

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



PATRICIJA BARBO

**UPORABA INTERAKTIVNE METODE
FOTOGRAMETRIČNE ORIENTACIJE POSNETKOV NA
PRIMERU LEDENIKA POD SKUTO**

DIPLOMSKA NALOGA

**UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE
STOPNJE GEODEZIJA IN GEOINFORMATIKA**

Ljubljana, 2018

UNIVERZA
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500 faks
(01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI
ŠTUDIJSKI PROGRAM
PRVE STOPNJE
GEODEZIJA IN
GEOINFORMATIKA

Kandidat/-ka:

PATRICIJA BARBO

**UPORABA INTERAKTIVNE METODE
FOTOGRAMETRIČNE ORIENTACIJE POSNETKOV NA
PRIMERU LEDENIKA POD SKUTO**

**USING INTERACTIVE METHOD OF PHOTOGRAMMETRIC
ORIENTATION FOR STUDYING THE SKUTA GLACIER**

Mentor/-ica:

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

doc. dr. Mihaela Triglav Čekada

Član komisije:

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	528.715:551.324(043.2)
Avtor:	Patricija Barbo
Mentor:	doc. dr. Mojca Kosmatin Fras
Somentor:	doc. dr. Mihaela Triglav Čekada
Naslov:	Uporaba interaktivne metode fotogrametrične orientacije posnetkov na primeru Ledenika pod Skuto
Tip dokumenta:	diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	30 str., 5 pregl., 18 sl., 2 pril.
Ključne besede:	interaktivna metoda orientacije posnetkov, zunanja orientacija, DMR, ledenik, površina, prostornina, arhivski posnetki, Ledenik Pod Skuto

Izvleček:

Interaktivna metoda fotogrametrične orientacije posnetkov je enoslikovna metoda, s katero lahko na podlagi enega posnetka in digitalnega modela reliefa določimo 3D-položaj vsebine posnetka. Zunanja orientacija je postopek umeščanja posnetka v prostor v trenutku njegovega nastanka. Parametre zunanje orientacije v primeru interaktivne metode pridobimo z iskanjem optimalnega ujemanja motiva na posnetku s projiciranim DMR-jem. V diplomski nalogi smo obravnavali izbor arhivskih posnetkov Ledenika pod Skuto iz let 1963, 1982, 1995, 2006, 2010 in 2015, ki nam jih je posredoval Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU. Za obdelavo smo uporabili obstoječ program, ki je nastal na Geodetskem inštitutu Slovenije. Za vsak obravnavan arhivski posnetek smo določili parametre zunanje orientacije in zajeli 3D-obod ledenika. Na podlagi oboda smo s programskim orodjem ArcMap izračunali površino in prostornino, poleg tega smo določili tudi nadmorsko višino zgornjega robu ledenika. Ugotovljeno je bilo, da se je površina v obravnavanem obdobju od leta 1963 do 2015 zmanjšala za 61 %. Prostornina ledenika se je od leta 1963 do 2006, ko je bila najmanjša, zmanjšala za 371.000 m³. Nadmorska višina zgornjega robu ledenika pa se je med 1963 in 2015 znižala za 40 m. Spremembo površine ledenika smo povezali s spremembo letne temperature zraka. Na koncu smo ocenili še natančnost uporabljene metode.

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	528.715:551.324(043.2)
Author:	Patricija Barbo
Supervisor:	Assist. Prof. Mojca Kosmatin Fras
Cosupervisor:	Assist. Prof. Mihaela Triglav Čekada
Title:	Using interactive method of photogrammetric orientation for studying the Skuta glacier
Document type:	graduation thesis – university studies
Scope and tools:	30 p., 5 tab., 18 fig., 2 ann.
Keywords:	interactive method of photogrammetric orientation, exterior orientation, DTM, glacier, area, volume, archival image, Skuta glacier

Abstract:

An interactive method of photogrammetric orientation is a single-image acquisition method, which allows us to determine 3D-position of the image details based just on one image and digital terrain model. Exterior orientation is a procedure that gives us information about the position and orientation of the camera at the time when the image was taken. Parameters of exterior orientation are derived from a search for the optimal matching of the image detail with the projected DTM. In this graduation thesis we used a selection of archival images of the Skuta glacier from years: 1963, 1982, 1995, 2006, 2010 and 2015. Those images were provided by the Anton Melik Geographical Institute by the Slovenian Academy of Sciences and Arts. For interactive orientation we used existing program, which was created at the Geodetic Institute of Slovenia. For each archival image we determined the parameters of exterior orientation and captured the 3D-circumference of the glacier. Then we calculated area, volume and altitude of the upper edge of the glacier using the ArcMap software. We found out that the area of the glacier decreased by 61% over the period 1963 and 2015. In the years between 1963 and 2006 the volume of the glacier decreased by 371.000 m³. And the altitude of the upper edge of the glacier decreased by 40 m between 1963 and 2015. We have determined how the change of glacier surface is related to the change of the annual air temperature. At the end we evaluated the accuracy of the used method.

»Ta stran je namenoma prazna.«

ZAHVALA

Zahvalila bi se svoji mentorici doc. dr. Mojci Kosmatin Fras in somentorici doc. dr. Mihaeli Triglav Čekada za vso pomoč pri izvedbi diplomske naloge.

Zahvaljujem se Geografskemu Inštitutu Antona Melika ZRC SAZU za posredovane arhivske posnetke, brez katerih izvedba diplomske naloge ne bi bila mogoča.

Prav tako bi se rada zahvalila svoji družini, prijateljem in sošolcem, ki so me podpirali v času študija.

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....	V
ZAHVALA	VII
KAZALO VSEBINE	IX
KAZALO SLIK	X
KAZALO PREGLEDNIC.....	XI
KAZALO GRAFIKONOV	XII
1 UVOD.....	1
1.1 Namen in cilji diplomske naloge	1
2 O LEDENIKU POD SKUTO.....	3
3 TEORETIČNE OSNOVE	5
3.1 DMR.....	5
3.2 Zunanja orientacija posnetkov	5
3.3 Interaktivna metoda orientacije	6
4 DOLOČITEV OBSEGA LEDENIKA Z INTERAKTIVNO METODO ORIENTACIJE.....	7
4.1 Vhodni podatki	7
4.1.1 Arhivski posnetki.....	7
4.1.2 Digitalni model reliefa.....	8
4.2 Programska oprema	9
4.3 Postopek	11
5 IZRAČUN POVRŠIN	14
5.1 Vhodni podatki	14
5.2 Postopek izračuna v programskem orodju ArcMap	14
6 IZRAČUN PROSTORNIN	16
6.1 Vhodni podatki	16
6.2 Postopek izračuna v programskem orodju ArcMap	16
7 ANALIZA REZULTATOV	17
7.1 Analiza sprememb površine ledenika	17
7.2 Analiza sprememb prostornine ledenika.....	23
7.3 Prikaz sprememb višine zgornjega robu ledenika.....	25
7.4 Ocena natančnosti metode	26
8 ZAKLJUČEK.....	28
VIRI	29

KAZALO SLIK

Slika 1: Ledenik pod Skuto, 2010 (avtor: Miha Pavšek, vir: GIAM ZRC SAZU)	3
Slika 2: Uporabljeni arhivski posnetki Ledenika pod Skuto: (a) posnetek iz leta 1963 (avtor: Dušan Košir), (b) posnetek iz leta 1982 (avtor: Milan Šifrer), (c) posnetek iz leta 1995 (avtor: Miha Pavšek), (d) posnetek iz leta 2006 (avtor: Miha Pavšek), (e) posnetek iz leta 2010 (avtor: Miha Pavšek), (f) posnetek iz leta 2015 (avtor: Miha Pavšek), (vir: GIAM ZRC SAZU)	8
Slika 3: Atlas okolja	9
Slika 4: Prikaz Ledenika pod Skuto v programu Fugroviewer	10
Slika 5: Prikaz Ledenika pod Skuto v Gaega +	10
Slika 6: Prikaz Ledenika pod Skuto v programu za interaktivno orientacijo	11
Slika 7: Orientiran posnetek iz leta 1995 (vir podlage: GIAM ZRC SAZU)	12
Slika 8: Zajet obod ledenika na posnetku iz leta 2010 (vir podlage: GIAM ZRC SAZU)	13
Slika 9: Prikaz vidnega oboda ledenika iz leta 2015 ter zakritega dela, ki sem ga določila na osnovi predpostavke (vir podlage: ortofoto NH-WF)	15
Slika 10 in slika 11: Obod Ledenika pod Skuto leta 1963 in 1982 (vir podlage: ortofoto NH-WF)	19
Slika 12 in slika 13: Obod Ledenika pod Skuto leta 1995 in 2006 (vir podlage: ortofoto NH-WF)	19
Slika 14 in slika 15: Obod Ledenika pod Skuto leta 2010 in 2015 (vir podlage: ortofoto NH-WF)	20
Slika 16: Spremembe višine zgornjega robu ledenika, fotografija iz leta 2015 (vir podlage: GIAM ZRC SAZU)	26
Slika 17: Interaktivna orientacija posnetka iz leta 2010: (a) optimalni orientacijski parametri, (b) vsi trije koti povečani za $+0,2^\circ$, (c) vsi trije koti zmanjšani za $-0,2^\circ$	27
Slika 18: Obod ledenika pri optimalnih parametrih orientacije in pri spremenjenih kotih za $\pm 0,2^\circ$, podatki za leto 2010	27

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Površine Ledenika pod Skuto od leta 1963 do leta 2015 pridobljene z interaktivno metodo orientacije.....	17
Preglednica 2: Površina Ledenika pod Skuto od leta 1946 do leta 2017 (avtor: Trobec in Pavšek (2017), vir: Arhiv GIAM ZRC SAZU)	20
Preglednica 3: Prikaz povprečnih letnih temperatur na Krvavcu (vir: ARSO)	21
Preglednica 4: Prostornine Ledenika pod Skuto od leta 1963 do leta 2015	23
Preglednica 5: Povprečna nadmorska višina zgornjega robu Ledenika pod Skuto od leta 1963 do leta 2015	25

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Sprememba površine Ledenika pod Skuto od leta 1963 do leta 2015	18
Grafikon 2: Prikaz spremembe površine Ledenika pod Skuto izmerjene z interaktivno metodo orientacije, spremembe površine avtorja Pavška (avtor: Pavšek (2017), vir: GIAM ZRC SAZU) in prikaz spremembe povprečne letne temperature na Krvavcu (vir: ARSO).....	22
Grafikon 3: Sprememba razlike prostornine Ledenika pod Skuto od leta 1963 do leta 2015	24
Grafikon 4: Spreminjanje višine zgornjega robu Ledenika pod Skuto od leta 1963 do leta 2015.....	25

1 UVOD

Alpski ledeniki so pomembni pokazatelji kratkoročnih in dolgoročnih podnebnih sprememb (Triglav Čekada in sod. 2012). V Sloveniji imamo dva manjša ledenika: Triglavski ledenik in Ledenik pod Skuto. Slednjega sem preučevala v diplomski nalogi.

Redne meritve Ledenika pod Skuto so začeli izvajati leta 1948. Sprva so uporabljali metodo z označbo merilnih točk in meritve z merskim trakom, kasneje pa so začeli z uporabo geodetskih tehnik, in sicer s tahimetrično metodo izmere (Triglav Čekada in sod., 2012). Ena izmed možnih metod zajema podatkov o ledenikih pa je tudi interaktivna metoda fotogrametrične orientacije posnetkov, ki je predstavljena v diplomski nalogi. Le-ta je že bila izvedena na drugih ledenikih, vendar pa jo prvič uporabljamo na Ledeniku pod Skuto.

