
| 1974–1981 | 7.091 / 7,091 | ±3.0/ ±3,0 | 27.9 / 27,9 | C1 | |
| 1981–11992 | 10.943 / 10,943 | ±2.2/ ±2,2 | 35.6 / 35,6 | C1 | |
| 1974–1992 | 18.034 / 18,034 | ±1.1/ ±1,1 | 33.4 / 33,4 | C1 | |
| 1992–2002 | 9.999 / 9,999 | ±2.2/ ±2,2 | 101.7 / 101,7 | C1 | |
| 2002–2006 | 4.008 / 4,008 | ±2.3/ ±2,3 | 119.6 / 119,6 | C1 | |
| 2006–2009 | 2.965 / 2,965 | ±2.9/ ±2,9 | 106.4 / 106,4 | C1 | |
| 2009–2012 | 2.971 / 2,971 | ±3.1/ ±3,1 | 199.0 / 199,0 | C1 | |
| 2012–2015 | 2.998 / 2,998 | ±3.2/ ±3,2 | 353.3 / 353,3 | C1 | |
| 2015–2016 | 0.912 / 0,912 | ±6.2 (west)/ ±6,2 (zapad) | 355.6 (west)/ 355,6 (zapad) | C2 | 2 parts (west, east)/ Dva dijela (zapad, istok) |
| | | ±12.0 (east#)/ ±12,0 (istok#) | 282.9 (east)/ 282,9 (istok) | | |
| 2016–2017 | 1.073 / 1,073 | ±5.0 (west)/ ±5,0 (zapad) | 230.0 (west)/ 230,0 (zapad) | C2 | Western part/ Zapadni dio |
| 2015–2017 | 1.985 / 1,985 | ±3.1/ ±3,1 | 282.4 / 282,4 | C2 | |
| 2009–2017 | 7.953 / 7,953 | ±0.8/ ±0,8 | 274.0 / 274,0 | C2 | |
| 2016–2017* | 1.073 / 1,073 | ±10.9/ ±10,9 | 227.5 / 227,5 | C2 | Both parts/ Oba dijela |
| 2009–2016* | 6.932/ 6,932 | ±3.3/ ±3,3 | – | C2 | Few points/ Mali broj točaka |
| 2009–2017* | 8.005/ 8,005 | ±2.6/ ±2,6 | – | C2 | Few points/ Mali broj točaka |

+ ... standard deviation (1 σ)/ + ... standardna devijacija (1 σ)

* ... DTM-based solution/ * ... rješenje utemeljeno na digitalnom modelu terena

... The eastern part was georeferenced using landmarks measured in the stereomodels of 2015./

... Istočni je dio georeferenciran uz pomoć orijentira izmjerenih u stereomodelima 2015. godine.

displacement vectors were computed in the same way as outlined in the previous subsection, except for the fact that grey values had to be substituted by height values.

6 Results

We computed representative DTMs and DOPs for each epoch (see Table 4). Orthophotos in colour were also converted to 8-bit grayscale (black-and-white/

b&w) data to support image matching and visualization. The grayscale multi-temporal orthophotos are shown in Figure 4.

Some DTMs were selected for further change analysis and thus precisely registered to the vertical datum of the ALS data of 2009 to compensate for systematic vertical offsets. The height accuracies achieved are listed in Table 5. Additionally, the UAV-based DTMs were checked by means of contemporary geodetic measurements (Goetz et al. 2018).