S pomočjo interaktivne orientacije posnetkov lahko ugotavljamo nekdanje stanje ledenika. Določimo lahko površino in prostornino za nazaj, ne da bi za to potrebovali časovni stroj. Vse kar potrebujemo, je arhivski posnetek ter digitalni model reliefa (DMR). S pomočjo ujemanja detajlov na posnetku in DMR-ja določimo koordinate oboda ledenika, iz katerega lahko v nadaljevanju izračunamo površino in prostornino. Tako lahko, če imamo arhivske posnetke iz več let, vidimo spremembe, ki jih je na ledeniku pustil čas.

Diplomska naloga je sestavljena iz osmih poglavij. V drugem poglavju so predstavljene osnovne značilnosti Ledenika pod Skuto. Temu sledi poglavje, v katerem so opisane teoretične osnove: digitalni model reliefa, zunanja orientacija posnetkov, interaktivna metoda orientacije. V četrtem poglavju je podrobno predstavljena izvedba interaktivne metode orientacije: opisani so vhodni podatki, uporabljena programska oprema in sam postopek izvedbe omenjene metode. V petem in šestem poglavju sta predstavljena izračuna površine in prostornine ledenika. Temu sledi še poglavje z analizo rezultatov ter zaključek.

1.1 Namen in cilji diplomske naloge

Namen diplomske naloge je bil določiti ter predstaviti spremembe površine in prostornine Ledenika pod Skuto z uporabo interaktivne metode fotogrametrične orientacije posnetkov. Podobne raziskave so bile do sedaj že izvedene na ledenikih, in sicer na primeru Triglavskega ledenika in Kaninskih ledenikov. Vendar pa omenjena metoda še ni bila uporabljena na Ledeniku pod Skuto.

V okviru diplomske naloge so bili zastavljeni naslednji cilji:

1. cilj: izbor ustreznih arhivskih posnetkov

Iz arhivskih posnetkov, ki nam jih je posredoval Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU, je bilo potrebno narediti ustrezen izbor. S tem je mišljeno, da smo izbrali tiste, ki so najboljše prikazovali ledenik in so bili posneti v enakih časovnih intervalih.

2. cilj: določitev projekcijskega centra (stojišča fotoaparata) in orientacija izbranih posnetkov
Ob pregledu obravnavnega območja je bilo potrebno ugotoviti, iz kje so bile fotografije ledenika posnete ter izvesti interaktivno orientacijo arhivskih posnetkov v programu, ki je nastal na Geodetskem inštitutu Slovenije.
3. cilj: izmera oboda ledenika in izračun površine ter prostornine ledenika
Potrebno je bilo izmeriti 3D-koordinate oboda ledenika ter na podlagi teh izračunati površino in prostornino Ledenika pod Skuto. Poleg tega smo ugotavljali še nadmorsko višino zgornjega roba ledenika in ocenili natančnost uporabljene metode.

2 O LEDENIKU POD SKUTO

V Sloveniji se nahajata le dva manjša ledenika, to sta Triglavski ledenik in Ledenik pod Skuto. Ta spadata med najbolj jugovzhodno ležeče ledenike v Alpah. Ledenik pod Skuto se nahaja v Kamniško Savinjskih Alpah, blizu naselja Zgornje Jezersko. V obdobju pleistocena se je na tem območju raztezal Jezerski ledenik, ki je ustvaril ledeniško dolino, imenovano Ravenska kočna (Trobec in Pavšek, 2010). Na koncu Ravenske kočne se nahaja Ledenik pod Skuto, ki pa je najverjetneje nastal v Mali ledeni dobi tako kot Triglavski ledenik. Ledenik leži na severnem pobočju gorske verige v senci dveh večjih vrhov Skute (2532 m) in Kranjske Rinke (2451 m) (Meze, 1955).



Slika 1: Ledenik pod Skuto, 2010 (avtor: Miha Pavšek, vir: GIAM ZRC SAZU)

Zaradi svoje senčne lege in plazov, ki se spuščajo iz strmih bližnjih vrhov, se je kljub spreminjajočim podnebnim razmeram ohranil vse do danes. Ledenik se razteza približno od 2020 m pa vse do 2120 m nadmorske višine in ima tako na majhnem območju precej veliko višinsko razliko – 100 m (Pavšek, 2018). Iz tega dejstva lahko sklepamo, da je le-ta zelo strm. Povprečen naklon je okoli 42°, zgornjem desnem delu pa doseže tudi do 50° (Meze, 1955).

Kljub svoji majhnosti pa so bile na njem v preteklosti vidne vse značilnosti ledenika, to so: plastovitost in slojevitost, ki nastaneta zaradi odlaganja in različne sestave snega skozi daljša časovna obdobja; progavost in črtavost, ki sta posledica pritiska; striženje plasti, ki nastane zaradi vplivov strižnih napetosti in ledeniški led, ki nastane iz snega v dolgoletnih procesih ter ima gostoto 860 kg/m^3 (Pavšek, 2004).

Danes je od ledeniških značilnosti na samem ledeniku ostal le ledeniški led (Triglav Čekada in sod. 2012), poleg tega na njem večinoma opazimo firnov led, ki je redkejši. Povprečna debelina ledu naj bi bila v letu 2004 od tri do šest metrov (Pavšek, 2004). Morenski nasip je lepo viden na sliki 1, pod samim ledenikom malce na desno.

Prve meritve segajo v leto 1948, ko so začeli z raziskovanjem Ledenika pod Skuto. Sprva so izvajali meritve s klasično metodo, s katero so odčitavali dolžine (debeline) ledenika od označenih merskih točk, kasneje pa so dodali še izmero s teodolitom (Pavšek, 2012). Poleg tega so ledenik občasno fotografirali iz »stalnega stojišča pri macesnu«, te posnetke sem uporabila v diplomski nalogi. Vsakoletne meritve izvajajo ob koncu talilne sezone, saj ima takrat ledenik najmanjši obseg. Raziskovanje Ledenika pod Skuto spada med najstarejše znanstveno raziskovalne projekte Geografskega inštituta Antona Melika ZRC SAZU (GIAM ZRC SAZU).

Prostornine ledenikov se lahko določajo s pomočjo georadarja, tega so na Triglavskem ledeniku uporabili leta 1999 in ocenili prostornino na 20.000 m^3 (Pavšek, 2012). Na Ledeniku pod Skuto izmere z omenjeno metodo niso izvedli, so pa leta 2006 uporabili parni vrtalnik. S pomočjo le-tega so ocenili prostornino ledenika na 80.000 m^3 . Če primerjamo obe prostornini lahko vidimo, da je Ledenik pod Skuto konkretnější od Triglavskega, vendar pa ga ta premaga v površini (Pavšek, 2012).

3 TEORETIČNE OSNOVE

V tem poglavju so na kratko predstavljene teoretične osnove, ki so potrebne za razumevanje izvedbe interaktivne metode fotogrametrične orientacije posnetkov.

3.1 DMR

Digitalni model reliefa (DMR) je digitalna zbirka podatkov o oblikovanosti zemeljskega površja. Predstavlja prikaz višinskih točk reliefa, medtem ko digitalni model površja (DMP) vključuje še podatke o naravnih značilnosti površja, kot so vrhovi dreves, stavb... Nadpomenka obeh je digitalni model višin (DMV), ki predstavlja kakršnekoli višinske točke, ki so večinoma zapisane v pravilnih celičnih mrežah (Podobnikar, 2002). Različni DMV-ji danes predstavljajo osnovne izdelke, izdelane s pomočjo fotogrametričnih in lidarskih postopkov obdelave.

3.2 Zunanja orientacija posnetkov

Poglavje je na kratko povzeto po prosojnicah in zapiskih predavanj iz predmeta Fotogrametrija I (Kosmatin Fras, 2017).

Zunanja orientacija posnetka je postopek določanja parametrov, s katerimi opredelimo prostorski položaj posnetka v trenutku njegovega nastanka. Pred tem moramo za posnetek poznati parametre notranje orientacije, s katerimi vzpostavimo slikovni koordinatni sistem. Zunanja orientacija opiše položaj slikovnega koordinatnega sistema glede na objektni (t.j. poljubni prostorski, referenčni ipd.) koordinatni sistem. Definirana je s šestimi parametri, in sicer:

- tremi zasuki (rotacije) in
- tremi premiki (translacije)

Tri premike predstavljajo koordinate projekcijskega centra (X_{PC} , Y_{PC} , Z_{PC}) v objektnem koordinatnem sistemu, tri zasuke pa predstavljajo zasuki slikovnega koordinatnega sistema glede na objektni koordinatni sistem (α , ν , κ ; oznake kotov, ki se uporabljajo pri terestričnih posnetkih) in so izraženi v rotacijski matriki.

Parametre zunanje orientacije lahko določimo na podlagi naslednje kolinearne enačbe:

$$\begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{PC} \\ Y_{PC} \\ Z_{PC} \end{pmatrix} + m_P \cdot R \cdot \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ -c \end{pmatrix}$$

Kjer so:

X_P , Y_P , Z_P ... objektne koordinate prostorske točke P

X_{PC} , Y_{PC} , Z_{PC} ... objektne koordinate projekcijskega centra PC

m_P ... merilo posnetka

R ... rotacijska matrika

$x_P, y_P, \dots$ slikovne koordinate slikovne točke P

c ... konstanta fotoaparata (goriščna razdalja)

3.3 Interaktivna metoda orientacije

Interaktivna metoda orientacije je enoslikovna metoda, kar pomeni, da določimo 3D-položaj vsebine posnetka na podlagi enega posnetka, pri čemer pa moramo imeti še dodatno informacijo o površju. Takšen zajem iz enega posnetka imenujemo tudi monokartiranje (angl. monoplottting).

Parametri zunanje orientacije posnetka so dobljeni z interaktivnim iskanjem optimalnega ujemanja projekcije digitalnega modela reliefa na vsebino posameznega posnetka. Ta metoda zahteva operaterjevo dobro poznavanje detajlov slike in je lahko zelo zamudna. Najbolj primerni posnetki za interaktivno metodo orientacije so panorame, ki vsebujejo veliko detajlov, kot so stavbe, drevesa, linije cest in druge naravne značilnosti, pri teh namreč hitro opazimo distorzije. Metoda je bila razvita kot orodje za odkrivanje napak na laserskih oblakih točk, saj je z njo operater hitro odkril, če katera od točk oziroma skupina točk ne ustreza detajlom slike. Metoda je lahko uporabna tudi za direktno relativno orientacijo dveh laserskih oblakov točk (Triglav Čekada in sod., 2011).

Metodo lahko razdelimo na tri korake:

- priprava DMR-ja,
- izbira in priprava različnih posnetkov enakega območja, tu imamo v mislih predvsem odpravo optičnih distorzij,
- interaktivna orientacija digitalnega modela reliefa na prej obdelane posnetke.

Osnova za interaktivno orientacijo je projiciranje 3D-točk iz objektnega koordinatnega sistema v slikovni koordinatni sistem posnetka. Orientacija se začne z uporabo približnih orientacijskih parametrov, ki jih operater kasneje spreminja. Operater interaktivno spreminja rotacijo kamere in lokacijo projekcijskega centra tako, da doseže optimalno prekrivanje 3D-točk z vsebino slike (Triglav Čekada in sod., 2011).

Računanje interaktivne orientacije lahko razdelimo na naslednje dele:

- sukanje slikovnega koordinatnega sistema v objektnem koordinatnem sistemu,
- premiki projekcijskega centra kamere,
- sprememba merila,
- uporaba novih vrednosti zasukov, premikov in merila za izračun novih slikovnih koordinat 3D-točk.

4 DOLOČITEV OBSEGA LEDENIKA Z INTERAKTIVNO METODO ORIENTACIJE

4.1 Vhodni podatki

Vhodni podatki za interaktivno metodo orientacije posnetkov so arhivski posnetki ledenika, ki so bili posneti v različnih časovnih obdobjih in digitalni model reliefa.