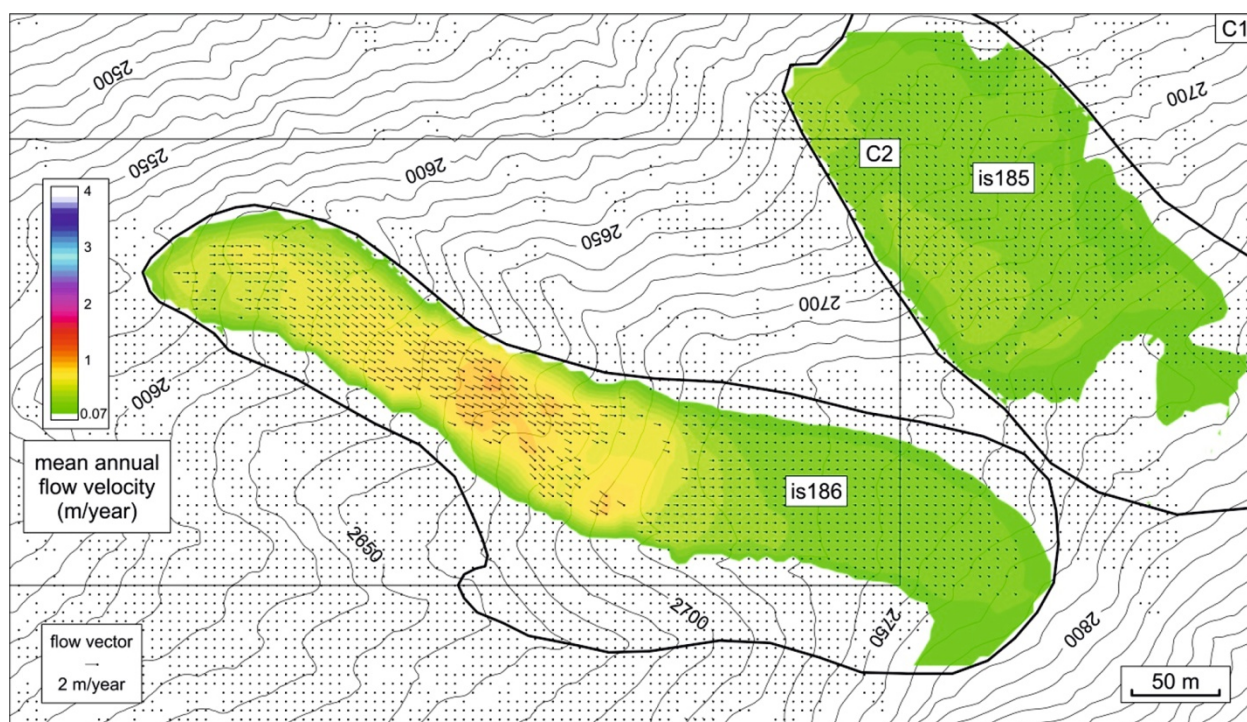


Fig. 5 Mean annual horizontal flow velocity for 1992–2002. Significance level at 3σ .

Slika 5. Prosječna godišnja horizontalna brzina kretanja u razdoblju 1992–2002. Razina značajnosti 3σ .

Tablica 7. Točnost podataka o brzini dobivenih bespilotnim letjelicama.

Table 7 Accuracy of the UAV-based velocity data.

| Razdoblje/ Time interval | Točnost* (metri u godini) brzine tijeka dobivenih bespilotnim letjelicama/ Accuracy* (m/year) of DOP-based flow velocity | Broj geodetskih točaka upotrebljen u analizi točnosti/ Number of geodetic points used for accuracy analysis |
|-----------------------------|--|---|
| 8. 8. 2015. – 26. 7. 2016. | $\pm 0,047 / \pm 0,047$ | 12 |
| 28. 8. 2015. – 22. 8. 2017. | $\pm 0,032 / \pm 0,032$ | 14 |
| 26. 7. 2016. – 22. 8. 2017. | $\pm 0,051 / \pm 0,028^*$ $\pm 0,051 / \pm 0,028^*$ | 12/ 13 |

+ ... srednja pogreška (RMSE) / + ... root mean square error (RMSE)

* ... brzina kretanja utemeljena na digitalnom modelu terena / * ... DTM-based flow velocity

pomažu pri vizualizaciji kinematike kamenog glečera Tschadinhorn (Kaufmann 2018).

7. Rasprava i smjernice za daljnja istraživanja

Glavni rezultati su: kameni glečer Tschadinhorn kretao se neprekidno tijekom cijelog razdoblja opažanja od 63 godina, premda različitim brzinama. Najveća prosječna godišnja brzina kretanja od 3,28 metra u godini dobivena je za razdoblje 2014–2015,

dok je najmanja prosječna godišnja brzina bila 0,16 metra u godini opažena u razdoblju 1969–1974, što je 4,9% od najveće vrijednosti. Dobiveni graf brzina također pokazuje da je u razdoblju 1954–2009 aktivnost bila uglavnom umjerena (0,16 – 0,79 metra u godini), a da od 2009. prevladavaju mnogo veće brzine. Najnovija izmjerena vrijednost (2016–2017) bila je 1,92 metra u godini, što je 58,6% od najveće vrijednosti. Od 1954. godine, prednji dio kamenog glečera pomaknuo se 29,5 m uzduž talvega, što odgovara