4.1.1 Arhivski posnetki

Iz obstoječih posnetkov iz arhiva GIAM ZRC SAZU, ki prikazujejo Ledenik pod Skuto, sem naredila ožji izbor tistih, ki so se mi zdeli najbolj primerni za obdelavo z interaktivno metodo orientacije. Pri tem sem bila pozorna, da so bili posnetki posneti približno iz istega stojišča, kar mi je kasneje pri obdelavi le-teh olajšalo določanje optimalnih parametrov orientacije. Prav tako sem bila pozorna na to, katerega leta so bili posneti, saj sem želela pridobiti približno enake časovne intervale med posnetki za enakomeren prikaz sprememb površine ledenika.

Izbrala sem šest posnetkov iz let: 1963, 1982, 1995, 2006, 2010 in 2015. Najstarejši posnetek sega v leto 1963 in lepo prikazuje stanje ledenika. Naslednji posnetek je bil posnet 19 let kasneje, leta 1982, tretji pa je bil posnet leta 1995. Ta dva ne prikazujeta vrhov gora nad ledenikom, kar je otežilo orientacijo posameznega posnetka. Naslednji trije posnetki pa si sledijo v krajših časovnih intervalih, saj sem imela na voljo več posnetkov.



(a)



(b)



(c)



(d)

(e)



(f)

Slika 2: Uporabljeni arhivski posnetki Ledenika pod Skuto: (a) posnetek iz leta 1963 (avtor: Dušan Košir), (b) posnetek iz leta 1982 (avtor: Milan Šifrer), (c) posnetek iz leta 1995 (avtor: Miha Pavšek), (d) posnetek iz leta 2006 (avtor: Miha Pavšek), (e) posnetek iz leta 2010 (avtor: Miha Pavšek), (f) posnetek iz leta 2015 (avtor: Miha Pavšek), (vir: GIAM ZRC SAZU)

4.1.2 Digitalni model reliefa

Pri interaktivni metodi orientacije posnetkov je drugi ključni vhodni podatek digitalni model reliefa (DMR). Ta vsebuje podatke o položaju in višinah posameznih točk. V raziskavi sem za obdelavo vseh šestih posnetkov uporabila DMR, pri katerem je bila velikost celice $1\text{ m} \times 1\text{ m}$. Ta je bil izdelan na

podlagi aerolaserskega skeniranja površja, ki ga je izvedlo podjetje Flycom za Geodetski inštitut Slovenije v okviru evropskega projekta NH-WF.

Snemanje je potekalo 18. septembra 2012. Oblak laserskih točk je bil posnet s povprečno gostoto 8 točk/m². Uporabljen je bil laserski skener Riegl LM5600, z valovno dolžino 1550 nm in višino snemanja nad terenom 700 m (Šolar, 2013).

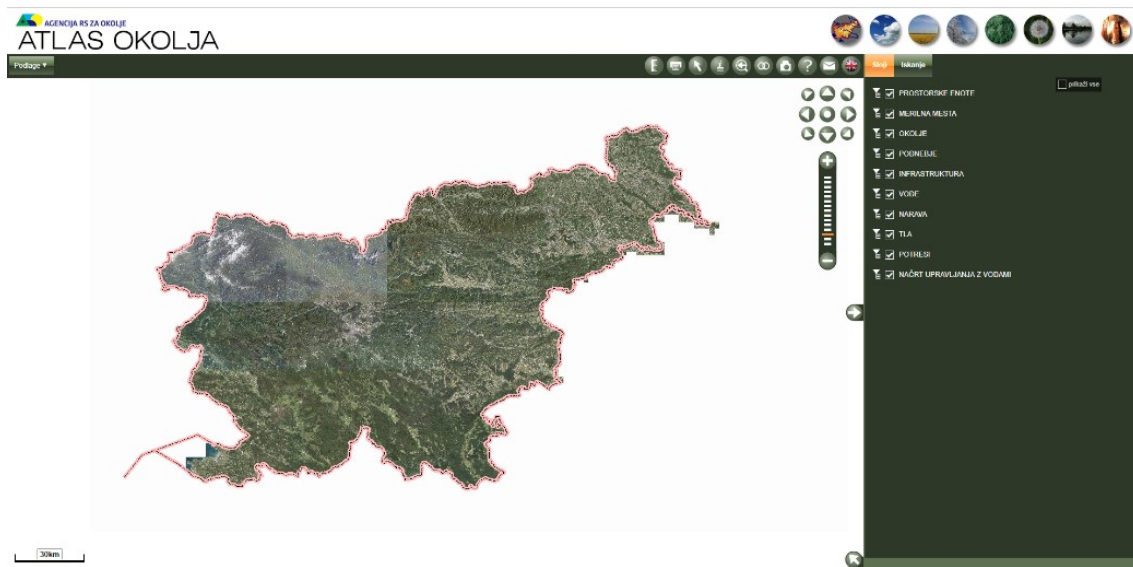
S tem snemanjem je bilo posneto stanje ledenika ob koncu talilne dobe, kar nam poda informacije o najmanjši velikosti ledenika.

4.2 Programska oprema

Za določitev stojišča sem si pomagala z naslednjimi programskimi orodji:

- Atlas okolja (<http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/>)

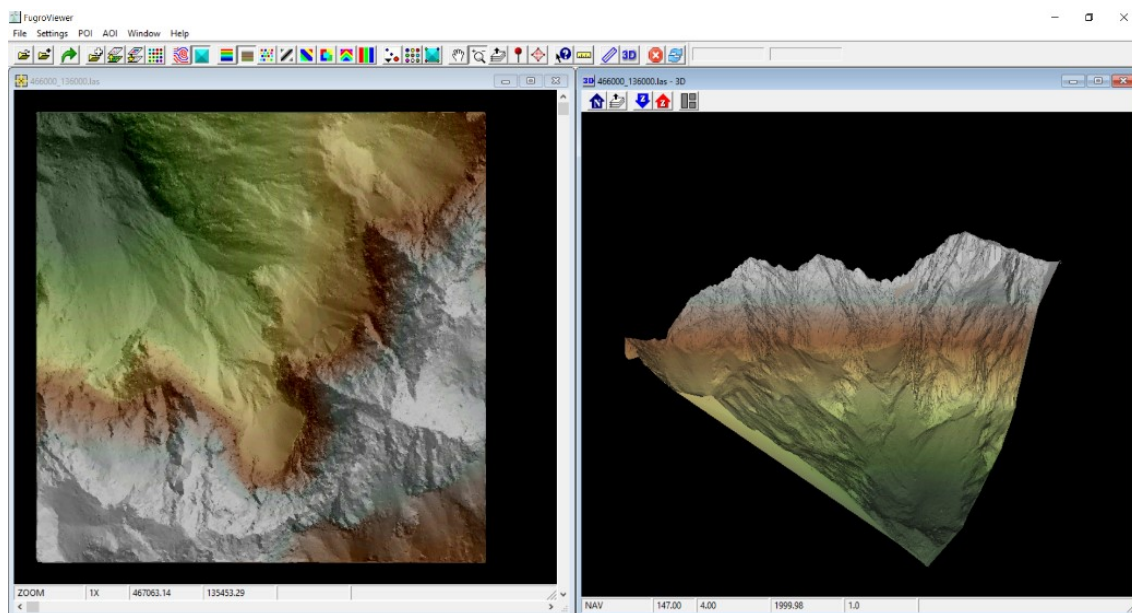
Atlas okolja je spletna aplikacija, ki omogoča vpogled v prostorske podatkovne baze z uporabo spletnega brskalnika. Nastal je na pobudo Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO). S pomočjo podatkov, ki so na voljo sem se lažje orientirala in poiskala približno stojišče fotoaparata.



Slika 3: Atlas okolja

- FugroViewer (<https://www.fugro.com/>)

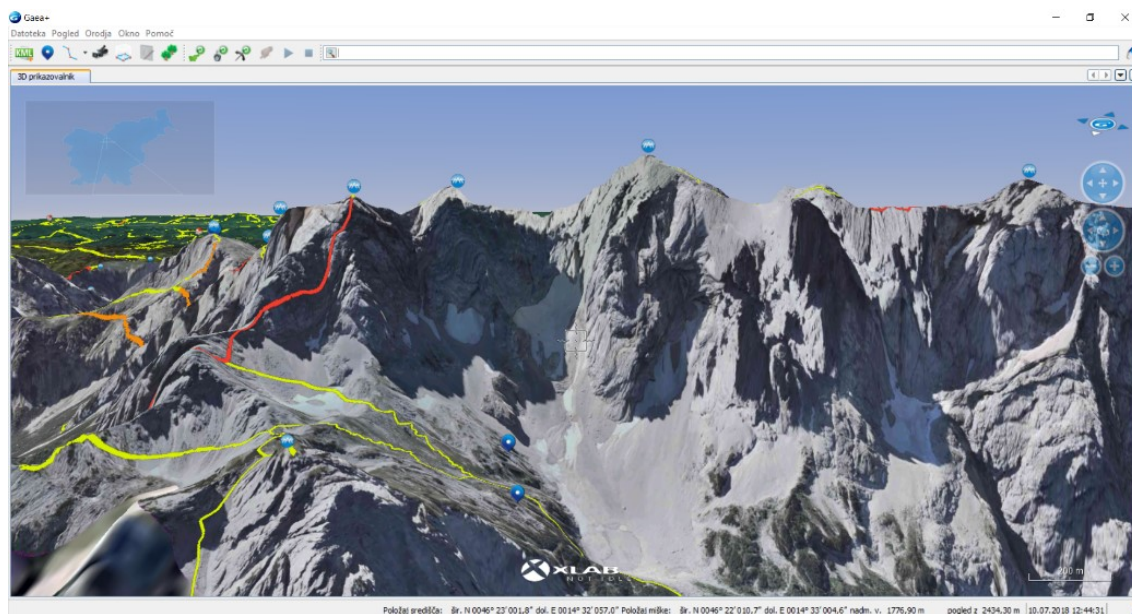
Je brezplačen program, ki omogoča prikaz, analizo in predstavitev predvsem lidarskih podatkov oziroma oblakov točk. Z njim sem si ogledala lidarske podatke ledenika in njegove okolice. Program omogoča tudi 3D-pogled in tako lažjo predstavbo.



Slika 4: Prikaz Ledenika pod Skuto v programu Fugroviewer

- Gaea + za Planinsko zvezo Slovenije (<http://www.gaeaplus.eu/en/>)

Je programsko orodje za prikazovanje, analiziranje in urejanje prostorskih podatkov. Omogoča prikaz in načrtovanje planinskih poti. Vsebuje podatke o planinskih kočah, poteh in vrhovih. Omogoča 3D-pogled reliefa in določevanje koordinat.

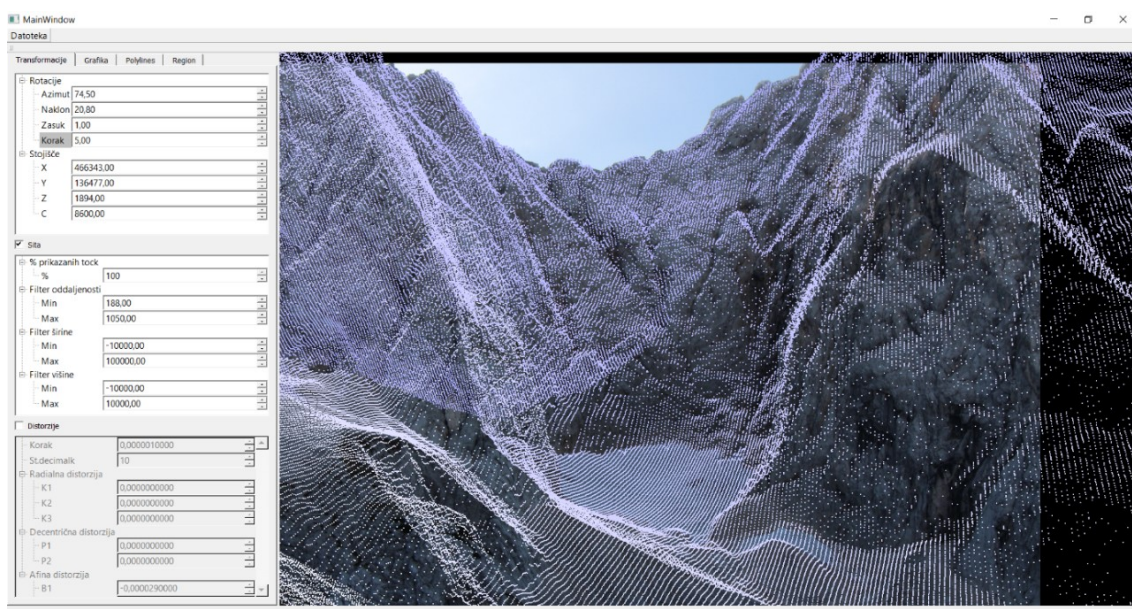


Slika 5: Prikaz Ledenika pod Skuto v Gaega +

- program za interaktivno orientacijo GI (gi-qtvtk.exe)

Pri obdelavi podatkov sem uporabila program gi-qtvtk.exe za interaktivno metodo orientacije posnetkov, ki je nastal na Geodetskem inštitutu Slovenije. Program deluje tako, da vanj vnesemo arhivsko sliko ledenika in digitalni model reliefa. Po vnosu podatkov začnemo z urejanjem

orientacije posnetkov. Pri tem lahko spreminjamo azimut, naklon, zasuk in stojišče (X_{PC} , Y_{PC} , Z_{PC} koordinate in merilo) ter iščemo optimalno prileganje projekcije DMR na vsebino fotografije. Poleg tega pa omogoča vključevanje vplivov radialne, decentrične in afine distorzije. Pod zavihkom grafika je možna nastavitev grafičnega prikaza, sprememba barve in debeline točk. Pod zavihkom polylines pa lahko zajamemo polilinjijo, v mojem primeru obod ledenika.



Slika 6: Prikaz Ledenika pod Skuto v programu za interaktivno orientacijo

4.3 Postopek

Prvi korak pri interaktivni metodi orientacije je izbor posnetkov ledenika in pridobitev digitalnega modela reliefa. Kot sem že omenila, sem si izbrala posnetke iz let 1963, 1982, 1995, 2006, 2010 in 2015 ter DMR z velikostjo $1\text{ m} \times 1\text{ m}$, ki prikazuje stanje iz leta 2012. Naslednji pomemben korak je bil določitev približnega stojišča fotoaparata, kar predstavlja enega od parametrov zunanje orientacije. Določitev stojišča je bila časovno zamudna, saj nisem vedela, iz kje so bili posnetki posneti. Imela sem le podatek, da je bilo to stojišče pri macesnu. Po pregledu terena s pomočjo zgoraj opisane programske opreme: Atlas okolja, FugroViewer in Gaea+ mi je le uspelo določiti koordinate stojišča za posamezen posnetek. Koordinate so bile tako kot DMR določene v koordinatnem sistemu D48/GK.

Koordinate projekcijskega centra z ocenjeno natančnostjo, »stojišče pri macesnu«:

$$x = 136432\text{ m} \pm 30\text{ m}$$

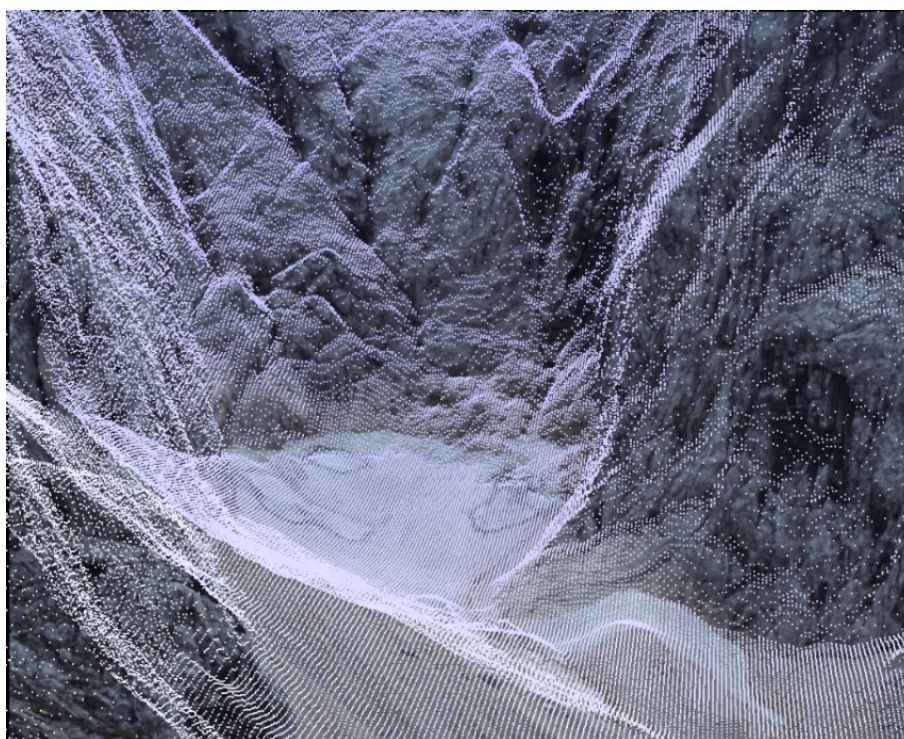
$$y = 466343\text{ m} \pm 30\text{ m}$$

$$H = 1898\text{ m} \pm 5\text{ m}$$

Po določenih približnih koordinatah stojišča, sem lahko začela z nadaljnjim določevanjem orientacije. Pri tem sem uporabila program gi-qtvtk.exe. Vanj sem vnesla vhodne podatke: arhivski posnetek in DMR. Moja naloga je bila, da s spreminjanjem ostalih parametrov zunanje orientacije (azimut, naklon, zasuk in merilo) najdem optimalno ujemanje točk digitalnega modela reliefa z naravnimi linijami.

Ledenik leži v krnici, ki jo obdajajo visoke stene vrhov. Glede na to, da od leta 1963, ko je bil posnet najstarejši posnetek, ki sem ga imela na voljo, na tem območju ni bilo večjih zunanjih preoblikovanj površja sem lahko predpostavila, da se površje ni spremenilo. Na podlagi te predpostavke sem lahko DMR iz leta 2012 uporabila tudi na starejših arhivskih posnetkih in jih tako primerjala z današnjim obsegom ledenika.

Pri posnetkih iz leta 1982 in 1995 zgornji rob gorske verige zaradi megle in postavitve fotoaparata ni viden. To mi je otežilo določitev parametrov orientacije, morala sem se orientirati predvsem na skalno steno nad in ob ledeniku. Spodnja slika 7 prikazuje orientiran posnetek iz leta 1995, na katerem je viden tudi digitalni model reliefa. Točke, ki so bolj oddaljene so obarvane z vijolično barvo, tiste, ki so bližje pa z belo barvo.



Slika 7: Orientiran posnetek iz leta 1995 (vir podlage: GIAM ZRC SAZU)

V programu je bila na voljo vključitev distorzij, ki bi DMR prilagodile za radialno, decentrično in afino distorzijo. Sama te možnosti nisem uporabila, saj se mi je zdela orientacija posnetkov sprejemljiva že brez odstranjevanja, vključevanja dodatnih parametrov.

Ko sem dosegla ujemanje vidnih linij DMR-ja z naravnimi linijami na posnetku, predvsem sem bila pozorna, da je bilo ujemanje dobro v neposredni okolici ledenika, sem s polilinijo zajela obod ledenika. Le-ta je prikazan na sliki 8. Točke oboda sem lahko shranila kot *.xyz datoteko, ki sem jo kasneje uporabila za izračun površine, prostornine in povprečne višine zgornjega robu ledenika.



Slika 8: Zajet obod ledenika na posnetku iz leta 2010 (vir podlage: GIAM ZRC SAZU)

Orientacijski parametri so podani v Prilogi B.

5 IZRAČUN POVRŠIN

5.1 Vhodni podatki

Vhodni podatki za izračun površin ledenika so XYZ koordinate oboda, ki sem ga zajela po prej opisanem postopku. Dobila sem šest datotek s koordinatami, ki prikazujejo obod ledenika za posamezno leto.

5.2 Postopek izračuna v programskem orodju ArcMap

Površino ledenika sem za vsak posnetek posebej izračunala s pomočjo programske opreme ArcMap, gre za projicirano površino na 0 m. Najprej sem vse *.xyz datoteke, ki sem jih predhodno izvozila iz programa gi-qtvtk.exe uvozila v ArcMap ter jim določila ustrezen koordinatni sistem, D48/GK. Ker so datoteke vsebovale koordinate točk oboda, sem morala le-te povezati v smiseln poligon.

Po ustvarjenih poligonih za vseh šest obodov, sem se lotila izračuna površin. V atributni tabeli posameznega poligona sem ustvarila nov stolpec za površino v hektarjih ter pri vključenem urejevalniku z ukazom »izračunaj površino« izračunala površino.

Pri primerjavi obodov ledenikov z ortofotom terena sem naletela na težavo. In sicer, manjši del ledenika je na arhivskih posnetkih skrit za skalno steno Kranjske Rinke in ga tako z interaktivno metodo orientacije posnetkov nisem mogla zajeti. To sem rešila tako, da sem predpostavila, da je višina zgornjega roba ledenika za posamezno leto enaka povprečni vrednosti nadmorske višine celotnega zgornjega roba. Na podlagi te predpostavke in opazovanja ortofota območja, sem določila približen obseg manjkajočega dela ledenika. Podobno, kot so Triglav Čekada in sod. (2014) to izvedli za Kaninske ledenike v Italiji.



Slika 9: Prikaz vidnega oboda ledenika iz leta 2015 ter zakritega dela, ki sem ga določila na osnovi predpostavke (vir podlage: ortofoto NH-WF)

Na sliki 9 je s svetlo sivo barvo prikazan obod ledenika, ki sem ga zajela iz posnetka iz leta 2015, črtkano označeno območje pa prikazuje del ledenika, ki sem ga zajela z upoštevanjem predpostavke o povprečni nadmorski višini zgornjega roba ledenika. To predpostavko sem uporabila tudi pri ostalih posnetkih. Površine novo nastalih obodov so bile v povprečju večje za 0,22 ha.

6 IZRAČUN PROSTORNIN

6.1 Vhodni podatki

Vhodni podatki za izračun prostornin ledenika so bile XYZ koordinate oboda ledenika iz posameznega leta, ki sem jih že uporabila pri izračunu površin.

6.2 Postopek izračuna v programskem orodju ArcMap

Izračun prostornin v programskem orodju ArcMap sem izvedla s pomočjo dodatka 3D Analyst. V prvem koraku sem obode ledenikov, ki so imeli končnico *.csv izvozila kot *.shp datoteke, iz teh sem nato izdelala TIN za posamezno leto. TIN je mreža nepravilnih trikotnikov s katero predstavimo oblikovanost površja.

Za lažjo primerjavo prostornin med leti, sem vse ledeniške prikaze obrezala na enako površino, in sicer na obod ledenika iz leta 2010. Volumen sem računala nad izbrano ravnino, ki sem jo določila na 1990 m nadmorske višine, kar predstavlja ravnino, ki je 10 m nižja od najnižje višine ledenika. Izmed dobljenih prostornin sem določila najmanjšo, to je bila prostornina iz leta 2006. To sem uporabila kot referenčno prostornino, od katere sem nato odštela ostale in tako dobila ocenjene vrednosti razlik prostornin za posamezno leto.

7 ANALIZA REZULTATOV

7.1 Analiza sprememb površine ledenika

Na podlagi izračunanih površin ledenika od leta 1963 do leta 2015 lahko trdimo, da se je površina ledenika v tem obdobju zmanjšala.