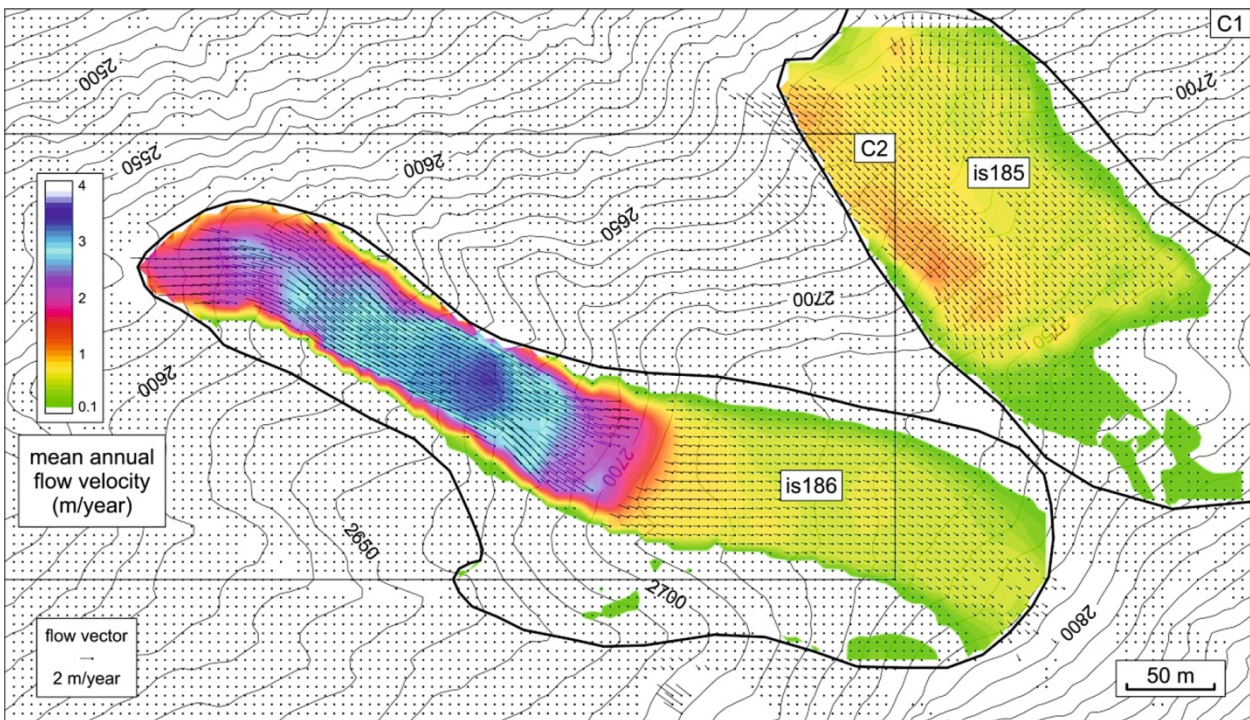


Fig. 6 Mean annual horizontal flow velocity for 2012–2015. Significance level at 3σ .

Slika 6. Prosječna godišnja horizontalna brzina kretanja u razdoblju 2012–2015. Razina značajnosti 3σ .

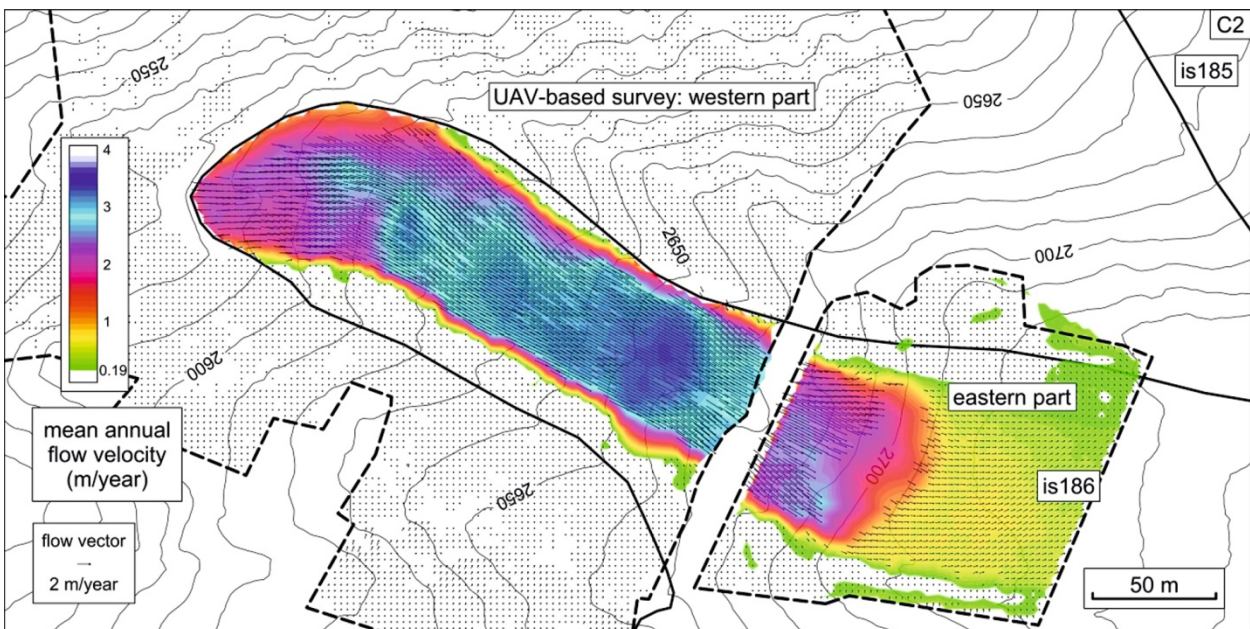


Fig. 7 Mean annual horizontal flow velocity for 2015–2016. Significance level at 3σ (valid for the western part).

Slika 7. Prosječna godišnja horizontalna brzina kretanja u razdoblju 2015–2016. Razina značajnosti 3σ (vrijedi za zapadni dio).

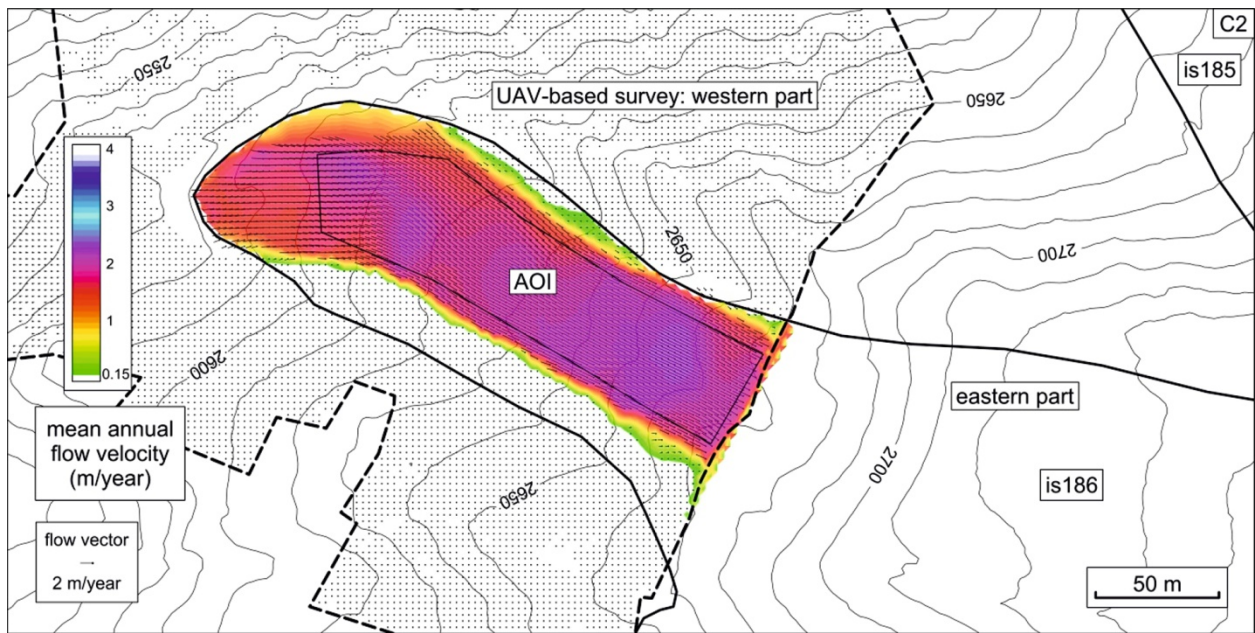


Fig. 8 Mean annual horizontal flow velocity for 2016–2017. Significance level at 3σ .

Slika 8. Prosječna godišnja horizontalna brzina kretanja u razdoblju 2016–2017. Razina značajnosti 3σ .