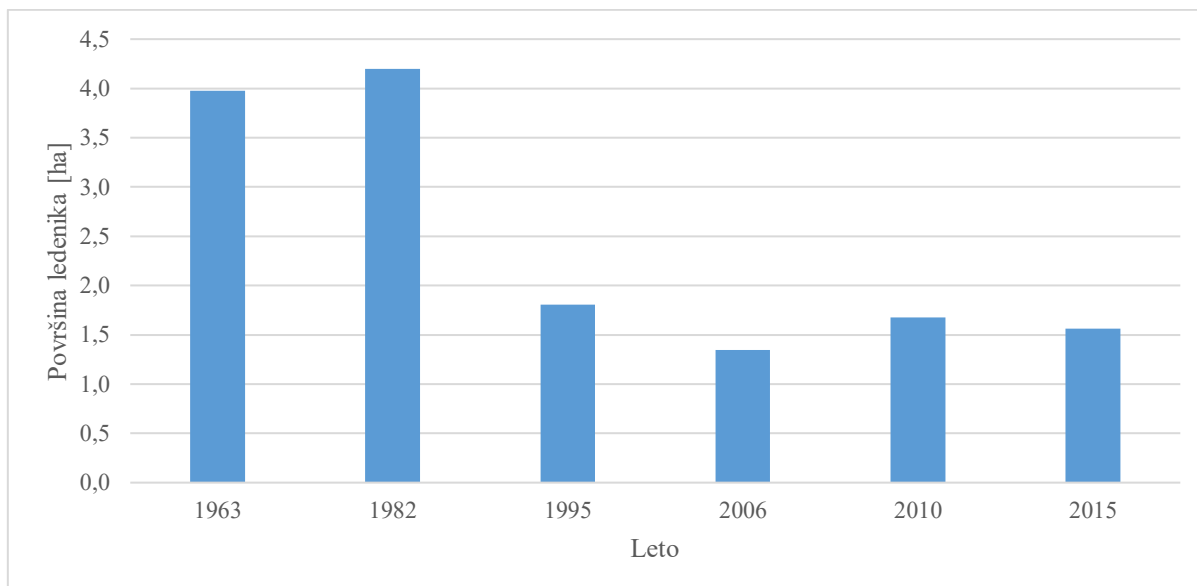
V preglednici 1 so predstavljeni podatki o delni površini ledenika pridobljeni z interaktivno metodo orientacije posnetkov iz let 1963, 1982, 1995, 2006, 2010 in 2015. Poleg površin, dobljenih z interaktivno orientacijo posnetkov, so v tabeli navedeni še dodatki površine, ki so izračunani z uporabo predpostavke o povprečni nadmorski višini zgornjega roba ledenika, ki je opisana v poglavju 5.2. Na koncu je izpisana še skupna površina ledenika.

Preglednica 1: Površine Ledenika pod Skuto od leta 1963 do leta 2015 pridobljene z interaktivno metodo orientacije

<i>Leto</i>	<i>Delna površina [ha]</i>	<i>Površina dodatka [ha]</i>	<i>Skupna površina [ha]</i>
<i>1963</i>	3,74	0,24	3,98 (s snežišči)
<i>1982</i>	3,93	0,27	4,20 (s snežišči)
<i>1995</i>	1,49	0,31	1,80
<i>2006</i>	1,15	0,19	1,34
<i>2010</i>	1,45	0,23	1,68
<i>2015</i>	1,38	0,18	1,56

Najstarejši arhivski posnetek ledenika, ki sem ga imela na voljo, sega v leto 1963. Že iz fotografije je vidno, da je bil takratni obseg ledenika bistveno večji v primerjavi z današnjim stanjem. Na podlagi interaktivne metode orientacije posnetka sem izračunala površino ledenika v letu 1963, ki predstavlja 3,98 ha. Tu gre za površino ledenika skupaj s snežišči. Če pogledamo arhivski posnetek lahko opazimo, da je na ledeniku precej snega, ki se v času snemanja še ni stopil. Prav tako snežišča vidimo na posnetku iz leta 1982, na tem jih je v spodnjem delu vidnih precej več, kot v primerjavi s posnetkom iz leta 1963. Domnevam, da je zaradi tega izračunana površina iz leta 1982 za 0,22 ha večja od površine iz leta 1963.

Na grafikonu 1 je predstavljen trend spreminjanja površine Ledenika pod Skuto.

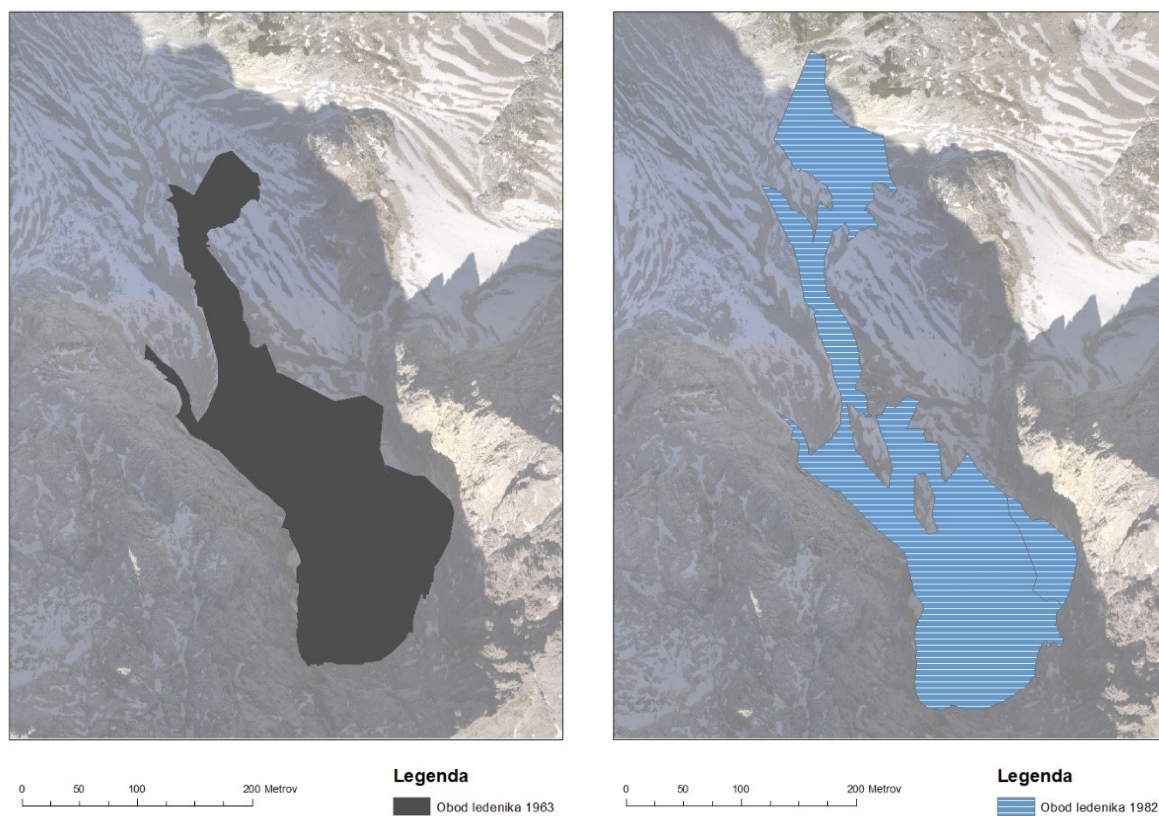


Grafikon 1: Sprememba površine Ledenika pod Skuto od leta 1963 do leta 2015

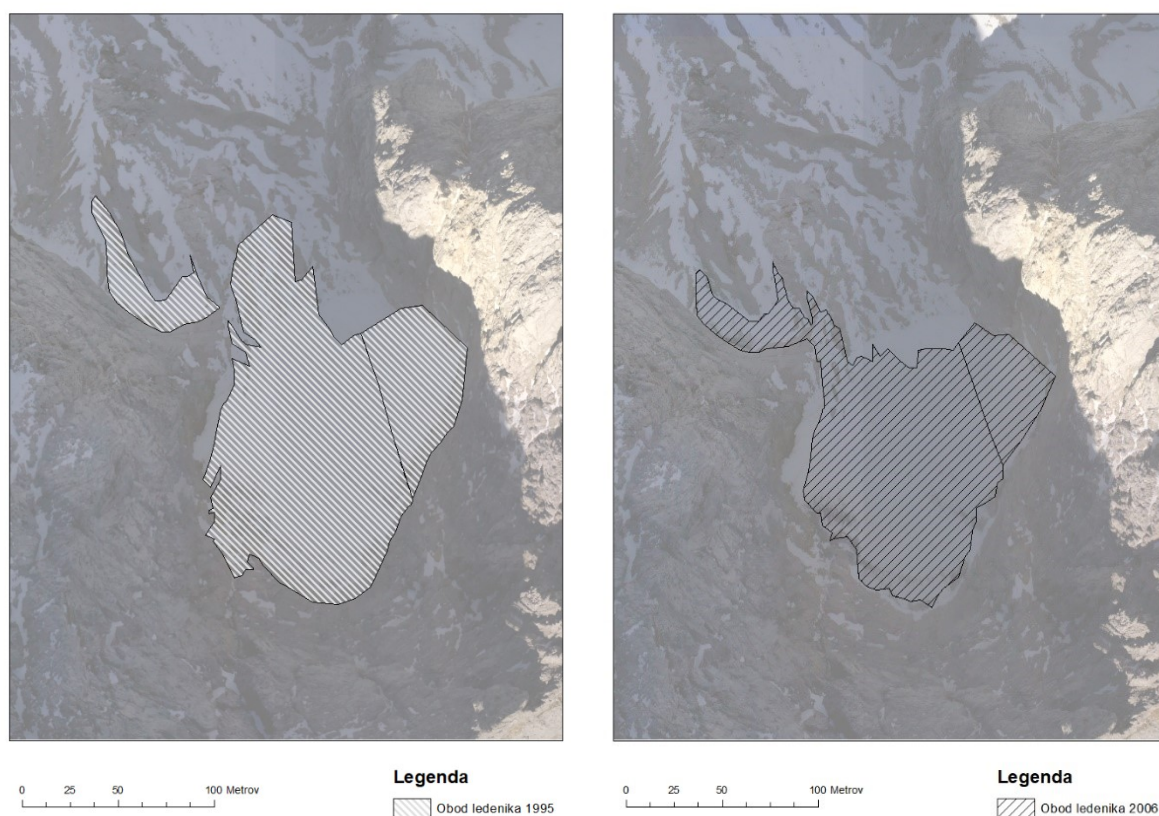
Najbolj drastičen preskok v površini ledenika vidimo pri primerjavi posnetkov iz leta 1982 in leta 1995. Ledenik se je v trinajstih letih zmanjšal za kar 2,40 ha, kar predstavlja skoraj 57 % celotne površine iz leta 1982. V obdobju od leta 1995 do leta 2006 se je ledenik še vedno zmanjševal, vendar ne tako drastično. Iz analize teh dveh posnetkov lahko vidimo, da se je ledenik v enajstih letih spremenil za 0,46 ha. Leta 2006 je bil ledenik najmanjši, njegova površina je merila 1,34 ha.

V letu 2010 lahko opazimo povečanje ledenika. In sicer, v primerjavi z letom 2006 za kar 0,34 ha. V letu 2015 pa zopet opazimo počasno manjšanje ledenika, takratna površina je namreč znašala 1,56 ha, kar je za 0,11 ha manj kot leta 2010.