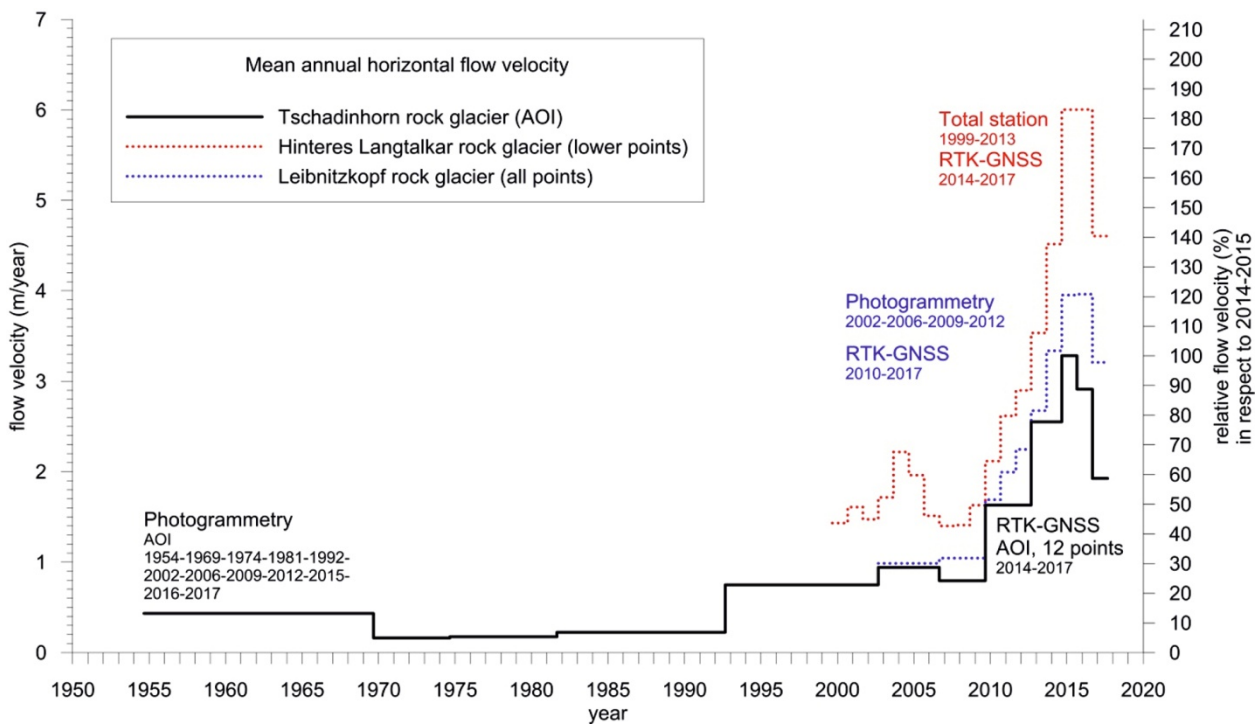


Fig. 9 Velocity graph of Tschadinhorn rock glacier, 1954–2017.

Slika 9. Graf brzina kamenog glečera Tschadinhorn, 1954–2017.

6.1 Horizontal Movement

Flow velocity data were computed for selected time intervals using DOPs and DTMs (Table 6). Selected DOP-based flow velocity fields are shown in Figures 5–8.

The accuracy of the UAV-based velocity data was checked by geodetic measurements (Table 7).

Subsequently, we aggregated the kinematic data to come up with single numerical values describing the rock glacier's kinematic state for each time interval. Our representative value was an aggregated mean over a specified area (indicated as AOI in Figure 8). Incomplete areal coverage caused by sparse measurement data required appropriate correlation analysis to estimate the correct mean value. We provide two values for each time interval, or an area average (m/year), and a relative value (%) referred to the period 2014–2015, when the highest flow velocities were measured. Numerical values are given in Table 8. Figure 9 is a graphical representation (velocity graph) of these data. Two more graphs are included in this figure for reasons of comparison, representing the kinematic state of neighbouring fast-moving rock glaciers. A correction term considering different acquisition/measuring dates was not applied in this study. Correction models known from glaciology (e.g. Lambrecht and Kuhn 2007) are difficult to implement, since the dependence of flow velocity on (ground surface) temperature is still poorly understood. In general, the response is highly inert and reactions are shifted by time.

6.3 Computer Animations

Animated GIFs comprising time-lapse DOPs and computer-shaded DTMs help to visualize the surface kinematics of Tschadinhorn rock glacier (Kaufmann 2018).