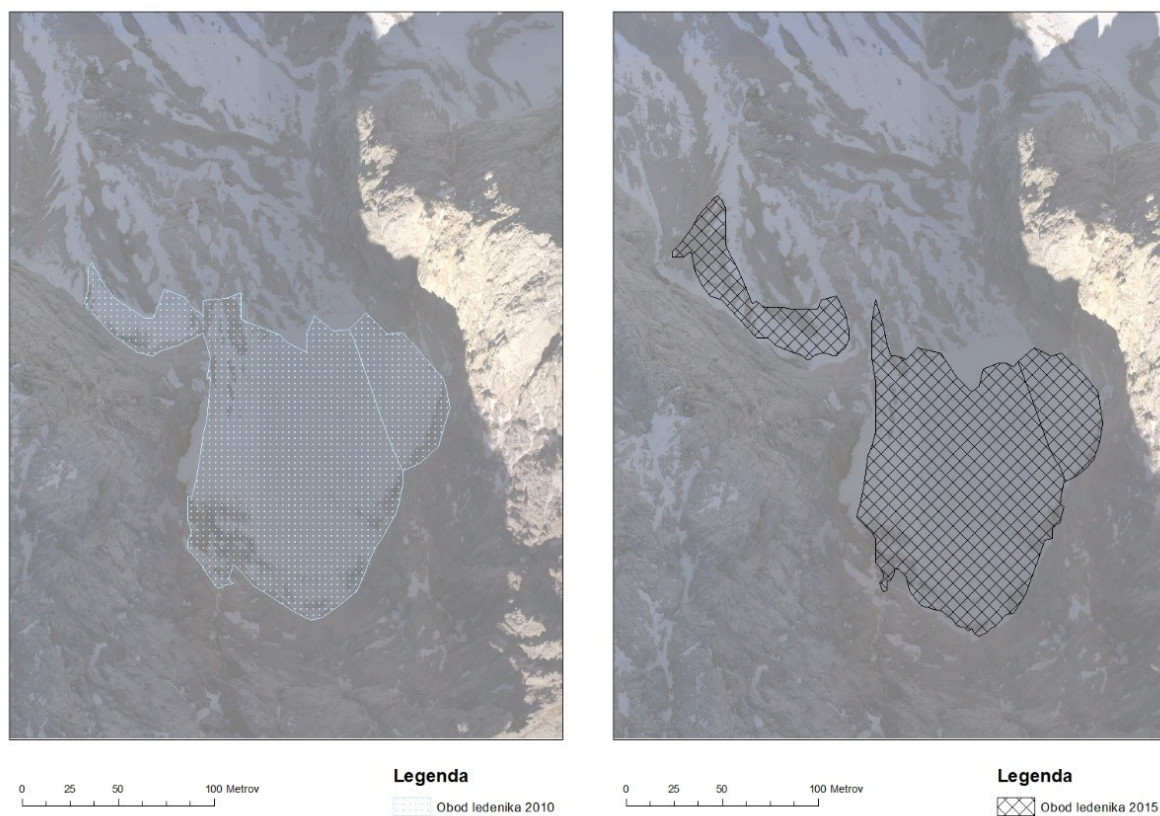
Na slikah 10-15 lahko vidimo, kako se je površina ledenika spremenila v obravnavanem obdobju. V 52 letih se je ledenik zmanjšal za kar 2,42 ha, kar predstavlja približno 61 % površine celotnega ledenika iz leta 1963.



Slika 10 in slika 11: Obod Ledenika pod Skuto leta 1963 in 1982 (vir podlage: ortofoto NH-WF)



Slika 12 in slika 13: Obod Ledenika pod Skuto leta 1995 in 2006 (vir podlage: ortofoto NH-WF)



Slika 14 in slika 15: Obod Ledenika pod Skuto leta 2010 in 2015 (vir podlage: ortofoto NH-WF)

V preglednici 2 so predstavljene površine Ledenika pod Skuto od leta 1946 do leta 2017, ki sem jih pridobila iz vira Trobec in Pavšek (2010).

Preglednica 2: Površina Ledenika pod Skuto od leta 1946 do leta 2017 (avtor: Pavšek (2017), vir: Arhiv GIAM ZRC SAZU)

Leto	Površina [ha]
1946 – 1954	2,5 – 3,0
1950	2,8
1989	1,1
1997	1,5
2003	0,7
2005	~ 1 (ocena)
2007	1,1
2008	1,4
2009	1,8
2010	1,8
2011	1,7
2012	1,4
2013	1,6

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 2

2014	2,1
2015	1,4
2016	1,6
2017	1,4

Pri primerjavi površin, dobljenih z interaktivno metodo orientacije posnetkov (preglednica 1), in javno dostopnih površin ledenika (preglednica 2) lahko vidimo, da se površine bistveno ne razlikujejo. To lahko potrdi zanesljivost določevanja površin z interaktivno metodo orientacije posnetkov.

Vremenski pojavi so pomembni dejavniki, ki vplivajo na taljenje ledu in posledično na zmanjševanje površine ledenika. Zato sem si postavila vprašanje, kako je sprememba povprečne letne temperature v obravnavanem obdobju vplivala na spremembo površine Ledenika pod Skuto? Na spletni strani Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO, 2018) sem pridobila podatke o povprečnih letnih temperaturah na Krvavcu. Vremensko postajo na Krvavcu sem izbrala zaradi primerljive nadmorske višine (1740 m) in podobne lege, saj tudi ta leži v Kamniško Savinjskih Alpah. Dobljene podatke sem predstavila v preglednici 3.

Preglednica 3: Prikaz povprečnih letnih temperatur na Krvavcu (vir: ARSO)

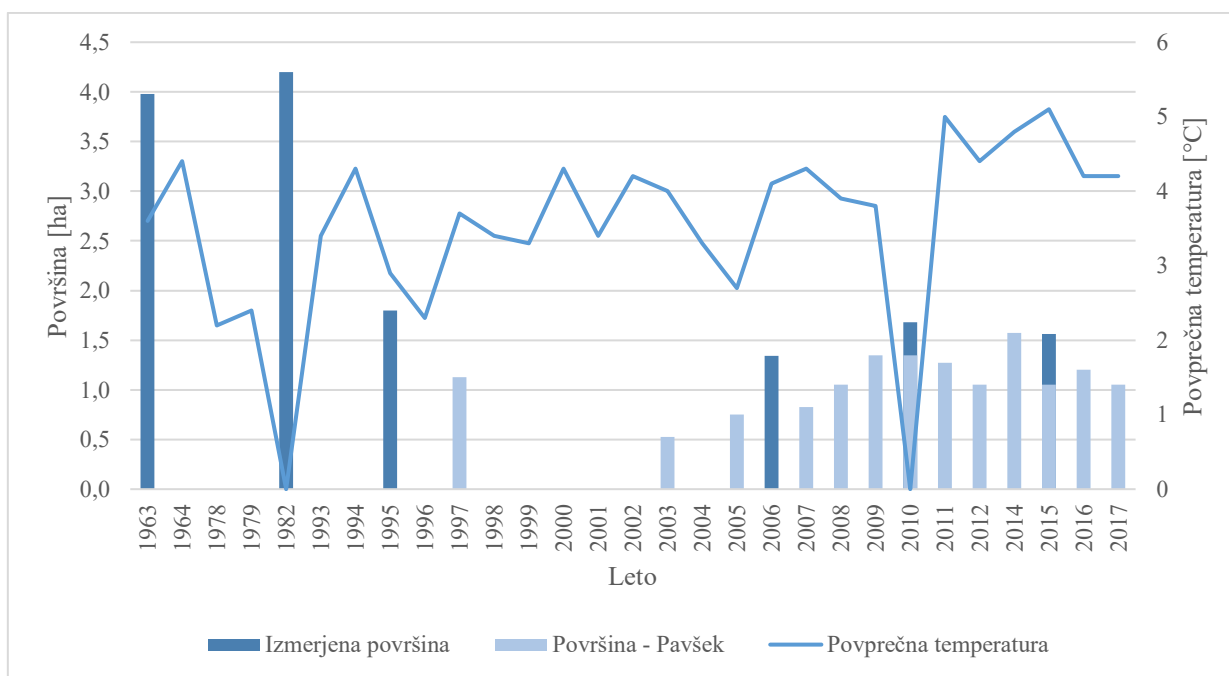
Leto	Povprečna letna temperatura - Krvavec [°C]
1963	3,6
1964	4,4
1978	2,2
1979	2,4
1993	3,4
1994	4,3
1995	2,9
1996	2,3
1997	3,7
1998	3,4
1999	3,3
2000	4,3
2001	3,4
2002	4,2
2003	4,0
2004	3,3
2005	2,7

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 3

2006	4,1
2007	4,3
2008	3,9
2009	3,8
2011	5,0
2012	4,4
2014	4,8
2015	5,1
2016	4,2
2017	4,2

Iz podatkov lahko vidimo, da povprečna letna temperatura počasi raste. Spremembo povprečne letne temperature sem povezala s spremembo površine Ledenika pod Skuto (površino, izračunano z interaktivno metodo orientacije in površino, pridobljeno iz vira (Trobec in Pavšek, 2010)) ter zvezo predstavila v grafikonu 2.



Grafikon 2: Prikaz spremembe površine Ledenika pod Skuto izmerjene z interaktivno metodo orientacije, spremembe površine avtorja Pavška (avtor: Pavšek (2017), vir: GIAM ZRC SAZU) in prikaz spremembe povprečne letne temperature na Krvavcu (vir: ARSO)

Iz grafikona 2 lahko vidimo, da sta sprememba površine ledenika in sprememba povprečne letne temperature med seboj obratno sorazmerni. Podatka o povprečni letni temperaturi za leti 1982 in 2010 nista bila na voljo. Ob večanju povprečne letne temperature se površina ledenika manjša. Največja povprečna letna temperatura, ki je znašala $5,1^{\circ}\text{C}$ pa je bila leta 2015, takrat je površina ledenika obsegala 1,56 ha.

Zgoraj smo ugotovili, da se je površina leta 2010 glede na leto 2006 povečala za 0,34 ha. Če pogledamo povprečno letno temperaturo ugotovimo, da se je ta v tem letu glede na leto 2006 znižala za $0,3^{\circ}\text{C}$. S tem lahko potrdimo predpostavko, da sprememba povprečne letne temperature vpliva na spremembo površine ledenika.

Omenjeno je bilo, da je bila interaktivna metoda fotogrametrične orientacije posnetkov že uporabljena na ledenikih, in sicer na Triglavskem in Kaninskih ledenikih (Triglav Čekada in sod. 2014). Ob primerjavi spremembe površine Triglavskega ledenika s spremembo površine Ledenika pod Skuto lahko opazimo, da se je površina Ledenika pod Skuto manjšala počasneje. Triglavski ledenik je v petdesetih letih izgubil večino svoje površine (97 %), saj je leta 1962 meril 21,5 ha, leta 2012 pa le še 0,6 ha. Ledenik pod Skuto je v podobnem obdobju izgubil manjši delež površine, od leta 1963 do leta 2015 se je namreč površina zmanjšala za 61 %.

Predvidevam, da je razlog za počasnejše taljenje ledu na Ledeniku pod Skuto v njegovi legi. Ta namreč leži v krnici, poleg tega pa ga pred sončnimi žarki še dodatno varujejo visoki vrhovi bližnjih gora. Triglavski ledenik pa je v nasprotju z njim izpostavljen soncu.

7.2 Analiza sprememb prostornine ledenika

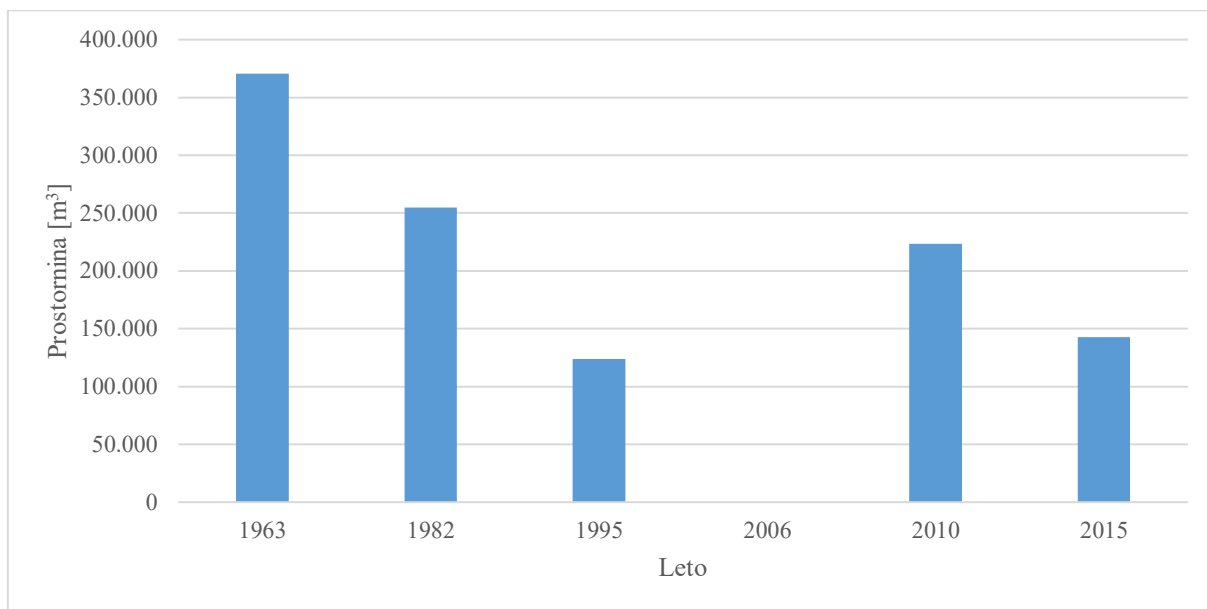
Izračunane razlike prostornin do najnižjega stanja Ledenika pod Skuto iz leta 2006 so predstavljene v preglednici 4. Pri izračunu razlik prostornin sem za lažjo primerjavo rezultatov v vseh primerih uporabila površino oboda ledenika iz leta 2010, kar predstavlja 1,68 ha.

Preglednica 4: Prostornine Ledenika pod Skuto od leta 1963 do leta 2015

<i>Leto</i>	<i>Razlika prostornine do stanja 2006 [m^3]</i>
1963	370.784
1982	254.892
1995	123.891
2006	0
2010	223.319
2015	142.791

Opazimo lahko, da se je prostornina v prvih letih vztrajno manjšala, od leta 1963 do leta 1982 se je zmanjšala za približno 116.000 m³, od leta 1982 do leta 1995 za 131.000 m³. Leta 2006 je imel ledenik najmanjšo izračunano prostornino in sem jo vzela za referenčno prostornino, od katere sem odštela ostale, zato podatka o razliki prostornin za to leto nimam.

V letu 2010 opazimo povečanje prostornine ledenika. Že v zgornji analizi površin je bilo ugotovljeno, da se je le-ta v tem obdobju povečala, kar se ujema s povečanjem izračunane prostornine. Od leta 1995 se je povečala za približno 99.000 m³. Leta 2015 pa lahko znova opazimo zmanjševanje prostornine, ta se je od leta 2010 zmanjšala za približno 81.000 m³.



Grafikon 3: Sprememba razlike prostornine Ledenika pod Skuto od leta 1963 do leta 2015

Na grafičnem prikazu (grafikon 3) so prikazane spremembe razlike prostornine Ledenika pod Skuto od leta 1963 do leta 2015. Vidimo lahko, da se je le-ta zelo spremenila. Od leta 1963, ko je imel ledenik največjo prostornino in do leta 2006, ko je imel najmanjšo, se je namreč zmanjšala za približno 371.000 m³. To dejstvo se ujema z zmanjšanjem površine ledenika, v zgornji analizi sem namreč ugotovila, da se je tudi ta v tem obdobju zmanjšala.

Izračunane prostornine niso prostornine do kameninske osnove, saj ne poznamo ravnine terena pod ledenikom. Ugotavljala sem razlike prostornin do stanja 2006, ko je ledenik zajemal tudi površinsko najmanjši obseg. Pri izračunih sem namreč najprej vzela referenčno ravnino, ki je bila na višini 1990 m, kar predstavlja višino, ki je 10 m nižja od najnižje višine ledenika. Potem sem vse tako dobljene prostornine odštela od stanja v 2006. Kljub temu pa ta način računanja še vedno poda zanesljive podatke o spreminjanju prostornine skozi leta, kar me v diplomski nalogi zanima.

7.3 Prikaz sprememb višine zgornjega robu ledenika

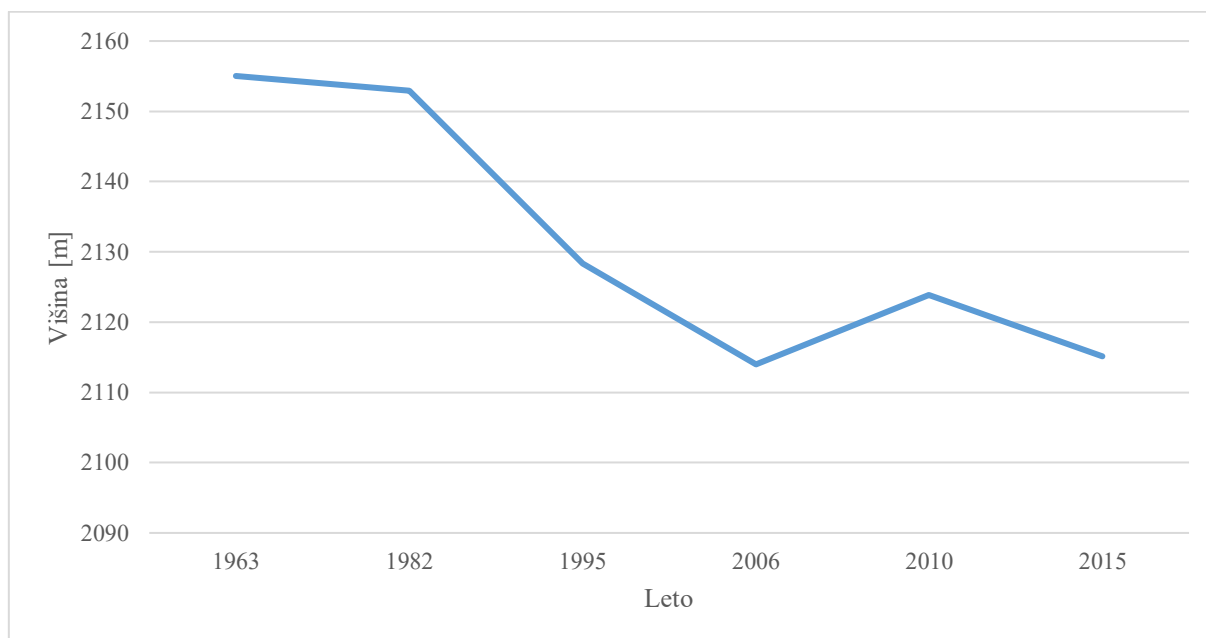
Z uporabo programa za interaktivno metodo orientacije sem za natančnejši prikaz še enkrat zajela linijo zgornjega roba. Na podlagi tega zajema sem izračunala povprečno vrednost nadmorske višine za posamezno leto. Rezultati so predstavljeni v preglednici 5.

Preglednica 5: Povprečna nadmorska višina zgornjega robu Ledenika pod Skuto od leta 1963 do leta 2015

Leto	1963	1982	1995	2006	2010	2015
Povprečna nadmorska višina zgornjega roba [m]	2155	2153	2128	2114	2124	2115

Iz podatkov lahko vidimo, da se je nadmorska višina zgornjega roba ledenika v 52 letih zelo spremenila, znižala se je namreč kar za 40 m. Največji preskok je bil iz leta 1982 na leto 1995, ko se je povprečna nadmorska višina zgornjega roba znižala za 25 m.

Leta 2010 se je višina zgornjega roba glede na leto 2006 povečala za 10 m. Najmanjša vrednost je bila v letu 2006, kar se lepo vidi na grafikonu 4, takrat je višina znašala 2114 m. Vsa nihanja se ujemajo s spreminjanjem površine in prostornine ledenika.



Grafikon 4: Spreminjanje višine zgornjega robu Ledenika pod Skuto od leta 1963 do leta 2015

Na sliki 16 je prikaz sprememb nadmorskih višin zgornjega robu ledenika skozi leta, zajete so iz posnetkov z uporabo interaktivne metode orientacije. Na prikazanem posnetku je ledenik iz leta 2015. Rdeča črta predstavlja nadmorsko višino zgornjega roba ledenika iz leta 1982, vijolična predstavlja leto 1963, modra leto 1995, zelena leto 2010, bela leto 2015 in rumena leto 2006.



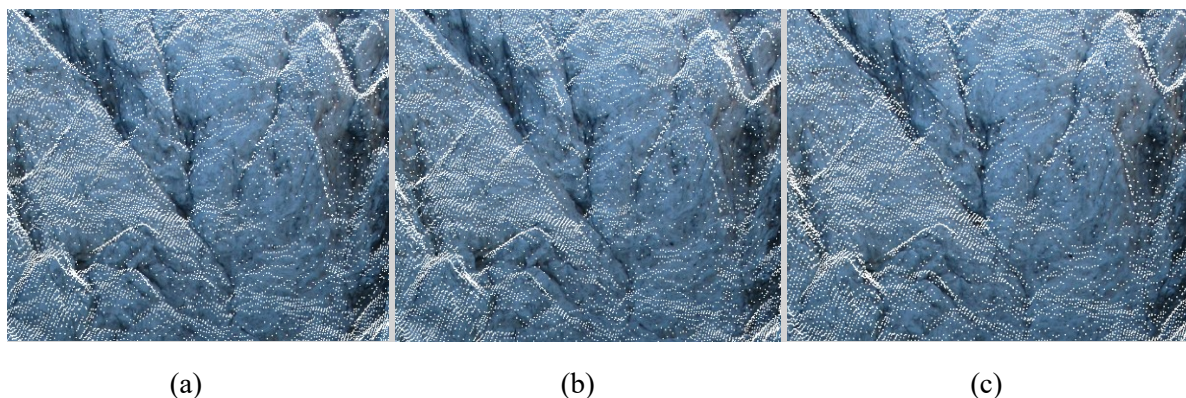
Slika 16: Spremembe višine zgornjega robu ledenika, fotografija iz leta 2015 (vir podlage: GIAM ZRC SAZU)

7.4 Ocena natančnosti metode

Natančnost interaktivne metode orientacije posnetkov lahko preverimo na podlagi sprememb v površini ledenika pri uporabi drugačnih vrednosti parametrov in z vizualnim preučevanjem ujemanj detajla, kot so izvedli Triglav Čekada in sod. (2010) na primeru Triglavskega ledenika.