7 Discussion and Outlook

The main findings were: the Tschadinhorn rock glacier moved continuously throughout the whole observation period of 63 years, albeit at different activity levels. A maximum mean annual flow velocity of 3.28 m/year was obtained for 2014–2015, whereas the lowest annual flow velocity of 0.16 m/year, which is 4.9% of the maximum value, was observed for 1969–1974. The velocity graph obtained also reveals that the time span 1954–2009 was

characterized by generally moderate activity (0.16 – 0.79 m/year) and that much higher flow velocities prevailed from 2009. The most recently measured value (2016–2017) was 1.92 m/year, which is 58.6% of the maximum value. Since 1954, the front of the rock glacier has advanced 29.5 m along the talweg, which amounts to an average velocity of approx. 0.47 m/year. The photogrammetrically derived flow velocities for the most recent observation periods (2015, 2016, 2017) were verified by the corresponding geodetic measurements, and high accuracies in the order of $\pm 3\text{--}5$ cm/year ($1\ \sigma$) were achieved for single point measurements. DTM-based flow velocities only correlate well with DOP-based ones in the case of fine grid-spacing (≤ 10 cm). UAV-based acquisition of aerial photographs in rock glacier monitoring proved successful in providing high-resolution DOPs and DSMs/DTMs for change detection analysis. The standards of conventional photogrammetric mapping defined by governmental agencies like the BEV, were easily met, provided that sufficient ground control points were available and GSD of the image data was better than 5 cm. UAV-based aerial surveys also have the potential to support intra-annual change detection analyses, at least for fast-moving rock glaciers.

The flow velocities obtained will be correlated with climatic parameters in a follow-up study. The authors also suggest that kinematic data, such as the mean annual flow velocity and surface height change, should be included in the attribute list of rock glacier inventories.

In a future paper we intend to quantify assumed permafrost degradation (ice melt) at Tschadinhorn rock glacier. In general, the melting of the permafrost ice is difficult to quantify, since probable ice melt due to atmospheric warming is rather low. At Tschadinhorn rock glacier we expect mass balance changes close to significance level.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the support of NAWI Graz. The work was also supported by Hohe Tauern National Park in Carinthia and OeAV-Patenschaftsfonds Nationalpark Hohe Tauern. The help of Kevin Roth and Alexander Kleb in the 2016 field campaigns was greatly appreciated. Aerial photographs (1954–2015) and ALS data (2009) were provided by BEV and TIRIS, Land Tirol. Two anonymous reviewers were most helpful in improving the manuscript.

Tablica 8. Brojčane vrijednosti grafa brzina kamenog glečera Tschadinhorn.
Table 8 Numerical values of the velocity graph of Tschadinhorn rock glacier.

| Razdoblje/ Time interval | Prosječna godišnja horizontalna brzina kretanja* (metri u godini)/ Mean annual horizontal flow velocity* (m/year) | Relativna vrijednost (%) u odnosu na 2014–2015/ Relative value (%) in respect to 2014–2015 |
|-----------------------------|---|---|
| 24. 9. 1954. – 29. 9. 1969. | 0,433 / 0.433 | 13,18 / 13.18 |
| 29. 9. 1969. – 6. 9. 1974. | 0,162 / 0.162 | 4,95 / 4.95 |
| 6. 9. 1974. – 9. 10. 1981. | 0,175 / 0.175 | 5,32 / 5.32 |
| 9. 10. 1981. – 18. 9. 1992. | 0,224 / 0.224 | 6,83 / 6.83 |
| 18. 9. 1992. – 18. 9. 2002. | 0,749 / 0.749 | 22,82 / 22.82 |
| 18. 9. 2002. – 21. 9. 2006. | 0,941 / 0.941 | 28,68 / 28.68 |
| 21. 9. 2006. – 8. 9. 2009. | 0,794 / 0.794 | 24,20 / 24.20 |
| 8. 9. 2009. – 28. 8. 2012. | 1,631 / 1.631 | 49,71 / 49.71 |
| 28. 8. 2012. – 2. 8. 2014. | 2,550 [#] / 2.550 [#] | 77,72 / 77.72 |
| 2. 8. 2014. – 28. 8. 2015. | 3,282* / 3.282* | 100,00 / 100.00 |
| 28. 8. 2015. – 26. 7. 2016. | 2,911 / 2.911 | 88,72 / 88.72 |
| 26. 7. 2016. – 22. 8. 2017. | 1,925 / 1.925 | 58,65 / 58.65 |

* ... prosjek područja (područje je na sl. 8 označeno s AOI) / * ... area average (area is indicated as AOI in Figure 8)