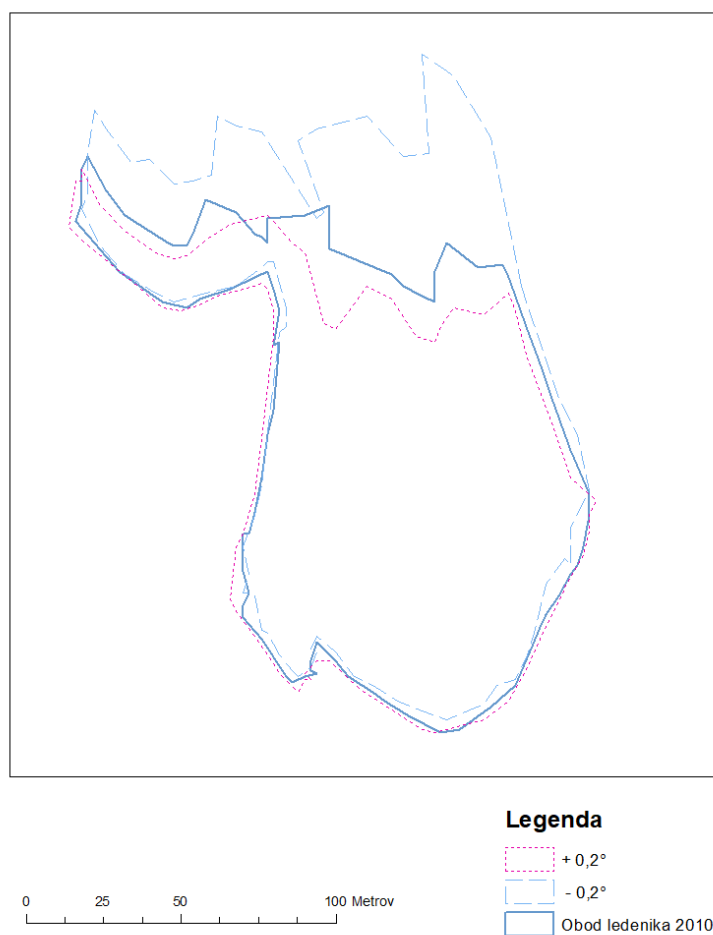
Oceno natančnosti metode sem izvedla na arhivskih fotografijah posnetih v letih 2006, 2010 in 2015. V poglavju 3.2 je opisano, da pri določevanju orientacije posnetkov določamo šest parametrov: tri kote zasuka (α , ν , κ) in tri koordinate projekcijskega centra (x_0 , y_0 , z_0). Le-te sem določila za vsak posnetek. Na podlagi vizualnega ujemanja je bilo določeno maksimalno še dopustno odstopanje za vse tri kote orientacije, ki je $\pm 0,2^\circ$. Tako sem za vsak posnetek določila obod ledenika pri pravilnih orientacijskih parametrih ter pri parametrih, ki so se od pravilnih kotov razlikovali za $+0,2^\circ$ in $-0,2^\circ$.

Na sliki 17(a) je prikazana optimalna orientacija posnetka, slika 17(b) prikazuje orientacije, kjer so vsi koti povečani za $+0,2^\circ$ in slika 17(c) prikazuje kote pomanjšane za $-0,2^\circ$. Opazimo lahko, da se ujemanje pri spremenjenih kotih vidno spremeni.



Slika 17: Interaktivna orientacija posnetka iz leta 2010: (a) optimalni orientacijski parametri, (b) vsi trije koti povečani za $+0,2^\circ$, (c) vsi trije koti zmanjšani za $-0,2^\circ$

Za vsako leto sem na podlagi treh obodov izračunala tri površine ledenika. Glede na te površine sem nato izračunala standardno deviacijo površine ledenika, ki je znašala $\pm 0,1$ ha. Na sliki 18 je prikazano, kako se obod ledenika spremeni, ko spreminjamo orientacijske parametre. Vidimo lahko, da sprememba kotov orientacije za $+0,2^\circ$ zmanjša obod ledenika, medtem ko sprememba kotov za $-0,2^\circ$ poveča obod ledenika.



Slika 18: Obod ledenika pri optimalnih parametrih orientacije in pri spremenjenih kotih za $\pm 0,2^\circ$, podatki za leto 2010

8 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi je predstavljen postopek uporabe interaktivne metode orientacije posnetkov na primeru Ledenika pod Skuto ter izračun površine in prostornine ledenika, ki smo jih zračunali iz tako izmerjenega oboda ledenika. Uporabljeni so bili arhivski posnetki ledenika, ki so bili pridobljeni s strani Geografskega inštituta Antona Melika ZRC SAZU, in lidarskega digitalnega modela reliefa (DMR1). Omenjena metoda je bila prvič uporabljena za Ledenik pod Skuto, bila pa je že uporabljena na Triglavskem in Kaninskih ledenikih.

Sam postopek orientacije posnetkov ni pretirano zamuden, vendar pa zahteva dobro poznavanje detajlov posnetkov, območja obravnava in stojišča fotoaparata v trenutku zajema fotografije. Pri izvedbi sem imela problem predvsem pri določitvi koordinat projekcijskega centra (»stojišča pri macesnu«), saj ledenika nisem obiskala in sem si tako težko predstavljala teren. Pri tem mi je bila v veliko pomoč programska oprema (Atlas okolja, Gaea+ in FugroViewer). Prav tako mi je težave povzročala interpretacija posnetkov. Na nekaterih delih je bil namreč ledenik zasut s kamenjem, ki se je odkrutilo od strmih sten, padlo na ledenik in ga zakrilo.

Interaktivna metoda orientacije posnetkov je bila izvedena v programu za interaktivno metodo orientacije, ki je bil razvit na Geodetskem inštitutu Slovenije, izračun površine in prostornine pa v programskem orodju ArcMap.

Pri analizi rezultatov sem ugotovila, da sta se površina in prostornina Ledenika pod Skuto od leta 1963 zmanjšali. Površina ledenika se je od leta 1963 pa do leta 2015 zmanjšala za 2,42 ha, najmanjšo površino je imel ledenik v letu 2006, in sicer 1,34 ha. Prostornina se je v 43 letih (od leta 1963 pa do leta 2006, ko je imela najmanjšo vrednost) zmanjšala za 371.000 m³. Poleg površine in prostornine sem izvedla izračun spremembe srednje nadmorske višine zgornjega robu ledenika. Ugotovila sem, da se je le-ta v obravnavanem obdobju znižal za 40 m, kar je velik pokazatelj na taljenje ledenika.

Iz spletne strani Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO) sem pridobila podatke o povprečni letni temperaturi zraka na Krvavcu v obdobju od leta 1963 do leta 2015. S povezavo ARSO-vih podatkov in izračunano spremembo površine sem prišla do zaključka, da sta ti dve premo sorazmerni. Ob večanju povprečne letne temperature skozi leta, se je zmanjšala površina Ledenika pod Skuto.

Arhivski posnetki so koristen pripomoček pri preučevanju časovnih sprememb v prostoru, saj lahko na podlagi njih določimo stanje ledenikov v preteklosti. Na kakovost izvedbe interaktivne metode orientacije lahko vplivamo z uporabo DMR-ja boljših ločljivosti, s kakovostnimi fotografijami in boljšo operaterjevo presojo.

Raziskava Ledenika pod Skuto z interaktivno metodo orientacije posnetkov ima številne možnosti za nadaljnje preučevanje. Spremembe ledenika bi lahko prikazali za več let, saj so na voljo arhivski podatki skoraj za vsako leto. Sama sem bila časovno omejena in sem si posledično izbrala le šest posnetkov.

VIRI

Agencija Republike Slovenije za okolje. 2018.

<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/> (Pridobljeno 15. 8. 2018.)

Atlas okolja. 2018.

<http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/> (Pridobljeno 11. 7. 2018.)

FugroViewer. 2018.

<https://www.fugro.com/> (Pridobljeno 11. 7. 2018.)

Gaea + za Planinsko zvezo Slovenije. 2018.

<http://www.gaeaplus.eu/en/> (Pridobljeno 11. 7. 2018.)

Kosmatin Fras, M. 2017. Prosojnice in zapiski predavanj. Fotogrametrija I. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (neobjavljen vir)

Meze, D. 1955. Ledenik na Triglavu in Skuti. Geografski zbornik, 3: 5-144.

Pavšek, M. 2004. Ledenik pod Skuto. Ledeniški dragulj na senčni strani Kamniško-Savinjskih Alp. Geografski obzornik, 51/3: 11–17.

Pavšek, M. 2012. Večinoma krotke ledene pošasti. Ledeniki - zanimivi naravni pojavi gorskih pokrajin. Planinski vestnik, 112/2: 4-9.

Pavšek, M. 2017. Ledenik pod Skuto. DEDI - digitalna enciklopedija naravne in kulturne dediščine na Slovenskem.

<http://www.dedi.si/dediscina/60-ledenik-pod-skuto> (Pridobljeno 12. 7. 2018.)

Pavšek, M. 2018. Ledenik pod Skuto.

<https://giam.zrc-sazu.si/sl/programi-in-projekti/ledenik-pod-skuto> (Pridobljeno 11. 7. 2018.)

Podobnikar, T. 2002. Model zemeljskega površja - DMR ali DMV?. Geodetski vestnik, 46/4: 347-356.

Šolar, L. 2013. Lidarski georeferenciran oblak točk in aerofotografije. Tehnično poročilo. Ljubljana, Geodetski inštitut Slovenije. (neobjavljen vir)

Triglav Čekada, M., Radovan, D., Gabrovec, M. in Kosmatin Fras M. 2010. Preučevanje Triglavskega ledenika s pomočjo arhivskih Horizontovih fotografij. GIS v Sloveniji 2009-2010: 147-153.

Triglav Čekada, M., Radovan, D., Gabrovec, M. in Kosmatin Fras M. 2011. Acquisition of the 3D boundary of the Triglav glacier from archived non-metric panoramic images. The photogrammetric Record, 26/133: 111-129.

Triglav Čekada, M., Zorn, M., Kaufmann, V., Lieb, G. K. 2012. Merjenje malih alpskih ledenikov: primeri iz Slovenije in Avstrije. *Geodetski vestnik*, 56/3: 443-461.

Triglav Čekada, M., Zorn M., Colucci R. R. 2014. Površina kaninskih in triglavskega ledenika od leta 1893, določena na podlagi arhivskih posnetkov ter aerolaserskih podatkov. *Geodetski vestnik*, 58/2: 274–313.

Trobec, T., Pavšek, M. 2010. Ledenik pod Skuto. DEDI - digitalna enciklopedija naravne in kulturne dediščine na Slovenskem.

<http://www.dedi.si/dediscina/60-ledenik-pod-skuto> (Pridobljeno 12. 7. 2018.)

SEZNAM PRILOG

PRILOGA A: ARHIVSKI POSNETKI A1

PRILOGA B: ORIENTACIJSKI PARAMETRI B1

PRILOGA A: ARHIVSKI POSNETKI

Arhivski posnetek iz leta 1963, avtor: Dušan Košir, vir: GIAM ZRC SAZU:



Arhivski posnetek iz leta 1982, avtor: Milan Šifrer, vir: GIAM ZRC SAZU:



Arhivski posnetek iz leta 1995, avtor: Miha Pavšek, vir: GIAM ZRC SAZU:



Arhivski posnetek iz leta 2006, avtor: Miha Pavšek, vir: GIAM ZRC SAZU:



Arhivski posnetek iz leta 2010, avtor: Miha Pavšek, vir: GIAM ZRC SAZU:



Arhivski posnetek iz leta 2015, avtor: Miha Pavšek, vir: GIAM ZRC SAZU:



PRILOGA B: ORIENTACIJSKI PARAMETRI

Koti so podani v stopinjah ter koordinate v metrih.

Orientacijski parametri za posnetek iz leta 1963:

Azimut: 78

Naklon: 16

Zasuk: 4

X: 466348

Y: 136437

Z: 1899

C: 2150

Orientacijski parametri za posnetek iz leta 1982:

Azimut: 78.8

Naklon: 10.2

Zasuk: 2.1

X: 466343

Y: 136469

Z: 1900

C: 4500

Orientacijski parametri za posnetek iz leta 1995:

Azimut: 83

Naklon: 11.8

Zasuk: 1.5

X: 466417

Y: 136388

Z: 1903

C: 4500

Orientacijski parametri za posnetek iz leta 2006:

Azimut: 80

Naklon: 11.3

Zasuk: 357.99

X: 466366

Y: 136437

Z: 1904

C: 3000

Orientacijski parametri za posnetek iz leta 2010:

Azimut: 78.5

Naklon: 12.3

Zasuk: 2

X: 466367

Y: 136437

Z: 1901

C: 4000

Orientacijski parametri za posnetek iz leta 2015:

Azimut: 74.5

Naklon: 20.8

Zasuk: 1

X: 466343

Y: 136477

Z: 1894

C: 8600