* ... mjerenja RTK-GNSS u mjerilu za područje interesa / * ... RTK-GNSS measurements scaled to AOI

... vrijednost dobivena iz podataka o brzini za 2012–2015 i 2014–2015 /

... value derived from velocity data 2012–2015 and 2014–2015

prosječnoj brzini od približno 0,47 metra u godini. Fotogrametrijski dobivene brzine za najnovija razdoblja opažanja (2015, 2016, 2017) provjerena su odgovarajućim geodetskim mjerenjima i za mjerenja pojedinih točaka dobivene su visoke točnosti reda veličine $\pm 3\text{--}5$ cm u godini (1 σ). Brzine kretanja utemeljene na digitalnom modelu terena dobro koreliraju s onima utemeljenim na digitalnom ortofotu samo u slučaju malih razmaka pravilne mreže (≤ 10 cm). Snimanje fotografija bespilotnim letjelicama pokazalo se uspješnim za dobivanje digitalnog ortofota visoke razlučivosti i digitalnih modela površine/digitalnih modela reljefa za potrebe analize otkrivanja promjena. Standardi konvencionalnog fotogrametrijskog kartiranja koje utvrđuju vladine agencije, kao što je BEV, lako su postignuti pod uvjetom da je bilo dostupno dovoljno kontrolnih točaka na tlu i da je udaljenost uzorkovanja tla slikovnih podataka bila manja od 5 cm. Izmjere bespilotnim letjelicama također imaju potencijal podržati analize otkrivanja promjena u vremenu, barem za kamene glečere koji se brzo kreću.

Dobivene brzine kretanja u sljedećem će istraživanju biti korelirane s klimatskim parametrima. Autori također preporučuju da bi kinematičke

podatke, kao što su prosječna godišnja brzina kretanja i promjena visine površine, trebalo uvrstiti u popis atributa inventara kamenih glečera.

U narednom ćemo radu kvantificirati pretpostavljenu degradaciju permafrosta (topljenje leda) kamenog glečera Tschadinhorn. Općenito govoreći, topljenje leda permafrosta je teško kvantificirati jer je topljenje leda uslijed zagrijavanja atmosfere malo vjerojatno. Za kameni glečer Tschadinhorn očekujemo promjene ravnoteže mase bliske razini značajnosti.

Zahvale

Autori zahvaljuju na podršci Geocentru NAWI Graz. Podršku su također pružili Hohe Tauern National Park iz Koruške te OeAV-Patenschaftsfonds Nationalpark Hohe Tauern. Cijenimo i pomoć Kevina Rotha i Alexandra Kleba tijekom mjerenja 2016. godine. Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen – BEV i Tiroler Rauminformationssystem – TIRIS ustupili su fotografije snimljene iz zraka (1954–2015) te podatke dobivene bespilotnim letjelicama (2009). Komentari dvaju anonimnih recenzenata pomogli su poboljšati rukopis ovoga rada.

References / Literatura

- Agisoft (2018) Web site: <http://www.agisoft.com/> Accessed 7 May 2018
- Arenson LU, A Käab, O'Sullivan A (2016) Detection and Analysis of Ground Deformation in Permafrost Environments, *Permafrost and Periglacial Processes*, 27 (4), 339-351. doi:10.1002/ppp.1932
- Barsch D (1996) *Rockglaciers: indicators for the present and former geocology in high mountain environments*, Springer Series in Physical Environment, Vol. 16, Springer, 331 p.
- BEV (2018) Web site: <http://www.bev.gv.at/> Accessed 4 May 2018
- Bodin X, Thibert E, Sanchez O, Rabatel A, Jaillet S (2018) Multi-Annual Kinematics of an Active Rock Glacier Quantified from Very High-Resolution DEMs: An Application-Case in the French Alps, *Remote Sensing*, 10(4), 547. doi:10.3380/rs10040547
- Bollmann E, Girstmair A, Mitterer S, Krainer K, Sailer R, Stötter J (2015) A Rock Glacier Activity Index Based on Rock Glacier Thickness Changes and Displacement Rates Derived From Airborne Laser Scanning, *Permafrost and Periglacial Processes*, 26 (4), 347-359. doi:10.1002/ppp.1852
- Buchenauer HW (1990) *Gletscher- und Blockgletschergeschichte der westlichen Schobergruppe (Osttirol)*, Marburger Geographische Schriften, 117, Philipps-Universität Marburg, in German, 276 p.
- Buchli T, Kos A, Limpach P, Merz K, Zhou X, Springman SM (2018) Kinematic investigations on the Furggwanghorn Rock Glacier, Switzerland, *Permafrost and Periglacial Processes*, 29 (1), 3–20. doi:10.1002/ppp.1968
- Dall'Asta E, Forlani G, Roncella R, Santise M, Diotri F, Morra di Cella U (2017) Unmanned Aerial Systems and DSM matching for rock glacier monitoring, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 127 (May 2017), 102–114. doi:10.1016/j.isprsjprs.2016.10.003
- Filwarny JO, Wisioł K (2012) Quantifizierung der Oberflächendeformation von aktiven Blockgletschern in Osttirol durch photogrammetrische Zeitreihenanalyse, bachelor thesis, unpublished, in German, Institute of Geodesy, TU Graz, 49 p.
- Fugazza D, Scaioni M, Corti M, D'Agata C, Azzoni RS, Cernuschi M, Smiraglia C, Diolaiuti GA (2018) Combination of UAV and terrestrial photogrammetry to access rapid glacier evolution and map glacier hazards, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 1055–1071. doi:10.5194/nhess-18-1055-2018
- Goetz J, Brenning A, Marcer M, Bodin X (2018) Modeling the precision of structure-from-motion multi-view stereo digital elevation models from repeated close-range aerial surveys, *Remote Sensing of Environment*, 210, 208–216. doi:10.1016/j.rse.2018.03.013
- Kaufmann V (2010) Measurement of surface flow velocity of active rock glaciers using orthophotos of virtual globes, *Geographia Technica*, Special Issue, 2010, Cluj University Press, 68–61. Web site: <http://technicalgeography.org/index.php/special-issue-2010/38-11-viktor-kaufmann-measurement-of-surface-flow-velocity-of-active-rock-glaciers> Accessed 2 May 2018
- Kaufmann V (2017) Tschadinhorn Blockgletscher, Schobergruppe, Hohe Tauern – ein Beitrag zur aktuellen Kinematik, in: W Lienhart (ed), *Ingenieurvermessung '17, Beiträge zum 18. Ingenieurvermessungskurs Graz, 2017*, Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach, 427–438
- Kaufmann V (2018) computer animations, Web site: https://www.staff.tugraz.at/viktor.kaufmann/animations.html#Tschadinhorn_rock_glacier Accessed 4 May 2018
- Kaufmann V, Kellerer-Pirklbauer A (2015) Regional quantification of rock glacier movement in Austria using governmental GIS data, *Geomorphometry.org/2015*, 165–168
- Kellerer-Pirklbauer A, Kaufmann V (2012) About the relationship between rock glacier velocity and climate parameters in central Austria, *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105(2), 94–112 http://www.univie.ac.at/ajes/archive/volume_105_2/kellerer_kaufmann_ajes_105_2.pdf
- Kellerer-Pirklbauer A, Lieb GK, Kleinfelchner H (2012) A new rock glacier inventory of the eastern European Alps, *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105(2), 78–93 http://www.univie.ac.at/ajes/archive/volume_105_2/kellerer_at_al_ajes_105_2.pdf
- Kummert M, Delaloye R, Braillard L (2018) Erosion and sediment transfer processes at the front of rapidly moving rock glaciers: Systematic observations with automatic cameras in the western Swiss Alps, *Permafrost and Periglacial Processes*, 29 (1), 21–33. doi:10.1002/ppp.1960
- Lambrecht A, Kuhn M (2007) Glacier changes in the Austrian Alps during the last three decades, derived from the new Austrian glacier inventory, *Annals of Glaciology*, 46, 177–184. <https://www.igsoc.org/annals/46/a46a115.pdf>
- Mikl T (2015) Quantifizierung und Visualisierung der raumzeitlichen Veränderungen von ausgewählten Blockgletschern in der Schobergruppe, Hohe Tauern, bachelor thesis, unpublished, in German, Institute of Geodesy, TU Graz, 44 p.
- Seier G, Kellerer-Pirklbauer A, Wecht M, Hirschmann S, Kaufmann V, Lieb GK, Sulzer W (2017) UAS-Based Change Detection of the Glacial and Proglacial Transition Zone at Pasterze Glacier, Austria, *Remote Sensing*, 9(6), 549. doi:10.3390/rs9060549
- YouTube (2018) UAV-based aerial survey of Tschadinhorn rock glacier, Web site: <https://www.youtube.com/user/photogrammetrie> Accessed 15 May 2018